

ISSN 2523-6784

Volumen I, Número I -- Enero -- Marzo - 2017

Revista de Innovación Sistemática

ECORFAN[®]



ECORFAN-Taiwán

Indización

- RESEARCH GATE
- GOOGLE SCHOLAR
- HISPANA
- MENDELEY

ECORFAN-Taiwán

Directorio Principal

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD.

Director Regional

VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD.

Director de la Revista

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC.

Edición Tipográfica

TREJO-RAMOS, Iván. BsC.

Edición de Logística

SERRUDO-GONZALEZ, Javier. BsC.

Revista de Innovación Sistemática, Volumen 1, Número 1, de Enero a Marzo 2017, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Taiwán. Taiwan, Taipei. YongHe district, ZhongXin, Street 69. Postcode: 23445. WEB: www.ecorfan.org/taiwan, revista@ecorfan.org. Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María. ISSN 2523-6784. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN Imelda, LUNA-SOTO, Vladimir, actualizado al 31 de Marzo 2017.

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 defensa de la competencia y protección de la propiedad intelectual.

Consejo Editorial

BELTRÁN-MIRANDA, Claudia. PhD
Universidad Industrial de Santander, Colombia

BELTRÁN-MORALES, Luis Felipe. PhD
Universidad de Concepción, Chile

RUIZ-AGUILAR, Graciela. PhD
University of Iowa, U.S.

SOLIS-SOTO, María. PhD
Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca, Bolivia

GOMEZ-MONGE, Rodrigo. PhD
Universidad de Santiago de Compostela, España

ORDÓÑEZ-GUTIÉRREZ, Sergio. PhD
Université Paris Diderot-Paris, Francia

ARAUJO-BURGOS, Tania. PhD
Universita Degli Studi Di Napoli Federico II, Italia

SORIA-FREIRE, Vladimir. PhD
Universidad de Guayaquil, Ecuador

Consejo Arbitral

VGPA. MsC

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

EAO. MsC

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

MMD. PhD

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

BRIIIG. PhD

Bannerstone Capital Management, U.S.

EAO. MsC

Bannerstone Capital Management, U.S.

OAF. PhD

Universidad Panamericana, México

CAF. PhD

Universidad Panamericana, México

RBJC. MsC

Universidad Panamericana, México

Presentación

ECORFAN, es una revista de investigación que publica artículos en el área de: Innovación Sistemática.

En Pro de la Investigación, Enseñando, y Entrenando los recursos humanos comprometidos con la Ciencia. El contenido de los artículos y opiniones que aparecen en cada número son de los autores y no necesariamente la opinión de la Editora en Jefe.

Como primer artículo está *Modelado dinámico del circuito RLC usando análisis numérico*, por CAMACHO-ALTAMIRANO, Ulices, MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma y JUÁREZ-TOLEDO, Carlos, con adscripción en la Universidad Autónoma del Estado de México, como siguiente artículo está *Automatización y control de una línea de ensamble de transmisores clicker con robots de seis grados de libertad y PLC* por SALAZAR-OLIVA, Lilia Rosa, MAYORQUIN-ROBLES, Jesús Antonio, MEDINA-MUÑOZ, Luis Arturo y ROBLES-VERDUZCO, Carlos Benigno con adscripción en el Instituto Tecnológico de Nogales, como siguiente artículo está *Análisis experimental y numérico de la transferencia de calor de un cambiador compacto* por LÓPEZ-CALLEJAS, Raymundo, VACA-MIER, Mabel, TERRES-PEÑA, Hilario y LIZARDI-RAMOS, Arturo con adscripción en la Universidad Autónoma Metropolitana, como siguiente artículo está *Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango* por GONZÁLEZ, Mario Humberto, RODRÍGUEZ-MUÑOZ, Norma Alejandra, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio, con adscripción en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, como siguiente artículo está *Control de un sistema mecatrónico mediante señales mioeléctricas* por CASTILLO-QUIROZ, Gregorio, VELAZQUEZ-APARICIO, Mahali, OLVERA-SOLIZ, Moisés y GONZAGA-LICONA, Elisa, con adscripción en el Instituto Tecnológico Superior de Huachinango, como siguiente artículo está *Construcción de un túnel de viento* por FRANCO-MARTINEZ, DAVID y RAMIRES-SILVA, Pablo con adscripción en la UNAM.

Contenido

Artículo	Página
Modelado dinámico del circuito RLC usando análisis numérico CAMACHO-ALTAMIRANO, Ulices, MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma y JUÁREZ-TOLEDO, Carlos	1-9
Automatización y control de una línea de ensamble de transmisores clicker con robots de seis grados de libertad y PLC SALAZAR-OLIVA, Lilia Rosa, MAYORQUIN-ROBLES, Jesús Antonio, MEDINA-MUÑOZ, Luis Arturo y ROBLES-VERDUZCO, Carlos Benigno	10-23
Análisis experimental y numérico de la transferencia de calor de un cambiador compacto LÓPEZ-CALLEJAS, Raymundo, VACA-MIER, Mabel, TERRES-PEÑA, Hilario y LIZARDI-RAMOS, Arturo	24-32
Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango GONZÁLEZ, Mario Humberto, RODRÍGUEZ-MUÑOZ, Norma Alejandra, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio	33-45
Control de un sistema mecatrónico mediante señales mioeléctricas CASTILLO-QUIROZ, Gregorio, VELAZQUEZ-APARICIO, Mahali, OLVERA-SOLIZ, Moisés y GONZAGA-LICONA, Elisa	46-54
Construcción de un túnel de viento FRANCO-MARTINEZ, David y RAMIRES-SILVA, Pablo	55-71

Instrucciones para Autores

Formato de Originalidad

Formato de Autorización

Modelado dinámico del circuito RLC usando análisis numérico

CAMACHO-ALTAMIRANO, Ulices*†, MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma y JUÁREZ-TOLEDO, Carlos

Universidad Autónoma del Estado de México, UAPT, Instituto Literario # 100, C.P. 50000 Col. Centro, (+52 722) 226 23 00

Recibido 2 de Enero, 2017; Aceptado 8 de Marzo, 2017

Resumen

El análisis de las redes eléctricas mediante modelos matemáticos para conocer el comportamiento dinámico es usualmente confiable, sin embargo, los resultados obtenidos mediante sistemas numéricos y de laboratorio no siempre proporcionan la misma información, ya que el modelo matemático es un modelo ideal que no considera pérdidas o perturbaciones que pudieran estar presentes. En este trabajo se diseña un circuito con elementos resistivos, capacitivos e inductivos (RLC) en serie conectados a una fuente de voltaje, mediante mediciones en tiempo real de cada uno de sus elementos se obtiene una base de datos que serán procesados con el uso de técnicas numéricas para reconstruir la señal original obtenida de las mediciones de laboratorio. Para conocer la precisión del método propuesto se utiliza la herramienta numérica del toolbox de Matlab para obtener la señal del sistema algebraico, además se compara con el sistema original mediante la medición del voltaje del circuito evaluado en el tiempo.

Base de datos, circuito RLC, integración numérica, reconstrucción de señal.

Abstract

The mathematical models to know the dynamic behaviour of the electrical networks are commonly used, however, the results are not always similar with the laboratory systems, because the numerical system does not consider nonlinearities in the elements. In this work, a circuit with RLC series elements connected to a voltage source is designed, using real-time measurements a database is obtained that will be processed with numerical techniques by reconstructing the original signal. Matlab numerical toolbox is used to know the precision of the method, in addition, the results are compared with the experimental system by measuring the voltage in the time.

Database, numerical integration, RLC circuit, reconstruction of signal

Citación: CAMACHO-ALTAMIRANO, Ulices, MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma y JUÁREZ-TOLEDO, Carlos. Modelado dinámico del circuito RLC usando análisis numérico. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-1:1-9

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ucamachoa713@alumno.uaemex.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El análisis de los modelos matemáticos para conocer el comportamiento ideal de los fenómenos en diversas áreas de la ciencia, son de gran interés, debido a que representan un esquema general del sistema (Austria, 2016). El uso de estos modelos algebraicos para representar los fenómenos físicos ha sido de gran ayuda para la ingeniería. Ruiz (2016) describe que los modelos algebraicos pretenden obtener soluciones exactas de los experimentos físicos, aunque la gran desventaja es que es común el uso de una matemática compleja para desarrollar e interpretar los modelos (Revue, 2016).

La solución de los problemas por medio de métodos algebraicos en sistemas con variables de estados suele ser resuelto con modelos dinámicos, (Ogata 2003), comúnmente planteados por sistemas en el dominio de Laplace, por lo que, resulta complicado y costoso computacionalmente, descrito en Martínez (2015). De acuerdo con Javed (2008) y Robles del Peso (2006) es importante y frecuente el uso de métodos numéricos para dar respuesta a diversos modelos matemáticos, ya que las soluciones analíticas a tales problemas pueden ser inexistentes.

Una de las limitantes históricas de los métodos numéricos habían sido los sistemas y herramientas computacionales. Con el crecimiento de las computadoras los métodos numéricos son cada vez más utilizados, debido a sus grandes ventajas como son (Hernández, 2015; Pacheco, 2012):

- Manipulación de sistemas de gran dimensión.
- Puede incorporar No-linealidades a sus sistemas numéricos.

- Resuelve geometrías complicadas muy utilizadas en elemento finito
- Traslada la matemática complicada al uso de aritmética simple

El análisis y estudio de un sistema RLC (Resistivo, Inductivo y Capacitivo) se modela a través de la solución de ecuaciones diferenciales, una opción algebraica que muestra buenos resultados es el mapeo del sistema al dominio de Laplace.

La presencia de los elementos de inductancia y capacitancia dentro de un circuito genera un sistema de segundo orden, constituido por ecuaciones diferenciales Boylestand (2009).

El artículo presenta una visión novedosa para aproximar el modelo de un sistema RLC por medio de una aproximación polinomial, el polinomio resultante es comparado con el modelo algebraico y real.

El objetivo del artículo obtener un modelo polinomial (modelo numérico) usando un sistema numérico con aritmética simple en sustitución al modelo Laplaciano convencional (modelo algebraico).

El modelo numérico obtenido tiene la característica de ser un sistema polinomial de cuarto orden y, el cual al igual que el algebraico también aproxima de manera adecuada a la respuesta de laboratorio. Como se muestra en los resultados, la ventaja del modelo propuesto es la simplicidad de la ecuación obtenida.

Para validar el modelo se utilizó un sistema en serie RLC donde se presentan los tres casos:

- Modelo algebraico resuelto por transformada de Laplace.
- Modelo numérico sistema polinomial.

- Modelo real es obtenido en el laboratorio por medio de un osciloscopio.

Modelo Algebraico del sistema RLC

El comportamiento dinámico de un circuito serie RLC conectado a una fuente de voltaje de cd es representado en la figura 1.

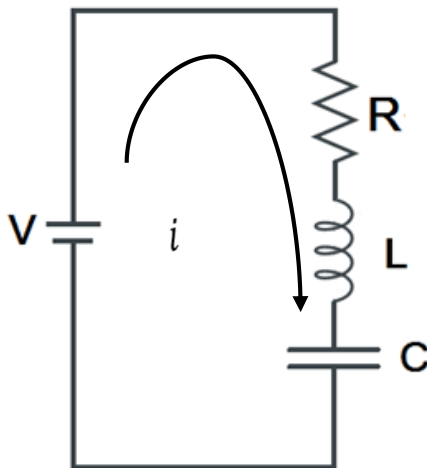


Figura 1 Circuito RLC en serie
Fuente: *Elaboración propia*

Donde R es la resistencia en Ohms (Ω), L la inductancia en Henrios (H) y C es el capacitor en Faradios (F). El voltaje de cada elemento se puede describir por medio de las siguientes expresiones:

- El voltaje de la resistencia R viene dado directamente por ley de Ohm:

$$V_R = Ri \quad (1)$$

Donde V representa la potencia disipada en la resistencia R debido al paso de corriente i.

- La inductancia tiene la característica de acumular y ceder energía en forma de campo magnético y el voltaje es definido por la siguiente derivada:

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

- Finalmente, el voltaje del capacitor C cuya función es la de almacenar y ceder energía en forma de campo eléctrico se determina por la siguiente integral:

$$V_C = \frac{1}{C} \int i dt \quad (3)$$

Usando las leyes de Kirchoff para una malla cerrada con elementos en serie el voltaje total resulta

$$V = V_R + V_L + V_C \quad (4)$$

Sustituyendo (1), (2) y (3) en (4) la expresión diferencial que describe el comportamiento dinámico del sistema es:

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad (5)$$

Donde i es la corriente que circula por el circuito cerrado RLC. Con la finalidad de tener una función analítica que represente el comportamiento del sistema de estudio en el tiempo, se aplicará el método de transformada de Laplace y transformada inversa de Laplace a la ecuación (2), dividiendo entre L y derivando con respecto del tiempo se obtiene:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0 \quad (6)$$

Donde se observa que el voltaje de la fuente V se iguala a cero después de la primera derivada, debido a que es constante a lo largo de todo el estudio (Butusov, 2017).

Identificando como señal de entrada el voltaje de la fuente V , señal de salida la i y condiciones iniciales cero de la ecuación (2) resulta la función de transferencia de la forma

$$\frac{I(S)}{V(S)} = \frac{1}{L} \frac{S}{S^2 + \frac{R}{L}S + \frac{1}{LC}} \quad (7)$$

Introduciendo como señal de entrada una función escalón de la forma $V(S) = \frac{A}{S}$ en (7) se obtiene

$$I(S) = \frac{A}{L} \frac{1}{S^2 + \frac{R}{L}S + \frac{1}{LC}} \quad (8)$$

Aplicando transformada inversa de Laplace a la ecuación (8) resulta

$$i(t) = A \frac{\frac{1}{C^2} e^{-\frac{Rt}{2L}}}{\left(\frac{CR^2}{4} - L\right)^{\frac{1}{2}}} \sinh\left(\frac{t\left(\frac{CR^2}{4} - L\right)^{\frac{1}{2}}}{LC^{\frac{1}{2}}}\right) \text{Amp.} \quad (9)$$

Por lo tanto

$$V_c = \frac{1}{C} \int i dt = -Ae^{-\frac{Rt}{2L}} \left[\cosh\left(\frac{t\left(\frac{CR^2}{4} - L\right)^{\frac{1}{2}}}{LC^{\frac{1}{2}}}\right) + \frac{RC^{3/2}}{2\left(\frac{CR^2}{4} - L\right)^{\frac{1}{2}}} \sinh\left(\frac{t\left(\frac{CR^2}{4} - L\right)^{\frac{1}{2}}}{LC^{\frac{1}{2}}}\right) \right] V \quad (10)$$

Modelo Numérico del sistema RLC

Con el desarrollo de las computadoras las herramientas numéricas han sido cada vez utilizadas. De acuerdo con Zhou (2017) la aproximación polinomial ha sido ampliamente usada para dar soluciones aproximadas de problemas paramétricos.

En este artículo se propone un polinomio de cuarto orden debido a que en el laboratorio se identifican cinco posiciones tal como lo muestra la tabla 1 (Bird 2017). En los resultados se muestra que un polinomio de cuarto grado aproxima de manera eficiente al circuito RLC.

k-ésimo tiempo en τ	Carga del capacitor V_c en % de Voltaje de entrada
1	63.2
2	86.5
3	95.0
4	98.2
5	99.3

Tabla 1 Porcentaje de carga de un capacitor
Fuente: (Bird, 2017)

Para obtener el polinomio para aproximar el voltaje en el capacitor es necesario introducir los siguientes conceptos.

Chapra (2006) describe a la aproximación por diferencias hacia adelante de una función tabulada $Vc(x_i)$ se define como:

$$\Delta Vc_i = Vc_{i+1} - Vc_i \quad i = 0, \dots, n-1 \quad (11)$$

Donde Vc_i es el voltaje de carga del capacitor conocido de la tabla 1.

Estas diferencias reciben el nombre de diferencias de primer orden de función $Vc(x)$ sobre el intervalo función (t, t_n) .

La diferencia de segundo orden es descrita por:

$$\Delta^2 Vc_i = \Delta(\Delta Vc_i) = \Delta Vc_{i+1} - \Delta Vc_i \quad i = 0, \dots, n-2 \quad (12)$$

De forma general, para diferencias de k -ésimo orden, se tiene:

$$\Delta^k Vc_i = \Delta^{k-1} Vc_{i+1} - \Delta^{k-1} Vc_i \quad i = 0, \dots, n-k \quad (13)$$

Las diferencias hacia adelante pueden reescribirse con el siguiente sistema.

$$\begin{aligned}Vc_2 &= Vc_1 + \Delta^1 Vc_1 \\Vc_3 &= Vc_1 + 2\Delta^1 Vc_1 + \Delta^2 Vc_1 \\Vc_4 &= Vc_1 + 3\Delta^1 Vc_1 + 3\Delta^2 Vc_1 + \Delta^3 Vc_1 \\Vc_5 &= Vc_1 + 4\Delta^1 Vc_1 + 6\Delta^2 Vc_1 + 4\Delta^3 Vc_1 + \Delta^4 Vc_1\end{aligned}$$

En forma compacta

$$\begin{aligned}Vc_2 &= (1 + \Delta)Vc_1 \\Vc_3 &= (1 + \Delta)^2 Vc_1 \\Vc_4 &= (1 + \Delta)^3 Vc_1 \\Vc_5 &= (1 + \Delta)^4 Vc_1\end{aligned}\quad (14)$$

De tal manera que para el k -ésimo orden, se simplifica en la ecuación (15)

$$Vc_{k+1} = (1 + \Delta)^k Vc_1 \quad (15)$$

El teorema del binomio de Newton es un arreglo mediante el cual se puede escribir el desarrollo de las potencias positivas de un binomio y las k combinaciones de un grupo de i elementos definen la ecuación:

$$\begin{aligned}Vc_{k+1} &= \binom{k}{0} Vc_{i+1} + \binom{k}{1} \Delta^1 Vc_1 + \binom{k}{2} \Delta^2 Vc_1 + \binom{k}{3} \Delta^3 Vc_1 + \\&\dots + \binom{k}{k} \Delta^k Vc_1\end{aligned}\quad (16)$$

Donde

$$\binom{k}{i} = \frac{k!}{i!(k-i)!} \quad (17)$$

Es la fórmula del coeficiente binomial, como se establece en Cheng-I y Yeong-Chin (2016).

Podemos reescribir cada ecuación usando la notación del Binomio de Newton de la siguiente manera

$$\begin{aligned}Vc_2 &= Vc_1 + \Delta^1 Vc_1 = \binom{1}{0} Vc_1 + \binom{1}{1} \Delta^1 Vc_1 \\Vc_3 &= Vc_1 + 2\Delta^1 Vc_1 + \Delta^2 Vc_1 =\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&\binom{2}{0} Vc_1 + \binom{2}{1} \Delta^1 Vc_1 + \binom{2}{2} \Delta^2 Vc_1 \\Vc_4 &= Vc_1 + 3\Delta^1 Vc_1 + 3\Delta^2 Vc_1 + \Delta^3 Vc_1 = \\&\binom{3}{0} Vc_1 + \binom{3}{1} \Delta^1 Vc_1 + \binom{3}{2} \Delta^2 Vc_1 + \binom{3}{3} \Delta^3 Vc_1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Vc_5 &= Vc_1 + 4\Delta^1 Vc_1 + 6\Delta^2 Vc_1 + 4\Delta^3 Vc_1 \\&+ \Delta^4 Vc_1 = \binom{4}{0} Vc_1 + \binom{4}{1} \Delta^1 Vc_1 + \binom{4}{2} \Delta^2 Vc_1 \\&+ \binom{4}{3} \Delta^3 Vc_1 + \binom{4}{4} \Delta^4 Vc_1\end{aligned}\quad (18)$$

Las expresiones anteriores de forma recursiva se pueden simplificar

$$\begin{aligned}Vc_{k+1} &= \binom{k}{0} Vc_1 + \binom{k}{1} \Delta^1 Vc_1 + \binom{k}{2} \Delta^2 Vc_1 \\&+ \binom{k}{3} \Delta^3 Vc_1 + \binom{k}{4} \Delta^4 Vc_1\end{aligned}\quad (19)$$

Y es fácil demostrar que si $j=0$ tenemos para cualquier k

$$\binom{k}{0} = \frac{k!}{0!(k-0)!} = \frac{k!}{(k)!} = 1 \quad (20)$$

Podemos simplificar el polinomio recursivo como

$$\begin{aligned}y_{k+1} &= y_1 + \binom{k}{1} \Delta^1 y_1 + \binom{k}{2} \Delta^2 y_1 + \binom{k}{3} \Delta^3 y_1 \\&+ \dots + \binom{k}{k} \Delta^k y_1\end{aligned}\quad (21)$$

Se observa que $\binom{k}{j}$ es un polinomio en k de grado j , por lo que y_k , se puede expresar como

$$y_{k+1} = a_0 + a_1 k + a_2 k^2 + a_3 k^3 + \dots + a_j k^j \quad (22)$$

Si una función es continua en $a \leq x \leq b$, se puede aproximar a un polinomio $P_n(x_i)$, de grado n . Debido a que el sistema tiene cinco puntos bien definidos (tabla 1) el polinomio de cuarto orden resultante tiene la siguiente forma:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 \quad (23)$$

Donde $(a_0, a_1, a_2, a_3 \text{ y } a_4)$ corresponden a las incógnitas descrita en Juárez (2016).

Resultados

Se utilizó el circuito de la figura 2 para verificar el método propuesto,

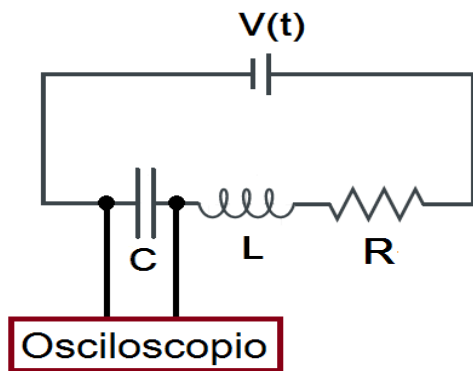


Figura 2 Circuito RLC con osciloscopio
Fuente: Elaboración propia

Donde el valor de la fuente es $V= 5 \text{ vdc}$, $C= 330\mu\text{F}$, $R=4.7\text{k}\Omega$ y $L=680\mu\text{H}$.

Una forma de validar el sistema es por medio de la constante tiempo τ cuyo valor es Boylestand (2009):

$$\tau = RC \tag{24}$$

Con el valor de voltaje dado por

$$V\tau = (63.2\%)(V) \tag{25}$$

Por lo que de forma teórica $\tau = 1.65\text{s}$ y $V\tau = 3.16\text{vdc}$. La figura 3 muestra en rojo los resultados de laboratorio usando un Osciloscopio Digital de Banco de 200 MHz - Tektronix TDS2022C, donde los valores aproximados resultantes son para el tiempo de $\tau = 1.60\text{s}$ y para el voltaje de $V\tau = 3.08\text{vdc}$.

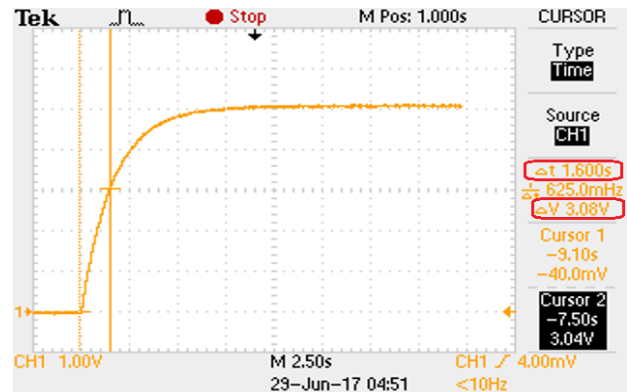


Figura 3 Validación del circuito RLC con el osciloscopio
Fuente: Elaboración propia

Solución Numérica

Como se muestra a continuación el uso de la interpolación polinomial brinda una opción eficiente y sencilla para describir el comportamiento del sistema RLC.

Los cinco pares ordenados que se tomaron en consideración para realizar la interpolación polinomial son los valores conocidos de la tabla 1. Para un voltaje de entrada de $V=5\text{vcc}$ y $t=1.65\text{s}$ tenemos los siguientes resultados mostrados en tabla 2.

Tiempo en τ	Tiempo en segundos	Voltaje
1	1.65	3.16
2	3.3	4.325
3	4.95	4.75
4	6.6	4.91
5	8.25	4.965

Tabla 2 Voltaje de un capacitor respecto del Tiempo τ
Fuente: Elaboración propia

Utilizando la ecuación (23) el polinomio de cuarto grado se describe como

$$P_4x = V(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 \tag{26}$$

Como los cinco puntos conocidos de la tabla 2 satisfacen la expresión 26 se puede obtener el siguiente sistema lineal para determinar los coeficientes $[a_0, a_1, a_2, a_3, a_4]$

$$\begin{aligned} a_0 + 1.65a_1 + (1.65^2)a_2 + (1.65^3)a_3 + (1.65^4)a_4 &= 3.16 \\ a_0 + 3.30a_1 + (3.30^2)a_2 + (3.30^3)a_3 + (3.30^4)a_4 &= 4.325 \\ a_0 + 4.95a_1 + (4.95^2)a_2 + (4.95^3)a_3 + (4.95^4)a_4 &= 4.75 \\ a_0 + 6.60a_1 + (6.60^2)a_2 + (6.60^3)a_3 + (6.60^4)a_4 &= 4.91 \\ a_0 + 8.25a_1 + (8.25^2)a_2 + (8.25^3)a_3 + (8.25^4)a_4 &= 4.965 \end{aligned} \quad (27)$$

Coefficiente	Resultado
a_0	0.0018
a_1	2.8168
a_2	-0.6629
a_3	7.3199×10^{-2}
a_4	-3.0777×10^{-3}

Tabla 3 Solución del sistema lineal de la ecuación 27

Fuente: *Elaboración propia*

La solución del sistema es mostrado en la tabla 3 y la ecuación (28) es la representación polinomial de cuarto grado.

$$f(x) = 0.0018 + 2.8168t - 0.6629t^2 + 7.3199 \times 10^{-2}t^3 - 3.0777 \times 10^{-3}t^4 \quad (28)$$

El grafico 1 muestra la curva del modelo algebraico (ec. 10) modelada con el toolbox simbólico de Matlab, el polinomio de cuarto orden propuesto (ec. 28) y los resultados de laboratorio.

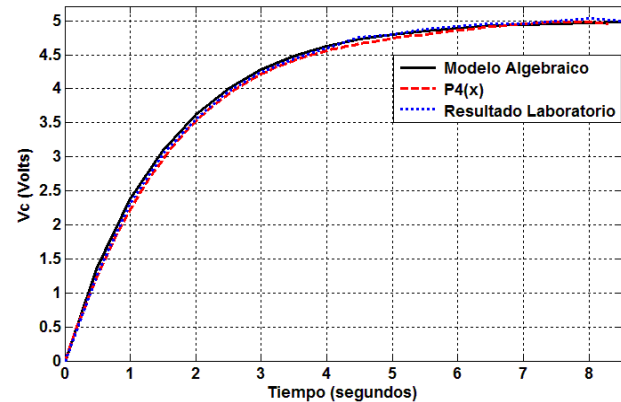


Grafico 1 Modelo algebraico, Solución numérica y Resultado de laboratorio

Fuente: *Elaboración propia*

Para validar la exactitud del modelo Algebraico y el Polinomial contra el valor real de laboratorio se utilizó el error relativo (ver ec. 29)

$$\varepsilon_R = \frac{|V_{Lab} - V_{Aprox}|}{V_{Lab}} \times 100\%$$

Donde V_{Lab} valor medido del laboratorio y V_{Aprox} son las aproximaciones de los modelos algebraico y numérico. La tabla 4 muestra los errores relativos correspondientes a las curvas del grafico 1 evaluados en los puntos establecidos de τ de la tabla 2.

Tiempo en τ	V_{Lab}	$V_{P(4)}$	$V_{Alg.}$	ε_{R_P4}	$\varepsilon_{R_Alg.}$
1	3.2400	3.1600	3.2740	2.4691	1.0493
2	4.4000	4.3250	4.4040	1.7045	0.0909
3	4.8000	4.7500	4.7940	1.0416	0.1250
4	4.9600	4.9100	4.9290	1.0080	0.0625
5	5.0400	4.9650	4.9760	1.4881	1.2698

Tabla 4 Error absoluto de los voltajes de carga en el capacitor respecto del Tiempo τ

Fuente: *Elaboración propia*

En la tabla 4 se observa que las variaciones de las curvas en los puntos seleccionados para τ son menores al 2.5%, por lo que los modelos algebraico y numérico se aproximan al modelo real de laboratorio.

Conclusiones

En el artículo se expone que un polinomio de cuarto orden generado mediante el uso de métodos numéricos, aproxima al modelo real y algebraico de un circuito RLC.

Como se muestra en la ecuación (28) y tabla 3 el polinomio obtenido tiene los coeficientes mayores en $[a_1, a_2]$ respecto al resto $[a_0, a_3, a_4]$, trabajos futuros estarán encaminados a disminuir el grado del polinomio haciéndolo más simple computacionalmente.

Otro trabajo futuro estará encaminado al diseño, monitoreo y construcción de sistemas de control del factor de potencia o algún otro circuito eléctrico RLC que requiera de un control rápido y eficiente. Finalmente se obtendrán los armónicos por medio de herramientas numéricas.

Referencias

Austria, L., Noriega, R., Canales, B. y Ruiz, L. (2016). "Diseño de un convertidor de potencia eléctrica para obtener menos pérdidas de energía". Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. volumen 3, pp. 51-59, ISSN 2410-3454.

Bird, J. (2017). "Electrical Circuit Theory and Technology". Sixth edition. Routledge. ISBN 978-1-315-56192-9. pp. 296

Boylestand, R. L. y Nashelsky, L. (2009). "Electronic Devices and Circuit Theory". USA. Pearson/Prentice Hall. ISBN 0135026490. pp. 31.

Butusov, D. N., Ostrovski, V. Y. and Pesterev, D. O. (2017). "Numerical Analysis of Memristor-Based Circuits with Semi-Implicit Methods". IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). pp. 271-276, DOI: 10.1109/EIconRus.2017.7910545.

Chapra, S. C. y Canale, R. P. (2006). "Métodos Numéricos para Ingenieros". 5ta edición. McGraw-Hill. ISBN 970-10-6114-4. pp. 509

Cheng-, C. and Yeong-Chin C. (2016). "Signal Reconstruction Based on Newton's Forward Divided Difference for SCADA of Wide-Area Intelligent Energy System". 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control, pp. 682-685. DOI 10.1109/IS3C.2016.175.

Hernández, I., Juárez, C. y Martínez, I., (2015). "Interpolación polinomial para determinar el tiempo de tratamiento criogénico para acero AISI D2 en medio básico". Pistas educativas, ISSN 1465-1249.

Javed, M., Aftab, H. and Qasim, M., (2008). "RLC Circuit Response and Analysis (Using State Space Method)". IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security April 2008. volumen 8, pp. 48-54.

Juárez, C., Martínez, I. y Betancourt, R. J. (2016). "Analysis of the Natural Response of RC Circuit using Weierstrass Approximation Theorem". Pistas educativas, ISSN 1405-1249.

Martínez, I., Juárez, C., (2015). "Modelado de un Sistema Máquina Bus Infinito Usando Transformada de Laplace". Pistas educativas, ISSN 1465-1249.

Ogata, K. (2003). "Ingeniería de Control Moderno". Madrid. 4ta edición. Prentice Hall. ISBN 0-13-060907-2. pp. 973.

Pacheco, N. J., Juárez, C. y Martínez, I., (2012). “Análisis Dinámico de la Estabilidad Usando Interpolación de Alto Orden”. Ingeniería Investigación y Tecnología de la UNAM, volumen 13, pp. 451-460, ISSN 1405-7743.

Revuelta, J., González, A. y Bosh, R. (2016). “Comparación de métodos experimentales para obtener los parámetros eléctricos de un motor de inducción”. Revista de Sistemas Experimentales. volumen 3, pp. 8-17.

Robles del Peso, A. y García Benedito J. (2006). “Métodos Numéricos en Ingeniería. Prácticas con Matlab”. Universidad de Oviedo. ISBN 13-978-84-8317-563-7. pp. 163.

Ruiz, F., Hernández, E., Aguilar, K. y Macías, E. (2016). “Comparación de la solución analítica y numérica de la ecuación de difusión de calor unidimensional en estado transitorio aplicado a un muro”. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. volumen 3, pp. 160-169, ISSN 2410-3454.

Zhou, Y., Wu, H., Gu, C. and Song, Y., (2017). “A Novel Method of Polynomial Approximation for Parametric Problems in Power Systems”. IEEE Transactions on power systems. volumen 12. DOI: 10.1109/TPWRS.2016.2623820.

Automatización y control de una línea de ensamble de transmisores clicker con robots de seis grados de libertad y PLC

SALAZAR-OLIVA, Lilia Rosa†, MAYORQUIN-ROBLES, Jesús Antonio, MEDINA-MUÑOZ, Luis Arturo y ROBLES-VERDUZCO, Carlos Benigno

Departamento de Metal-Mecánica, Instituto Tecnológico de Nogales

Recibido 3 de Enero, 2017; Aceptado 2 de Marzo, 2017

Resumen

Debido a la creciente demanda de este producto, se ha venido incrementando su producción haciendo cada vez mas difícil cumplir los requerimientos del cliente tanto en volumen como en calidad, por lo que fue necesario buscar una solución. Por tanto dicha solución consiste en automatizar la línea de ensamble de transmisores clicker, para llevar a cabo la automatización de esta operación se utilizaran como controlador principal un PLC, mediante el cual se monitorearan guardas, puertas de acceso y alarmas, para el ensamblado se utilizaran brazos roboticos con seis grados de libertad, con controladores de la marca FANUC, uno de ellos se encargara de la alimentación de un conveyor con las piezas necesarias tomándolas de carritos surtidores, después 3 robots mas se encargaran de tomar material y armar los transmisores pieza por pieza en un fixture, al terminar lo pondrán sobre el mismo conveyor, después el 5to y ultimo robot se encargara de colocarlo en la estación de prueba donde se validara la funcionalidad del mismo, posteriormente será depositado en una resbaladilla que los llevara directamente a empaque.

Automatizacion, PLC, Fixture, Clicker, Robots

Abstract

Due to the growing demand of this product, it's increased production has made it harder to meet customer requirements in both volume and quality; so it was necessary to find a solution. Therefore, said solution consists of automating the clicker transmitter assembly line. A PLC as a principal controller will be used to automate this procedure. It will monitor the guards, access doors, and alarms. For the assembly, robotic arms with six degrees of freedom will be used with FANUC brand controllers. One of them will be in charge of feeding a conveyor with the necessary pieces taken from a dispenser cart. Next, 3 more robots will be in charge of taking the materials and assembling the transmitters piece by piece in a fixture. Once finished, they will be placed in the same conveyor. Afterwards, the 5th, and last, robot will be in charge of delivering them to the test station; where their functionality will be tested. These will then be placed in a slide that will take them directly to packaging.

Automation, PLC, Fixture, Clicker, Robots

Citación: SALAZAR-OLIVA, Lilia Rosa, MAYORQUIN-ROBLES, Jesús Antonio, MEDINA-MUÑOZ, Luis Arturo y ROBLES-VERDUZCO, Carlos Benigno. Automatización y control de una línea de ensamble de transmisores clicker con robots de seis grados de libertad y PLC. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-1:10-23

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Hoy en día la creciente competencia en el sector industrial hace que la automatización no sea una opción para mantenerse en el mercado, sino una necesidad. Los sistemas de manufactura existentes se han transformado gracias al desarrollo de las máquinas herramientas, la implementación de robots industriales, monitoreo y control de la producción, entre otros.

El término automatización se propuso en los años cuarenta en Estados Unidos para indicar el manejo y proceso automáticos de las máquinas en la producción. En los sistemas de producción actuales, uno de los elementos más importantes para la automatización lo constituyen los robots industriales (Kalpakjian & Schmid, 2008).

Existen distintas definiciones para lo que es un robot industrial; la International Organization for Standardization (2012) describe a un robot industrial como una “máquina formada por un mecanismo que incluye varios grados de libertad, que a menudo tiene la apariencia de uno o varios brazos que terminan en una muñeca con la capacidad de sujetar una herramienta, una pieza de trabajo, o un dispositivo de inspección”.

El proyecto e implementación de un sistema robotizado implica la consideración de muchos factores, como son la selección adecuada del robot, disposición del robot en la célula del trabajo, plano de implementación del sistema, elementos pasivos como mesas, alimentadores, herramientas y elementos activos como PLC, máquinas CN, manipuladores secuenciales, entre otros. (Martín Hernández, et. al., 2013).

El presente trabajo mostrará información técnica y resultados de la automatización de una línea de ensamble de transmisores clicker, que consiste en tomar una línea de producción y revisar cada parte de su proceso con el fin de detectar los puntos críticos y buscar una solución automatizada para disminuir el tiempo, aumentar la calidad, la seguridad de producción y reducir los costos de producción.

En términos generales, se plasma un sistema automático de una celda capaz de ensamblar cada una de las partes de un transmisor clicker, así como probarlo y dejarlo listo para el empaque. Este sistema es asistido por robots de la marca FANUC, un PLC como control principal que coordinará y llevará el inventario de materiales y de unidades ensambladas, un equipo de prueba desarrollado por ingeniería de pruebas “caja de Faraday”, un sistema de seguridad administrado por un PLC de seguridad de la marca BANNER, un grupo de operadores y guardas.

Análisis inicial

La celda a automatizar actualmente cuenta con una serie de estaciones de ensamblaje para cada una de sus partes, así como un equipo de prueba funcional capaz de detectar cualquier falla en el funcionamiento. Después éste es llevado a la estación de empaquetado y etiquetado.

Las dimensiones de la línea de ensamble de este son de alrededor de 20mts de largo por 3mts de ancho con la participación de 17 personas (figura 1), entre ellas materialistas, operadores de equipo de prueba y ensambladores.

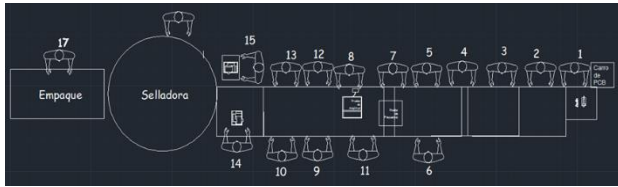


Figura 1 Línea manual
Fuente: *Elaboración propia*

El ensamble consta de 6 piezas que se ensamblan una a una a mano en una línea de producción, donde se prueban y se empaican. Este proceso se divide en seis operaciones:

- Tomar la tapadera trasera (back cover) y colocar una etiqueta antirrobo en el interior, posteriormente ubicarla en una caja.
- Insertar batería al tablero.
- Colocar el tablero sobre la tapa trasera.
- Poner la tapa delantera (top cover) a presión sobre la tapa trasera con tablero.
- Someter a prueba en el equipo funcional.
- Colocar un botón y la tapa de configuración.
- Empacar.

En un turno de 9 horas en promedio se ensamblan 5,700 transmisores dando un aproximado de un trasmisor cada 6 segundos. Los tiempos aproximados por operación manual se presentan en la tabla 1.

Tiempos Aproximados por Operación		
# Operación	Descripción	Tiempo
1	Pegar etiqueta a la tapa trasera	3 a 4 seg.
2	Insertar batería al tablero	3 seg.
3	Colocar el tablero sobre la tapa trasera	3 a 4 seg.
4	Poner la tapa frontal	4 a 5 seg.
5	Probar en equipo funcional	6 seg.
6	Poner botón de plástico a presión	4 a 5 seg.
7	Poner la tapa de configuración	4 a 5 seg.

Tabla 1 Tiempos de Operación Manual
Fuente: *Elaboración propia*

Sistema de Automatización

Para automatizar esta línea de ensamble se pretende reducir la intervención humana, utilizando lo último en tecnología de automatización y control para mejorar el rendimiento, calidad del producto, seguridad y capacidad de producción. A partir del análisis inicial, se eligieron los componentes principales para el proceso, como son los robots, el controlador principal, el sistema de seguridad y la dinámica del nuevo proceso.

La implantación de un robot industrial en un determinado proceso exige un detallado estudio previo del proceso en cuestión, examinando las ventajas e inconvenientes que conlleva la introducción del robot. Dentro del catálogo de FANUC, una empresa líder en productos y servicios para automatización industrial, se eligió los FANUC LR Mate 200iD y FANUC M-10iA. La primera serie de robots se caracteriza por ser robots compactos de seis grados de libertad, con características similares a las de un brazo humano. Combina la mejor capacidad de carga de peso del robot con la protección estándar IP67 de la International Electrotechnical Commission (2013).

Esto hace que sea el mejor y más confiable mini robot para la automatización de procesos en muchas industrias.

Por otro lado, la serie M-10 de FANUC es el robot de manipulación más rápido de su clase. Esta serie ofrece un rendimiento mejorado y tiempos de ciclo optimizados en una amplia gama de operaciones de pick, place y machine tending. Con un peso de sólo 130 kg cuentan con una carga útil de 12 kg, velocidades de eje muy altas y aceleración que resulta en movimientos de muñeca altos. El brazo delgado integrado por cable y el soporte de montaje hueco de muñeca facilitan la operación incluso en áreas de trabajo confinadas (FANUC The Factory Automation Company, s.f.).

Los robots FANUC pueden ser programados de diferentes maneras. En este caso se utilizará un control TeachPendant y una interface de programación textual con comando e instrucciones definidas. En este entorno es posible desarrollar varios programas y ejecutar el que deseemos ya sea manual o llamándolos de uno a otro haciendo una especie de subrutinas y librerías para reutilizar código.

El PLC a utilizar sería de la plataforma CompacLogix, que iría junto con distintos módulos dentro de un gabinete principal. Esta plataforma es ideal para abordar aplicaciones de control a nivel máquina, con o sin movimiento simple, con una potencia y escalabilidad sin precedentes. Los módulos a utilizar son de la marca Allen-Bradley, y sus características son:

- Módulo de salidas. Su finalidad será para activación de solenoides, válvulas y lámparas.
- Módulo de contadores de alta velocidad. Estos se utilizarán para leer el encoder del conveyor y poder tener la posición exacta de las piezas.

- Módulo de salidas de relay. Estas se utilizarán para controlar contactores y actuadores que requieren alta corriente y baja velocidad de conmutación.
- Módulo de entradas configurables a positivo o negativo. Se utilizarán para la lectura de sensores y señales de entrada desde otros dispositivos, como status de robots o equipo de prueba.
- Módulo de salidas de estado sólido. Se utilizarán para mandar señales de inicio a los robots.

Para ayudar a optimizar el proceso de diseño y configuración Rockwell Automation (2017) ha mejorado el software. Ahora incluye una integración ampliada con herramientas de ingeniería así como contenido de aplicación predesarrollado para reemplazar código personalizado y nuevas funciones para ayudar a mejorar la seguridad. Studio 500 es un software que permite el desarrollo, programación y mantenimiento de los equipos y producto Allen Bradley.

De fuentes de alimentación, se utilizará una de 24VDC a 2A para alimentar los motores de las puertas corredizas de la zona de carga de material, y otra de 24VDC a 10A para alimentar la lógica y dispositivos de 24 volts necesarios para el control.

Para la comunicación entre diferentes dispositivos, se escogió el Stratix 5700 Industrial Managed Ethernet Switch. Este switch establece la comunicación entre los diferentes dispositivos con protocolo TCP/IP creando una red local y a su vez dando posibilidad de ver dicha red desde una red externa. De la misma manera, se escogió el SE20-84XTRJ822, 8 Port Industrial Ethernet Switch para mantener una comunicación cerrada entre los cinco robots.

Su finalidad será activar los sistemas de seguridad y evitar que colisionen entre ellos debido a que conocerán la posición de cada uno y mediante una calibración especial podrán determinar qué tan cerca se encuentra uno del otro.

La interface TURCK 8MB12Z-5P3-5/S90 Multiport Interface Boxes se utilizará para mantener un estándar en el tipo de conexión entre sensores, actuadores y PLC o robots, facilitando el reemplazo en caso de daño en alguno de ellos. Con su ayuda se disminuirá la cantidad de cables y acomodo, la identificación de las conexiones y gracias a sus indicadores luminosos se podrá determinar el buen funcionamiento.

El sistema de seguridad que se implementará contará con un controlador de seguridad modular. Se utilizará un controlador general BANNER / XS26-de que tiene la opción de expandirse para agregar hasta ocho módulos de expansión de I/Os. De los módulos a agregar está el BANNER / XS16si 16-pin Safety Input Module, cuya función será monitorear todos los sensores, interruptores de las puertas, posiciones de los carritos y señales de seguridad de los demás componentes. Otro módulo a utilizar es el BANNER / XS2ro Safety Relay Output Module, que tiene dos pares de salidas redundantes que cierran los circuitos de seguridad en los cinco robots: el primer par se utilizará para la señal "EMG" paro de emergencia y el segundo para el fence o perímetro. Un módulo de comunicación Ethernet/IP a RS485 para módulos de expulsión de I/Os se utilizará para aumentar el número de salidas y entradas del robot FANUC M-10iA ya que por hardware no cuenta con I/Os. Con este módulo se podrá leer y escribir en cualquiera de los puertos disponibles (BANNER Engineering Corp., s.f.).

Un switch BANNER / SSA-EB1 Flush-mount Solenoid Interlock Safety Switch Emergency Stop Push Button será utilizado como medida de seguridad. Este botón es un paro de emergencia general que deshabilita todo movimiento y proceso riesgoso, este va directamente al PLC de seguridad. Cinco de ellos se utilizarán para cubrir las zonas más peligrosas y al alcance de otras personas para ser accionado en cualquier momento. Otro elemento del sistema de seguridad sería IDEM / KLP Solenoid Interlock Safety Switch, donde varios de ellos serán utilizados para bloquear las puertas de acceso mientras las partes en movimientos están activas. Estos switches estarán conectados al sistema de seguridad y en caso de ser quebrantado, de igual manera, se desactivan todos los procesos de movimiento (IDEM Safety Switches, 2013).

Un relay de estado sólido se utilizará para controlar el encendido y apagado de los motores de las puertas. Al ser de estado sólido, se evita el riesgo de que se queden pegados debido al no formar una chispa al encenderse con alta corriente de carga por no tener contactos.

Finalmente, se utilizará un SMC Manifold, que es un compacto arreglo de ocho válvulas que optimiza el espacio y simplifica el control y las conexiones. Su función será el controlar los fixtures de cerrado y con el uso de válvulas de vacío, se controlarán unas ventosas que se utilizarán para los robots. Estas ventosas ayudarán a mover las piezas sin causar daños gracias a su gran adherencia y hermeticidad.

Diagramas de flujo de robots, control y seguridad

El robot probador espera una señal del PLC que le indica que el conveyor se ha detenido y puede empezar la inspección. Si encuentra partes disponibles toma el ensamble y la tapadera, se mueve a la estación de prueba, pone la tapa en el ensamble ya probado y lo intercambia por el ensamble sin probar. El ensamble probado lo mueve según el resultado de la prueba, si el resultado sale satisfactorio lo deposita en el área de empaque, de lo contrario lo deposita en el área para revisión técnica.

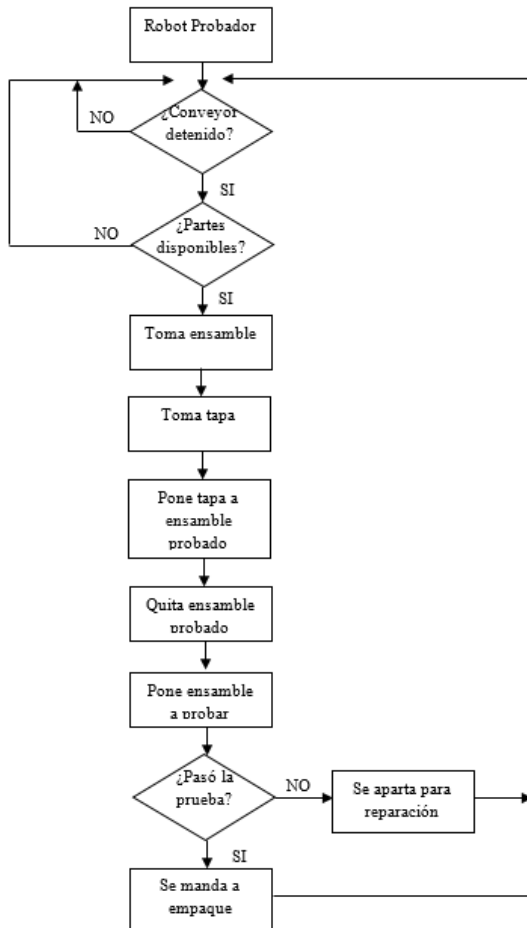


Figura 2 Diagrama de flujo del robot probador
Fuente: *Elaboración propia*

El robot ensamblador espera la señal del PLC que le indica que el conveyor se ha detenido y puede empezar la inspección. Si encuentra partes disponibles empieza por tomar la batería y la etiqueta, después mediante una inspección visual determina la posición de las piezas y toma la cobertura trasera y la monta en el fixture de armado, le coloca la etiqueta, toma el tablero, lo coloca sobre el fixture, le inserta la batería, toma la cobertura delantera la coloca sobre el fixture y manda cerrarlo. Después, toma el botón plástico y lo inserta en el ensamble, toma el ensamble y lo acomoda en el conveyor junto a la tapadera de configuración.

El robot de materiales recibe la orden de producción y según el inventario actual, acomoda las charolas con las diferentes partes. Una vez las charolas en posición, cuenta las partes y actualiza el inventario, luego saca las partes y las posa en el conveyor. Si una de estas charolas se vacía, la intercambia por otra del carrito. En caso de que el carrito este vacío da la orden de cambiarlo y si hay piezas disponibles de la misma pieza en otro lugar las toma de ahí. En caso de que el conveyor se llene, el robot espera hasta que se mueva y continúa surtiendo las piezas. Los diagramas de flujo de los robots se presentan de la figura 2 a la 4.

Las puertas para material son controladas por el PLC. Al terminarse el material de un carrito o simplemente elegir en el menú el reemplazo del mismo, la puerta debe moverse a la posición de carrito para cubrir esa zona mientras se hace el cambio y así evitar el acceso a la celda. Para hacer este movimiento es necesario verificar que el robot no este sacando o metiendo charolas para evitar una colisión; si este es el caso la tarea se detiene hasta que la condición es segura.

Al llegar a la posición del carrito a intercambiar, éste es liberado y se espera hasta que el nuevo carrito es ingresado para mover la puerta a su posición cero. Su diagrama de flujo se presenta en la figura 5.

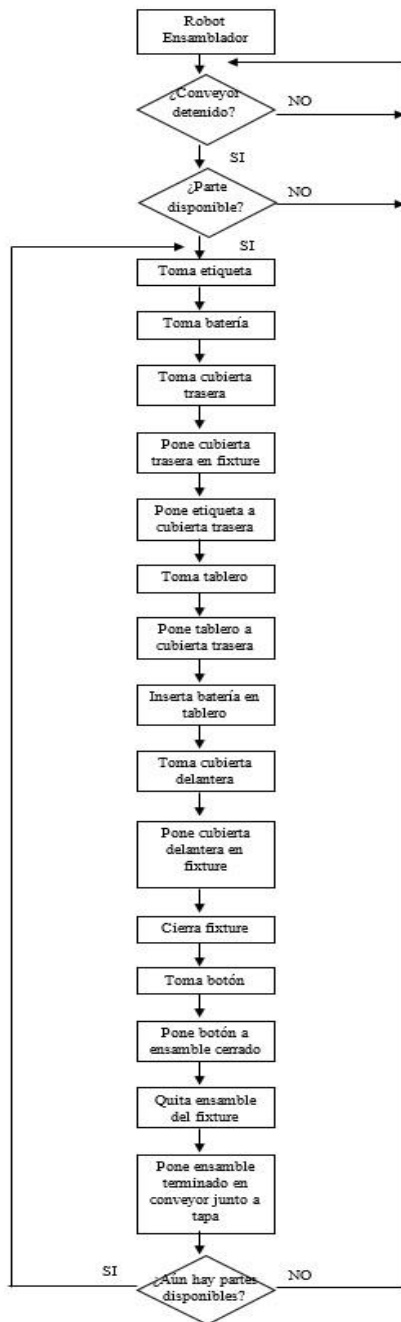


Figura 3 Diagrama de flujo del robot ensamblador
Fuente: Elaboración propia

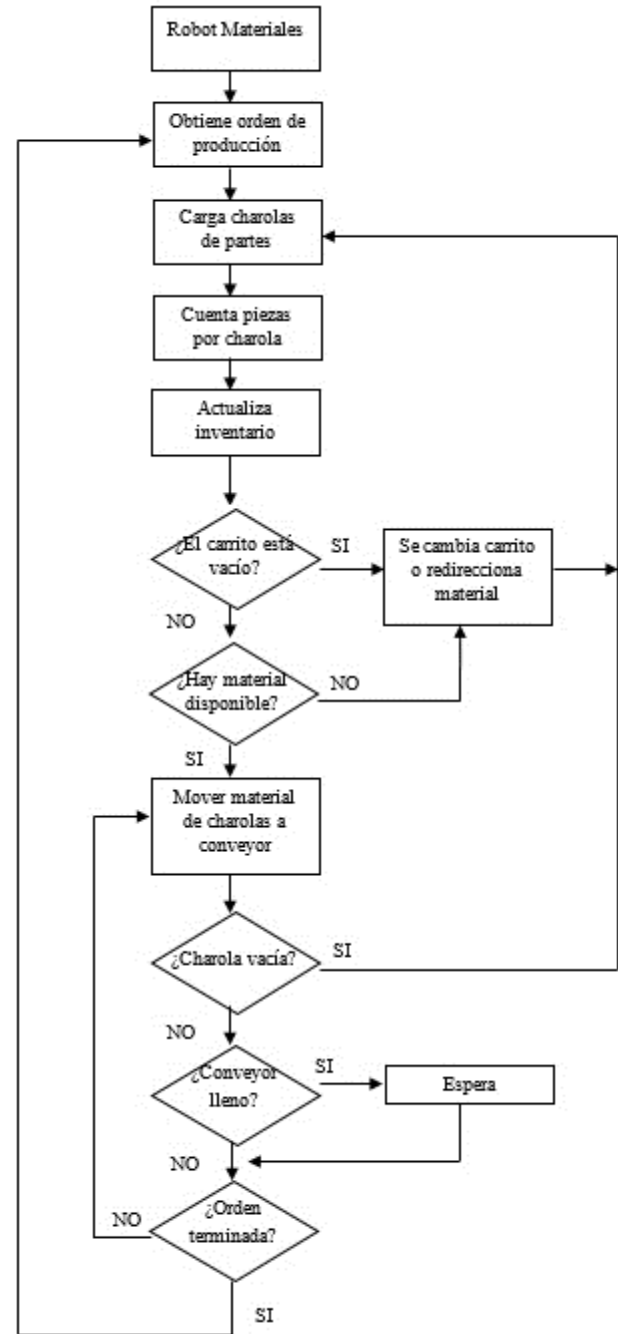


Figura 4 Diagrama de flujo de robot de materiales
Fuente: Elaboración propia

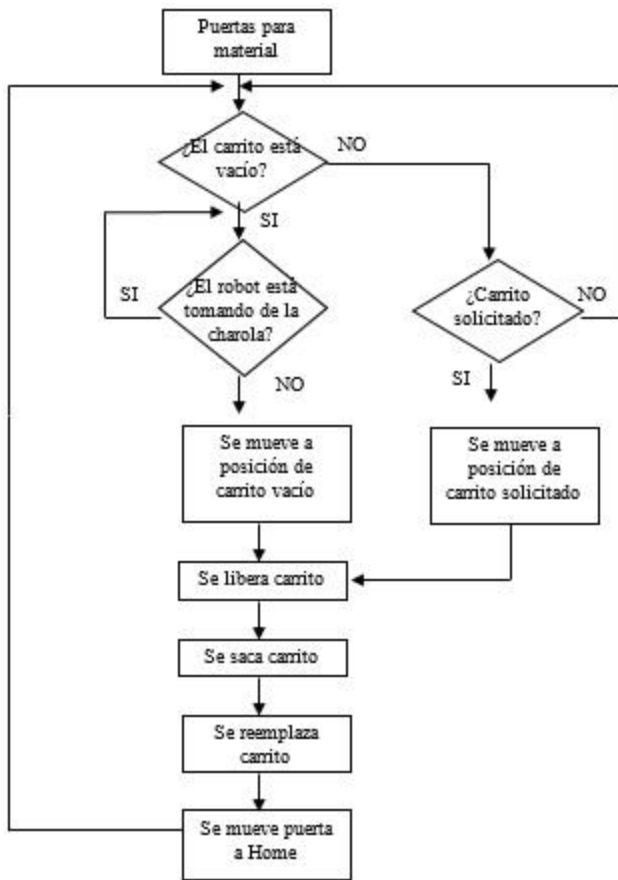


Figura 5 Diagrama de flujo para las puertas de material
Fuente: *Elaboración propia*

El controlador de seguridad trabaja independiente al PLC. Se encarga de monitorear los interruptores de paro de emergencia, las guardas de seguridad y sensores que cubren el perímetro del área además de habilitar y deshabilitar las funciones de los demás equipos. En caso de presionar un interruptor de paro de emergencia se detiene todo movimiento y alimentación riesgosa y ésta solo puede ser activada de nuevo restaurando el sistema a una condición segura. En caso de violar el perímetro, se deshabilitan los movimientos automáticos poniendo todo en modo JOG (sólo puede ser movido manualmente). Si la condición es completamente segura, se habilita el funcionamiento automático.

El diagrama de flujo del controlador de seguridad se presenta en la figura 6.

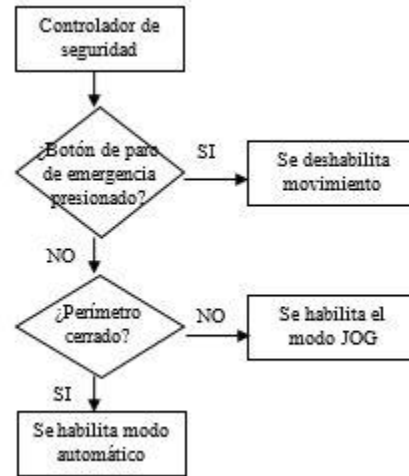


Figura 6 Diagrama de flujo de controlador de seguridad
Fuente: *Elaboración propia*

Resultados

Después de la selección de los componentes, diagramas se desarrollaron a la par con la construcción de estructuras para delimitar el área y montar los diferentes componentes que forman la celda.

Al analizar el área, se instaló el de gabinete principal (figura 7 y 8). En él se montó el gabinete que contiene toda la comunicación y control: el PLC CompacLogix L33ER junto a sus módulos, se alambraaron entradas y salidas del mismo hacia las interfaces multipuertos “junction boxes”, se colocó el conmutador para la comunicación Ethernet/IP, un conmutador para comunicación entre robots, se hicieron cables de Ethernet y se conectaron todos los dispositivos a la red. Se instalaron dos fuentes de poder de 24VDC, un controlador PowerFlex para motor de conveyor y un PLC de seguridad BANNER.

Éste se alambro con sus correspondientes interfaces multipuertos, se agregaron terminal blocks para las señales de los robots y se añadieron relays de estado sólido para controlar motores de DC. Posteriormente, se hizo la instalación de interruptores principales térmicos para proteger los equipos de sobrecargas.



Figura 7 Gabinete 1

Fuente: Elaboración propia

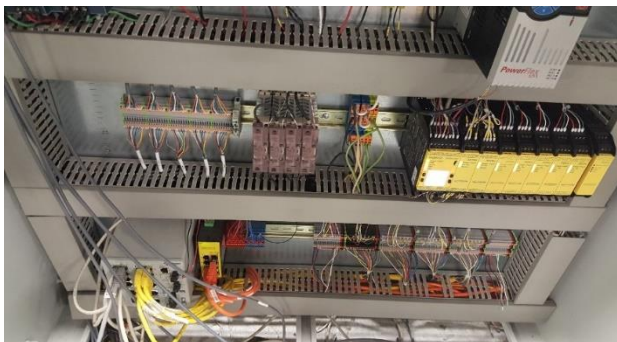


Figura 8 Gabinete 2

Fuente: Elaboración propia

Se continuó con la instalación de los robots ensambladores y probador (figura 9). En esta etapa los robots fueron fijados en sus bases alineados al conveyor con taquetes en el suelo (figura 10). Se montaron las cajas de control de cada robot en el panel principal de la celda, se hicieron las conexiones eléctricas de la toma de 220VAC y las conexiones entre caja y robot. Se encendieron, configuraron y calibraron.

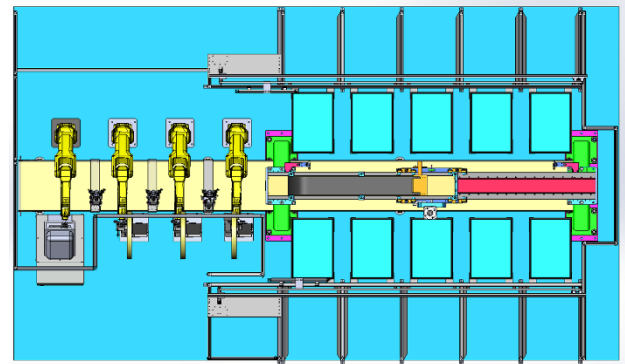


Figura 9 Diagrama de posición de los robots

Fuente: Elaboración propia

Luego se instalaron las herramientas de robots ensambladores. Aquí se instaló y probó la herramienta diseñada para los robots ensambladores y se alineó. Se instalaron líneas de vacío para las ventosas, se guio cableado del gripper desde la herramienta a una caja de conexiones y control de los puertos I/Os de los robots (figuras 11 a 14).



Figura 10 Robots instalados

Fuente: Elaboración propia

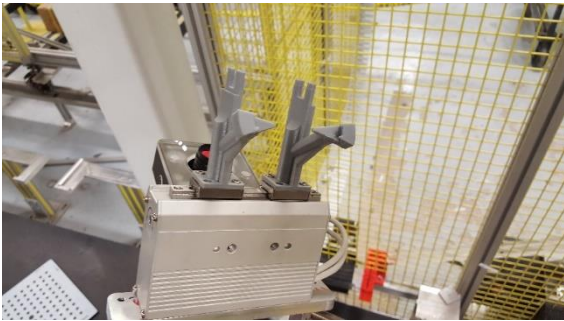


Figura 11 Herramienta para ensambladores
Fuente: Elaboración propia

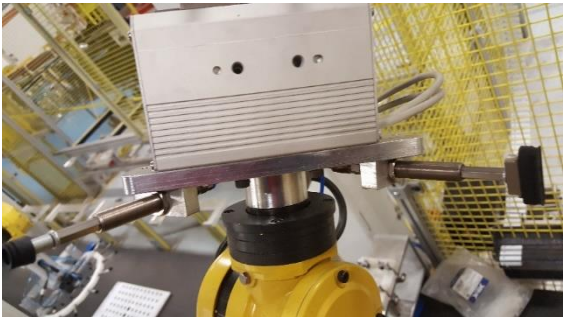


Figura 12 Herramienta para ensambladores
Fuente: Elaboración propia



Figura 13 Caja I/Os Robots vacía
Fuente: Elaboración propia



Figura 14 Caja I/Os Robots instalada
Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso fue la instalación del robot surtidor de materiales, su herramienta y válvulas de vacío (figura 15). Para ello se montó una grúa (7mo eje) de este robot a través de logística y medidas de seguridad. Una vez completada la operación, se instaló la herramienta con nueve ventosas para surtir piezas al conveyor y ganchos para meter y sacar charolas de los carritos. Se guiaron cables y mangueras desde las tomas principales a través de las canaletas de la grúa. Se instalaron dos manifolds para las nueve válvulas de vacío en la parte trasera del brazo, se instaló y alambraron los expansores de puertos I/Os mismos que activarán las válvulas y obtendrán las señales de vacío correcto.



Figura 15 Robot de materiales con herramienta
Fuente: Elaboración propia

Se instaló un fixture para el cierre de ensamble. Este fixture va sobre el conveyor accesible para el robot, donde se irán colocando cada una de las piezas para posteriormente cerrar a presión el trasmisor.

Los nuevos tiempos que se obtuvieron se visualizan en la tabla 2. Estos tiempos aproximados son de un solo robot ensamblador y dan aproximadamente 17 a 18 seg, dando el resultado de entre los tres tendríamos un tiempo de ciclo de casi 6 segundos, igual o menor al tiempo del proceso manual.

Posteriormente se instalaron las dispensadoras de etiquetas, que se encargarán de mantener lista una etiqueta para el robot. Estos dispensadores se instalaron del otro lado del conveyor al alcance del robot, y se alimentarán de un rollo con 5000 etiquetas suficientes para cubrir un turno.

Asimismo, se instalaron interruptores de límite para monitorear la posición de puertas corredizas y detectar la presencia de carritos en posición. También se instalaron solenoides bloqueadores de carrito, se alambraaron y se guiaron hasta las interfaces multipuerto (junction box) a través de conectores estándar de tipo M12.

Se instalaron dos Panel View Automation Direct para controlar y monitorear el proceso. Con estas interfaces para el operador podrá generar los gráficos y controles. El software que se utilizó fue de Automation Direct “C-MORE programming” (figura 16).

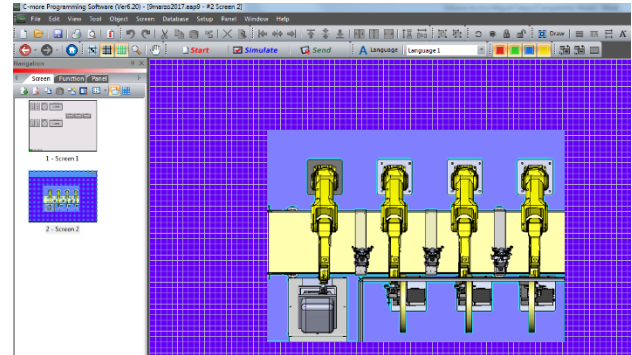


Figura 16 C-MORE programming Software
Fuente: Elaboración propia

Ya teniendo el controlador de seguridad BANNER conectado y funcionando, se agregaron las señales del fence y paros de emergencia. Por lo tanto se añadieron cinco interruptores de paro de emergencia con contactos redundantes y las salidas del controlador hacia las terminales de seguridad de los cinco robots. Para la programación de este controlador de seguridad se utilizó el editor que la misma compañía ofrece de nombre “BANNER Expandable Safety Controller” (figura 17).

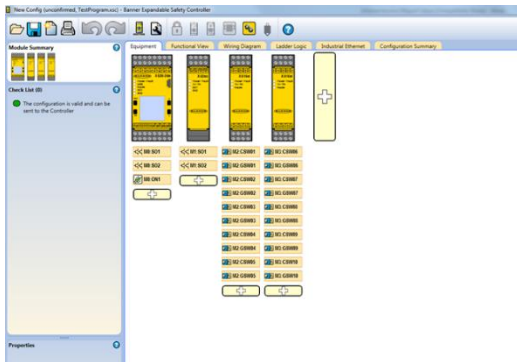


Figura 17 BANNER Expandable Safety Controller
Fuente: Elaboración propia

Una vez configurado cada uno de los módulos y puertos de entradas y salidas se procede a generar un circuito lógico que será el encargado de reconocer condiciones inseguras y seguras según las necesidades de la aplicación, encargándose de activar o desactivar los elementos peligrosos según sea la situación.

Para la programación de los robots, fue necesaria tener lista la herramienta y la zona de trabajo, pues antes de comenzar se deben generar las calibraciones para las diferentes herramientas o “ToolFrames”. En el caso de los ensambladores se utilizaron cuatro:

- ToolFrame 1: Ventosa para Batería.
- ToolFrame 2: Ventosa para Etiqueta.
- ToolFrame 3: Gripper parte para sujetar botón plástico.
- ToolFrame 4: Gripper parte para sujetar Cover.

Después se generan los planos “User Frames”

- Plano #1 “User Frame 1” corresponde al plano sobre el conveyor. En este plano se toma referencia para tomar las piezas.

- Plano #2 “User Frame 2” plano sobre el fixture. Este plano referencia las posiciones para el ensamble de pieza por pieza.

Para el método que se empleó para generar los planos se utilizó una cámara montada sobre el robot y con ayuda de la misma plantilla generar un plano automáticamente. Este método se utilizó en nuestra aplicación ya que se cuenta con una cámara en el robot con la que nos ayudaremos a encontrar las piezas y contrarrestar los errores por posición, provocados por el movimiento, vibración, entre otros.

Una vez calibradas las herramientas, los planos creados se debe tener cuidado de no mover o cambiar algo en las herramientas o posición del robot pues de hacerlo todas las calibraciones se pierden.

Tiempos Aproximados por Operación		
# Operación	Descripción	Tiempo
1	Tomar la etiqueta y batería	2 seg.
2	Tomar la tapa trasera y ponerla en el fixture	2 seg.
3	Pegar etiqueta	1 seg.
4	Tomar tablero y ponerlo en fixture	3 seg.
5	Insertar batería	1.5 seg.
6	Tomar tapa frontal y ponerla en fixture	2 seg.
7	Cerrar fixture	1 seg.
8	Tomar el botón de plástico y ensamblarlo	3 seg.
9	Sacar ensamble y ponerlo en el conveyor	2 seg.

Tabla 2 Tiempos aproximados en celda automatizada
Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

La automatización y mejora de procesos son tareas que exigen resultados en aspectos de producción, costos y tiempos. Consecuente, la innovación y la búsqueda de soluciones se persiguen para mejorar el rendimiento de los procesos. Debido a la creciente demanda de los transmisores clicker, se ha venido incrementando su producción haciendo cada vez más difícil cumplir los requerimientos que exigen los clientes.

Gracias al conocimiento de campos de ingeniería como programación, robótica, controladores lógicos programables, instrumentación y neumática, se logró desarrollar un sistema de automatización para esta línea de ensamble.

Posterior a la investigación, análisis y toma de decisiones se logró formalizar un sistema de automatización para una línea de ensamble de transmisores clicker. Con los datos obtenidos, se estudió el proceso, manejo y tiempos de producción de cada operación en el ensamblado y pruebas.

Seguidamente de escoger el equipo a utilizar y la metodología, el desarrollo de esquemas y croquis del área se determinaron logrando la disminución de personal involucrado en el proceso así como un aumento de calidad y confiabilidad del producto, además de la reducción del tiempo de producción.

En la integración y programación se vieron distintas obstáculos como el analizar el área de posición de la celda, una correcta sincronía e interacción entre los diferentes componentes del sistema, calibración de herramientas, secuencias de tareas y la generación de la lógica.

En un futuro se buscará la continua innovación de este y otros tipos de procesos, así como su implementación en otras áreas.

Referencias

BANNER Engineering Corp. (s.f.). Products. Recuperado el 20 de Febrero de 2017, de BANNER Engineering Corp.: <http://www.bannerengineering.com>

FANUC The Factory Automation Company. (s.f.). FANUC LR Mate robot series. Recuperado el 20 de Febrero de 2017, de FANUC: <http://fanuc.eu>

FANUC The Factory Automation Company. (s.f.). FANUC M-10 robot series. Recuperado el 20 de Febrero de 2017, de FANUC: <http://www.fanuc.eu>

IDEM Safety Switches. (Octubre de 2013). Safety Interlock Switch with Guard Locking. Recuperado el 25 de Febrero de 2017, de IDEM Safety Switches Site Content Guide: <http://http://www.idemsafety.com/>

IEC International Electrotechnical Commission. (29 de Agosto de 2013). IEC 60529:1989+AMD1:1999+AMD2:2013 Degrees of protection provided by enclosures (IP Code). Recuperado el 20 de Febrero de 2017, de IEC Webstore: <http://www.iec.ch>

ISO International Organization for Standardization. (Marzo de 2012). ISO 8373:2012, Robots and robotic devices — Vocabulary. Recuperado el 29 de Mayo de 2017, de ISO: <http://www.iso.org>

Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA. México, México: PEARSON EDUCACIÓN.

Martín Hernández, M. D., Berbós Almenara, E., Herránz Cortés, T., Carrobles Maeso, M., Rodríguez García, F., Rioja Cuesta, G. F., . . . Madrid Ruiz, J. (2013). Manual Técnico de Mecánica y seguridad industrial. Madrid, España: CULTURAL S.A.

Rockwell Automation Inc. (2017). Literature Library. Recuperado el 25 de Febrero de 2017, de Rockwell Automation, Inc: <http://www.rockwellautomation.com/>

Análisis experimental y numérico de la transferencia de calor de un cambiador compacto

LÓPEZ-CALLEJAS, Raymundo†, VACA-MIER, Mabel, TERRES-PEÑA, Hilario y LIZARDI-RAMOS, Arturo

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Av. San Pablo 180. C.P. 02000, Ciudad de México

Recibido 6 de Enero, 2017; Aceptado 9 de Marzo, 2017

Resumen

En este trabajo se analiza experimental y numéricamente la transferencia de calor en un cambiador de calor compacto de tubos aletados, se emplea el modelo de turbulencia k- ϵ para flujo turbulento con un número de Reynolds de 1.44×10^4 , contenido en el software COMSOL Multiphysics. El cambiador de calor compacto, de cinco pasos, forma parte de un calentador de agua del tipo instantáneo, de 10 L/min de flujo. Sus dimensiones físicas son: 248 mm de longitud, 138 mm de profundidad y de 50 mm de altura, tiene 72 aletas con espesor de 1mm. La tubería es de 12 mm de diámetro. El dispositivo fue instrumentado totalmente para obtener las variables físicas necesarias para su evaluación termodinámica, de acuerdo con la correspondiente norma oficial mexicana. En la simulación se obtiene la distribución de temperaturas tanto para los gases de combustión como para el agua que se utiliza en el proceso, usando el software de CFD, (Computational Fluid Dynamics por sus siglas en inglés). Después de 20 s la temperatura del agua a la salida fue de 41.04 °C la cual se mantuvo casi constante. Este valor fue muy cercano al que se obtuvo experimentalmente. de 40 °C.

Análisis numérico, cambiador de calor compacto

Citación: LÓPEZ-CALLEJAS, Raymundo†, VACA-MIER, Mabel, TERRES-PEÑA, Hilario y LIZARDI-RAMOS, Arturo. Análisis experimental y numérico de la transferencia de calor de un cambiador compacto. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-1:24-32

Abstract

In this work heat transfer in a compact finned tube heat exchanger is experimentally and numerically analyzed. We used the k- ϵ turbulence model for turbulent flow, which is included in the COMSOL Multiphysics software with a number of Reynolds of 1.44×10^4 . The five-step compact heat exchanger is part of an instant-type water heater, of 10 L/min flow. Its physical dimensions are: 248 mm length, 138 mm depth and 50 mm in height, it has 72 fins with a thickness of 1 mm. The pipe is 12 mm in diameter. The experimental device was fully instrumented to obtain those physical variables necessary for the thermodynamic evaluation, according to the corresponding Mexican official legislation. The distribution of temperatures for both the combustion gases and water used in the process were obtained via simulation, using the Computational Fluid Dynamics program (CFD). After 20 seconds, the temperature of output water was 41.04 °C, which remained almost constant. This temperature was comparable to the experimentally obtained value, 40 °C.

Numerical analysis, compact heat changer, experimental

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Es importante realizar un sinnúmero de acciones encaminadas hacia el uso eficiente de la energía, por ejemplo a nivel doméstico: cambiar el sistema de iluminación, adquirir equipos electrodomésticos más eficientes (tales como: refrigeradores, hornos de microondas, licuadoras, planchas, lavadoras de ropa y trastes, sistemas de aire acondicionado, etc.), utilizar equipos que optimicen el consumo de gas LP o natural tales como estufa y calentador de agua. Es así como se requiere que los fabricantes proporcionen los valores reales de consumo de energía de cada uno de ellos, o bien realizar su evaluación.

En un hogar típico mexicano la energía se utiliza principalmente en dos formas: eléctrica y térmica; ésta última proviene de la combustión del gas LP o natural, y de acuerdo con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (2011), el calentador de agua emplea el 65 % de este tipo de combustible y el restante 35 % lo consume la estufa.

Un calentador de agua de paso del tipo “instantáneo” está formado por dos elementos, una primera sección constituida por un serpentín con aletas en forma de pequeño bloque que comúnmente se denomina cambiador de calor compacto, en el cual los gases calientes pasan por el exterior y el agua circula por el interior de la tubería, la segunda consiste en otro serpentín arrollado a una lámina con tres vueltas como máximo. Los cambiadores de calor compactos se caracterizan por su aplicación en condensadores, radiadores para automotores, aparatos electrónicos de enfriamiento, sistemas de aire acondicionado, recuperadores de calor y otros.

Casi siempre trabajan en condiciones de flujo no permanente uniforme, es decir, tanto las temperaturas y los flujos máxicos de los fluidos son variables en el tiempo y dependen su geometría y de las condiciones de operación de los lugares en los que estén colocados (Shah y Sekulić, 2003). La no uniformidad de la temperatura en este tipo de cambiadores compactos juega un papel muy importante, ya que podría causar cambios súbitos en los fluidos de trabajo, tales como la evaporación o una combinación de flujo entre líquido y vapor, alterando la eficiencia térmica (Fleming, 1967), por ejemplo, la mala distribución de los flujos, principalmente el exterior que corresponde a los gases de combustión afecta considerablemente a la transferencia de calor (Chiou, 1978). Se ha encontrado que comportamientos de este tipo ocasionan hasta un 12 % de pérdida de eficiencia térmica (Chiou, 1982b). La no uniformidad de la temperatura de entrada en los fluidos fue simulada numéricamente primero por Brandemuehl y Banks, (1984); posteriormente por Kou y Yuan (1997), sus resultados se compararon con la solución analítica presentada por Kays y London, (1984); la diferencia fue menor al 3 %. La distribución de temperaturas en cambiadores de calor de flujo cruzado utilizando métodos numéricos la obtuvieron Xuan y Roetzel, (1993) y Roetzel y Xuan, (1999) y sus resultados se compararon con los obtenidos experimentalmente por Chiou, (1978).

El método de diferencias finitas empleado por Ranganayakulu *et al.*, (1999) y Ranganayakulu y Panigrahi, (2001), permitió calcular además la caída de presión en el interior.

La primera simulación con un software de CFD (Computational Fluid Dynamics, por sus siglas en inglés) la realizaron Zhang y Li, (2003); la diferencia con respecto los resultados experimentales de Jiao *et al.*, (2003); fue inferior al 2 %. La utilización de este método de CFD ha permitido obtener soluciones y mejoras de tipo geométrico de algunos diseños de cambiadores de calor compactos, los cuales se han evaluado experimentalmente (Selma *et al.*, 2014). Vijaya y Bengt (2014) simularon el comportamiento de un cambiador con aletas corrugadas, esta geometría incrementó la caída de la presión en un 20 % y la pérdida de calor fue hasta un 15 % mayor, el problema que se presentó fue la no uniformidad del flujo y como consecuencia los valores que se obtuvieron no eran muy confiables (Bahadır *et al.*, 2015).

Tomando en cuenta que el consumo energético en el calentamiento doméstico de agua es elevado este trabajo se enfoca en la simulación del comportamiento de un calentador de agua de paso del tipo instantáneo, con cambiador de calor compacto y los resultados se comparan con los obtenidos experimentalmente. El prototipo evaluado es de una capacidad de 10 L/min y presenta una eficiencia marcada en su placa del 87 %. Este modelo se seleccionó por ser de los más usados en México.

Prototipo experimental

El equipo elegido para realizar la simulación es un calentador de agua de paso tipo instantáneo de 10 L/min de capacidad. Está compuesto de un intercambiador de calor compacto de flujo cruzado que posteriormente se une a un serpentín; en la cámara de combustión hay 13 quemadores.

El dispositivo, que se puede observar en la Figura 1, está totalmente instrumentado, se ubicó en un sistema de recirculación del agua, para evitar el desperdicio del fluido, los elementos de medición y control exteriores son: una motobomba centrífuga con un motor de 370 W de potencia, su función es la proporcionar la cantidad de fluido requerido (4); una válvula de globo para el control del flujo volumétrico (3); dos manómetros tipo Bourdon, para medir la presión a la entrada y salida del dispositivo (2-1); el calentador de agua instantáneo (7); la perilla de control de calentamiento, con suministro de gas L.P. (6); medidor del flujo de gas L.P. (5); una válvula de globo (8); y la tubería de descarga. En el interior se instalaron cuatro termopares tipo K para medir la temperatura en la pared de la tubería del cambiador de calor; el primero se colocó a la entrada del dispositivo, el segundo a la salida del cambiador de calor compacto, de esta manera se puede determinar el incremento de la temperatura en él. El tercer termopar se ubicó a la salida del serpentín, para conocer la temperatura del agua a la salida del calentador. El cuarto termopar mide la temperatura en la pared de la chimenea. Para la medición de la temperatura de los gases de combustión se instalaron tres termopares del tipo bayoneta ubicados a la salida del quemador, a la entrada y a la salida del cambiador de calor compacto.

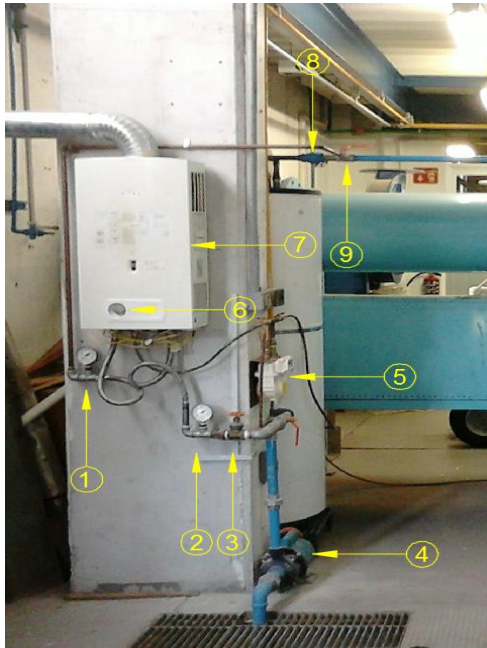


Figura 1 Instalación del prototipo
Fuente: Elaboración propia

La evaluación experimental realizada al prototipo proporcionó los valores iniciales que se utilizan en la simulación, los cuales se resumen en la Tabla 1. Para el sistema de registro de datos se utilizó el software LabView, del cual se ha demostrado su efectividad para este tipo de usos y otros más (Mandujano *et al.*, 2016, Lemus *et al.*, 2016, Silva *et al.*, 2016).

Para la evaluación experimental se utilizó la Norma Oficial Mexicana NOM-020-SEDG-2003 (2003), la cual establece las condiciones mínimas de seguridad, los métodos de prueba a los que deben ser sometidos para garantizar que cumplan con dichas especificaciones, el marcado y la información comercial para los calentadores de agua tipo almacenamiento, de paso de rápida recuperación y de paso tipo instantáneos que utilizan como combustible gas LP o gas natural y que proporcionan únicamente agua caliente con carga térmica no mayor de 108.0 kW.

Los resultados obtenidos experimentalmente, para un flujo de 10 L/min de agua se muestran en la gráfica 1. La temperatura del medio ambiente y la del agua a la entrada del calentador es de 20 °C, a la salida el valor registrado es de 40 °C. El consumo volumétrico de gas L.P. en el tiempo de evaluación (180 s) es de 0.021 m³. La temperatura promedio de los gases de combustión justo a la entrada del cambiador de calor es de 400 °C y a la salida de 320 °C. La presión del agua a la entrada es de 0.70 kPa y 0.32 kPa a la salida.

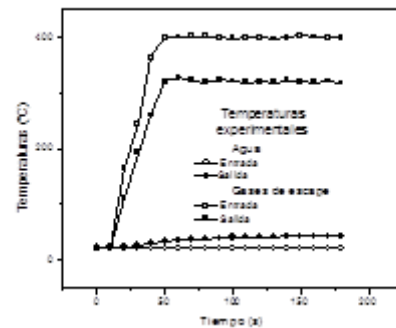


Gráfico 1 Temperaturas obtenidas experimentalmente en el prototipo

Fuente: Elaboración propia

Al aplicar el procedimiento de evaluación recomendado por la norma mencionada, la eficiencia obtenida experimentalmente en el calentador fue del 79 %, la cual está por debajo del valor reportado en la placa, del 87 %. La ecuación utilizada es:

$$\eta = \frac{\text{Energía obtenida por el agua}}{\text{Energía suministrada por el gas}} \quad (1)$$

O sea,

$$\eta = \frac{(\dot{m} C_p \Delta T)_{\text{agua}}}{(\dot{m} C_p \Delta T)_{\text{gas}}} \quad (2)$$

En la cual, η es la eficiencia termodinámica; \dot{m} es el flujo másico; Cp , es la capacidad térmica específica y ΔT .

Modelo empleado

El calentador compacto es de tubería de cobre de 0.012 m de diámetro nominal de 5 pasos, los cuales están sujetos a 72 láminas de cobre que funcionan como aletas, sus dimensiones son de 0.050 m de altura y 0.138 m de largo, la profundidad del cambiador es de 0.248 m, la Figura 2 muestra su esquema. El cambiador de calor tiene tres pasos en la parte inferior y dos en la superior y están al centro de los pasos inferiores, la entrada es por la parte inferior del lado izquierdo y la salida en la parte superior.

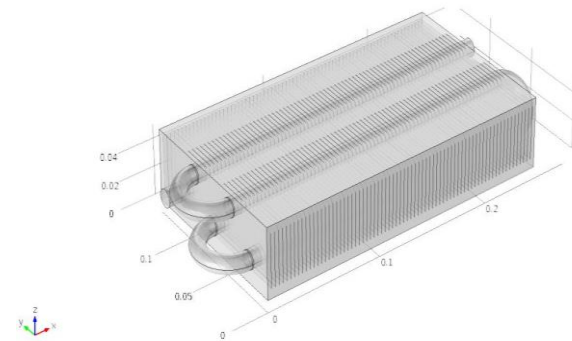


Figura 2 Cambiador de calor compacto

Fuente: Elaboración propia

Modelo numérico

Para la simulación numérica del cambiador de calor compacto, se utilizó el método $\kappa - \varepsilon$, contenido en el software COMSOL Multiphysics. Las ecuaciones diferenciales de conservación del modelo son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uk)}{\partial x} = P - \rho \varepsilon +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial x} = \frac{1}{T} (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 3} E) +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] \quad (4)$$

Donde k , es la energía cinética de la turbulencia; ε , es la tasa de disipación de la energía cinética de la turbulencia; ρ , es la densidad del fluido; t es el tiempo; x , es la coordenada; P , es la producción de turbulencia; μ , es la viscosidad; $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ y $C_{\varepsilon 3}$ son las constantes; E , es la fuente extra; μ_t , es la viscosidad dinámica del remolino; σ_ε , corresponde al coeficiente de difusión. La viscosidad dinámica de la turbulencia está dada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Donde C_μ es la constante del modelo. El valor numérico de estas constantes, obtenidas directamente del programa de simulación de la sección del método $\kappa - \varepsilon$ utilizado son: $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $C_{\varepsilon 3} = 1.03$ y $C_\mu = 0.09$, (CFD Module, 2014). El agua dentro de la tubería presenta un flujo turbulento y para los gases calientes por fuera el flujo es del tipo laminar. La malla que se utilizó en la simulación fue de forma hexaédrica con un total de 58,137 elementos, la Figura 3 muestra su distribución. Se seleccionó este tipo malla porque es el más adecuado para superficies curvas y el error máximo permitido por el software entre dos valores es de 10^{-8} (Strobl *et al.*, 2016, CFD Module, 2014).

Para asegurar que el tamaño de la malla cumple con un error máximo permitido, el software cuenta con una “*función de estimación de error*”, cuya formulación es $(f(i,j)h(j)\beta(i))^\alpha Vol(j)$, donde i es el número de ecuación, j es el número de elemento de malla, h es el tamaño de elemento de malla y Vol es el volumen del elemento de malla. $f(i,j)$ es el valor absoluto de la ecuación i th residual en el elemento de acoplamiento de j th. El indicador de error de elemento de la malla es la suma de estos indicadores de error local sobre el índice de la ecuación i . El error global es la raíz α de la suma de los indicadores de error de elemento de acoplamiento en el acoplamiento elemento índice j . En caso de encontrar algún error el mismo software realiza un refinamiento de malla utilizando la función *meshrefine*, todo este proceso lo hace sin necesidad de salir del proceso de evaluación, (Programming Reference Manual, 2014).

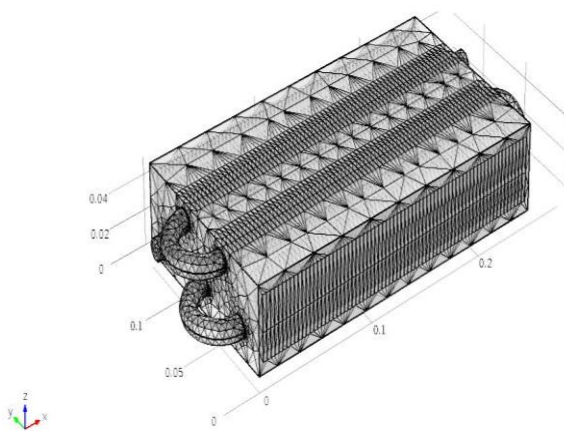


Figura 3 Mallado del cambiador de calor compacto
Fuente: Elaboración propia

Resultados obtenidos

En la Figura 4 se muestra la distribución de la temperatura del agua dentro de la tubería a los primeros 10 segundos de iniciada la simulación, el fluido entra a 20 °C y sale 35.73 °C.

Para el tiempo de 20 s la temperatura del fluido a la salida es de 41.04 °C, esto se observa en la Figura 5. Posteriormente la temperatura presentó una variación muy pequeña, este valor es ligeramente mayor al que se midió experimentalmente de 40.0 °C.

En la Tabla 2 se resumen los valores de la temperatura del agua a la salida del cambiador de calor compacto obtenidos de la simulación realizada en el software. Se observa que su valor aumenta rápidamente durante los primeros 20 s hasta alcanzar los 41.04 °C y después permanece casi constante hasta los 180 s que duró la simulación, el valor máximo alcanzado fue de 41.18 °C, entre los 40 y los 50 s. Con estos valores la eficiencia térmica calcula de forma semejante a la experimental y es casi el 81 %, valor por debajo del reportado en la placa del calentador por el fabricante.

En el Gráfico 2 se muestran los datos obtenidos a través del software con los mismos valores de la Tabla 2. Experimentalmente la temperatura del agua a la salida del calentador fue de 40.0 °C y se obtuvo después de 25 s de iniciada la evaluación, posteriormente ya no se registró alguna variación.

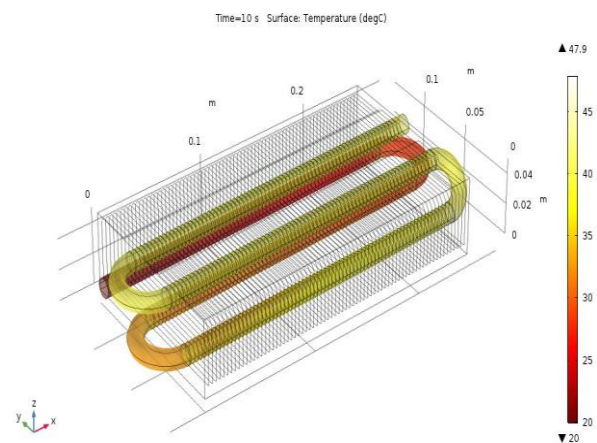


Figura 4 Distribución de temperatura a 10 s de iniciada la simulación

Fuente: Elaboración propia

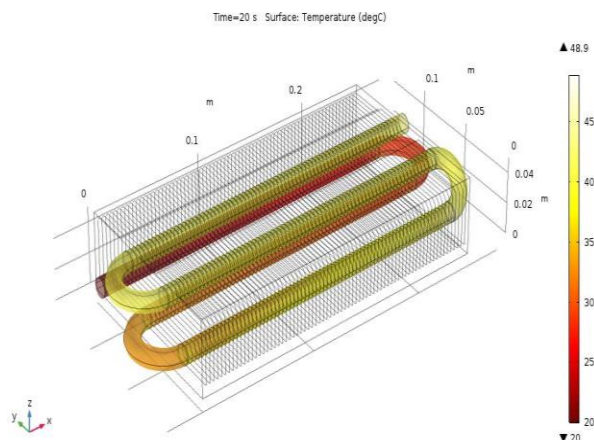


Figura 5 Distribución de temperatura a los 20 s de iniciada la simulación

Fuente: Elaboración propia

En la simulación se consideró que la temperatura de los gases calientes antes de entrar en contacto con el cambiador de calor compacto fue de 400 °C y a la salida su valor fue 105 °C, su velocidad no registró cambio alguno.

Este valor es cercano al que se registró experimentalmente, 98 °C. Empleando la ecuación (2) y con los valores obtenidos de la simulación para el mismo de flujo másico de gas L.P., la eficiencia termodinámica obtenida es del 80.6 %.

Tiempo (s)	Temperatura (°C)
1	20.50
2	25.60
3	30.46
4	33.93
5	35.73
10	40.11
20	41.04
30	41.15
40	41.18
50	41.18
60	41.17
120	41.16
180	41.16

Tabla 2 Valores de temperatura obtenidos por la simulación

Fuente: Elaboración propia

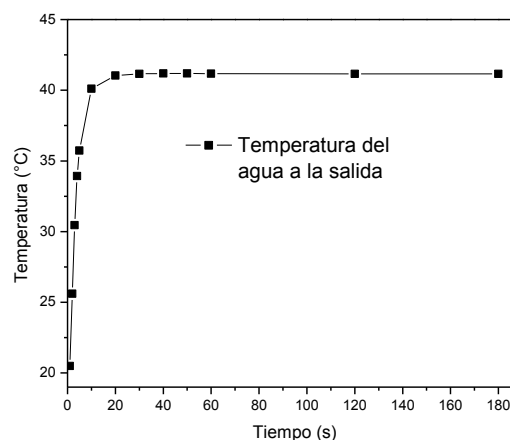


Gráfico 2 Temperatura del agua a la salida del cambiador de calor compacto

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

En este trabajo se analizó numéricamente la transferencia de calor en un cambiador de calor compacto de tubos aletados, empleando el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ para flujo turbulento con un número de Reynolds de 1.44×10^4 , contenido en el software COMSOL Multiphysics.

En la simulación se obtiene la distribución de temperaturas y velocidades tanto para los gases de combustión como para el agua que se utiliza en el proceso. Después de 20 s la temperatura del agua a la salida es de 41.04 °C la cual se mantiene casi constante. El valor que se obtuvo experimentalmente fue de 40.0 °C. Los gases calientes entran al calentador y la simulación arrojó un valor de salida de 105 °C, muy cercano a la temperatura registrada experimentalmente, de 98 °C. La eficiencia del calentador obtenida con la temperatura de la simulación es de casi el 81 %, la cual está por debajo de la reportada por el fabricante en la placa del mismo (87 %).

Referencias

- Bahadır D., Özge A., Nihal U., Mert T., Tugba S., L. y Berrin E. (2015). An experimental comparison of two multi-louvered fin heat exchangers with different numbers of fin rows. *Appl. Therm Eng*, 91, p 270-278.
- Brandemuehl M.J, y Banks P.J. (1984). Rotary heat exchangers with time varying or non-uniform inlet temperatures. *J Heat Transf*, 106, p 750–758.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (2011). <http://www.conuee.gob.mx>.
- Chiou J.P. (1978). Thermal performance deterioration in crossflow heat exchanger due to the flow nonuniformity. *J Heat Transf*, 100, p 580–587.
- Chiou J.P. (1982). The effect of non-uniformity of inlet fluid temperature on the thermal performance of cross flow heat exchanger. En: *Proceedings of the Seventh International Heat Transfer Conference, Heat Transfer*. p 179–184.
- Chiou J.P. (1982b). The effect of non-uniformities of inlet temperatures of both fluids on the thermal performance of across flow heat exchanger. *ASME, (WA/HT-42)*.
- CFD Module. (2014). User's guide. COMSOL Multiphysics.
- Programming Reference Manual. (2014) COMSOL Multiphysics
- Fleming R.B. (1967). The effect of flow distribution in parallel channels of counter-flow heat exchangers. *Adv Cryog Eng*, 12, p 352–357.
- Jiao A., Zhang R., y Jeong S. (2003). Experimental investigation of header configuration on flow maldistribution in plate-fin heat exchanger. *Appl Therm Eng*, 23, p 1235–1246.
- Kays W.M., y London A.L. (1984). *Compact heat exchangers*. McGraw-Hill. New York
- Kou H.S., y Yuan P. (1997). Thermal performance of crossflow heat exchanger with non-uniform inlet temperatures. *Int Commun Heat Mass Transf*, 24, p 357–370.
- Lemus H. J., Monter A. S., y Castañeda O. F. (2016). Caracterización de un colector solar de tubos evacuados y de flujo continuo para aplicaciones industriales. *Revista de Sistemas Experimentales*. 3, 9, p 88-97.
- Madujano V. C., Velázquez T. S., Escobar G. E., y Rios R. C. (2016). Diseño de un sistema de secado con aprovechamiento de calor en la producción de tejas, utilizando lógica difusa apoyada con LabVIEW. *Revista de Sistemas Experimentales*. 3, 9, p 29-36.

NOM-020-SEDG-2003, N. O. (2003). Norma Oficial Mexicana. Calentadores para agua que utilizan como combustible gas l.p. o natural, de uso doméstico y comercial. requisitos de seguridad, metodos de prueba y marcado.

Ranganayakulu Ch., Seetharamu K.N., y Sreevastan K.V. (1997). The effects of inlet fluid flow nonuniformity on thermal performance and pressure drops in crossflow plate-fin compact heat exchangers. *Int J Heat Mass Transf*, 40, p 27–38.

Ranganayakulu Ch., y Panigrahi A. (2001). Influence of header design on pressure drop and thermal performance of a compact heat exchanger. En: *Proceedings of the 3rd International Conf. On Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for Process Industries*, Davos, Switzerland, p 251–258.

Revista del Consumidor. (2011). Noviembre, México. p 48-65.

Roetzel W., y Xuan Y. (1999). *Dynamic behavior of heat exchangers*. Computational Mechanics Publications. Boston, WIT Press.

Selma B. S., Caroline G., Jean-Francois F., Patrice C., y Jean-Pierre L. (2014). CFD and experimental investigation of the gas–liquid flow in the distributor of a compact heat exchanger. *Chem Eng Res Des*, 92, p 2361–2370.

Shah R.K., y Sekulić D.P. (2003). *Fundamentals of heat exchanger design*. John Wiley & Sons. New York.

Silva J. A., Salazar P. M., Ponce M. J., y Herrera S. G. (2016). Instrumento virtual para diagnosticar y corregir desbalance de maquinaria rotativa. *Revista de Tecnología e Innovación*. 3, 7, p 73-81.

Strobla S., Formellab A., y Pöschel T. (2016). Exact calculation of the overlap volume of spheres and mesh elements. *J. of Comput. Phys.* 311, p 158–172.

Vijaya s. G. y Bengt S. (2014). CFD Simulation of Heat Transfer and Pressure Drop in Compact Brazed Plate Heat Exchangers. *Heat Transf Eng*, 35(4), p 358–366.

Xuan Y., y Roetzel W. (1993). Dynamics of shell and tube heat exchangers to arbitrary temperature and step flow variations. *AIChEJ*, 39, 3, p 413–421.

Zhang Z., Li Y.Z. (2003). CFD Simulation on inlet configuration of plate-fin heat exchanger. *Cryogenics*; 43, p 673–678.

Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango

GONZÁLEZ, Mario Humberto[†], RODRÍGUEZ-MUÑOZ, Norma Alejandra*, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio

Cátedras CONACYT en Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Calle CIMAV # 110 Ejido Arroyo Seco. Durango, Dgo. 34147, México

'Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. - Departamento de Ingeniería sustentable. Calle CIMAV # 110 Ejido Arroyo Seco. CP. 34147. Durango, Dgo. México

Recibido 7 de Enero, 2017; Aceptado 16 de Marzo, 2017

Resumen

La agricultura protegida ha tenido un gran avance en México y el mundo debido a las ventajas que presenta en comparación al cultivo tradicional. Algunos beneficios que se obtienen con este tipo de cultivo son uso eficiente del agua, mayor rendimiento por unidad de área y control ambiental. Dependiendo del cultivo y región climática, se puede llegar a requerir una gran cantidad de energía para mantener las condiciones internas. El uso adicional de energía es consecuencia de la incorporación de sistemas de climatización requeridos para mantener los rangos de temperatura óptimos. La región norte de México recibe una gran cantidad de irradiación solar (Durango, Dgo. 2049 kWh/m² anual, Meteororm V7.1.11.24422) que puede llegar a satisfacer las necesidades energéticas de un invernadero. El presente trabajo propone un diseño de invernadero asistido con energía solar para el cultivo de tomate en la ciudad de Durango, México. Se presentan resultados de simulaciones por medio del software de simulación dinámica TRNSYS, con el cual se cuantifica el requerimiento energético de un invernadero que utiliza sistemas de bajo consumo energético y solares. A partir de esta simulación se pretende tener un modelo de invernadero solar que sirva de guía para futuros proyectos en la región.

Invernadero, Simulación dinámica, Energía Renovable, TRNSYS, Energía Solar Térmica

Abstract

Protected agriculture has had an important breakthrough worldwide and in Mexico, this due to the advantages that offers in comparison to the traditional methods. Some of its benefits are the efficient use of water resources, better yield per unit area and environmental control. Depending on the crop and the climatic zone, a large amount of energy could be required to maintain the internal optimum conditions. The additional use of energy is due to the incorporation of heating and air conditioning systems in order to maintain the optimum temperature range. The northern region of Mexico receives a great amount of solar irradiation (Durango City, MX. 2049 kWh/m² annually, Meteororm V7.1.11.24422) that can satisfy the energetic needs of a greenhouse. In the present work a design of a greenhouse assisted with solar energy is proposed. The greenhouse grows tomatoes in the City of Durango, MX. The software TRNSYS was used to perform the dynamic simulations. The results are used to quantify the energy requirement of a greenhouse that incorporates solar and low energy consumption equipment. The intention of this simulation is to have a solar greenhouse model that can be used as a guideline for future projects within the region.

Greenhouse, Dynamic Simulation, Renewable Energy, TRNSYS, Solar Heating

Citación: GONZÁLEZ, Mario Humberto, RODRÍGUEZ-MUÑOZ, Norma Alejandra, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio. Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-1:33-45

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: norma.rodriguez@cimav.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La agricultura protegida (AP) se entiende como el cultivo de plantas, para distintos fines, bajo alguna estructura con el fin de proteger el cultivo de condiciones ambientales adversas, aumentar el rendimiento, hacer uso eficiente del agua y/o obtener productos de mayor calidad (Castilla, 2007).

El sector de la AP ha tenido un gran crecimiento en los últimos años. A nivel mundial, Ponce et al. menciona que a final del siglo pasado había más de 315 mil ha de invernaderos (Ponce, Molina, Cepeda, Lugo, & MacCleery, 2014), mientras que la FAO indica un estimado de 405 mil ha (Papasolomontos et al., 2013).

En 1999, en México, se reporta un total 750 ha (Nieves Garcia, Van der Valk, & Elings, 2011), y para 2016, el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) reporta un total de 25 mil ha (SIAP, 2016).

Estos datos hacen evidente un crecimiento notable en el sector de la AP, en especial en los invernaderos, con los cuales se obtienen mayores rendimientos, en comparación al cultivo tradicional a cielo abierto. Esta información se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

El invernadero es definido por la NMX-E-255-CNCP-2013 como una construcción agrícola de estructura metálica, usada para el cultivo y/o protección de plantas, con cubierta de película plástica traslúcida que no permite el paso de la lluvia al interior y que tiene por objetivo reproducir o simular las condiciones climáticas más adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas establecidas en su interior, con cierta independencia del medio exterior y cuyas dimensiones posibilitan el trabajo de las personas en el interior (CNCP, 2013).

Entre las múltiples ventajas de usar invernaderos para producción de cultivos, en comparación al cultivo convencional, se acortan: producción de cultivo fuera de temporada, eficiencia del uso de agua, mayor rendimiento por unidad de área, protección del cultivo ante las condiciones ambientales (viento, lluvia, temperaturas extremas), mayor calidad de productos, control de plagas y enfermedades del cultivo, entre otras (Nieves Garcia et al., 2011; Reddy, 2016; von Zabeltitz, 2011).

Entre sus desventajas se encuentran el alto costo de inversión inicial, los altos costos de operación y el requerir capacitación o conocimiento de su uso para que el proyecto tenga buenos resultados (Nieves Garcia et al., 2011; PESA México, 2007; SIAP, 2016).

Nivel de tecnología	Rendimiento (ton/ha)
Cielo abierto	40
Campo abierto con fertirrigación	120
Casa sombra	160
Invernadero de mediana tecnología	350
Invernadero con alta tecnología	500

Tabla 1 Rendimientos por hectárea de tomate

Fuente: Gaxiola Carrasco, 2010

El alto costo de operación se debe principalmente al uso adicional de energía para climatizar el interior del invernadero, en comparación al cultivo a cielo abierto tradicional (Moreno Reséndez, Aguilar Durón, & Luévano González, 2011). En lugares como la Ciudad de Durango, con un clima Bs en la clasificación Köppen, se presentan temperaturas altas como bajas a lo largo del año, tal como se muestra en la

Gráfico 1. Es por esto que es necesario desarrollar alternativas a los sistemas de climatización tradicionales.

En el presente trabajo se propone la utilización de un sistema de calefacción incorporando energía solar para reducir el consumo de energía, esquematizado en el

Gráfico 1.

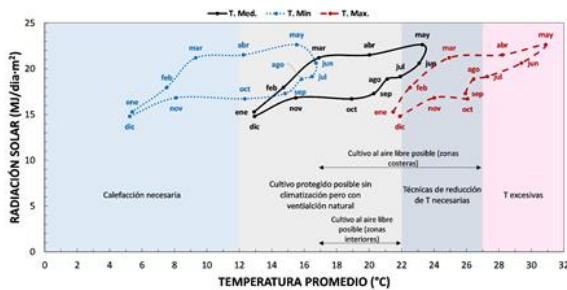


Gráfico 1 Radiación solar contra temperatura del aire para la ciudad de Durango

Fuente: Meteonorm V7.1.11.24422. Adaptada de Nisen et al., 1988

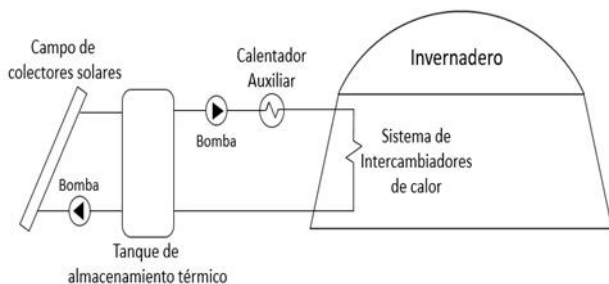


Figura 1 Sistema de calefacción solar asistido propuesto

La simulación se realizó con el software de simulación dinámica TRNSYS 17.

Este software permite la utilización de sistemas de una manera modular, incluyendo la información climática del lugar indicado, por medio del uso del Año Típico Meteorológico (TMY por sus siglas en inglés) y modelando de manera paramétrica, lo cual permite evaluar el comportamiento de sistemas en diferentes escenarios.

En la sección de metodología se muestran a detalle los componentes utilizados en la simulación. En la sección de resultados se presentan y discuten los mismos, los cuales fueron obtenidos de las simulaciones. Por último se muestran las conclusiones y recomendaciones.

Metodología

Localización

La simulación se realizó con datos de la ciudad de Durango, Durango (24° 1' 22" N, 104° 39' 16" W) la cual se encuentra a 1890 msnm (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Los datos climáticos se obtuvieron de Meteonorm V7.1.11.24422 en el formato de TMY.

Invernadero

El invernadero simulado es de tipo túnel sencillo de 180 m² de área total, con orientación E-O, altura total de 3.2 m, altura a la canaleta de 2.5 m y 10 m de ancho. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el modelo en tercera dimensión, el cual se realizó con el software de diseño Sketchup 8, que incluye el complemento Trnsys3d. Este complemento permite exportar el modelo en un formato que pueda ser usado en TRNBuild. TRNBuild es un subprograma de TRNSYS donde se definen las propiedades estructurales y térmicas del invernadero. Las características principales del invernadero se presentan.

GONZÁLEZ, Mario Humberto, RODRÍGUEZ-MUÑOZ, Norma Alejandra, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio. Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango. Revista de Innovación Sistemática 2017

La capacitancia térmica indica la cantidad de energía térmica que puede ser almacenada dentro de la edificación (Antonopoulos & Koronaki, 1998), se calcula mediante la ecuación 1.

$$C = m \cdot c_p \quad (1)$$

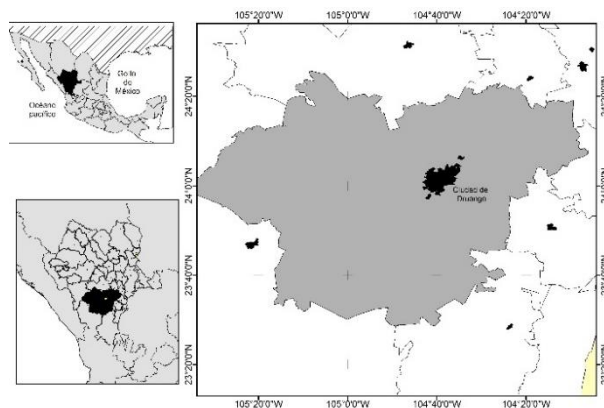


Figura 2 Localización de la ciudad de Durango

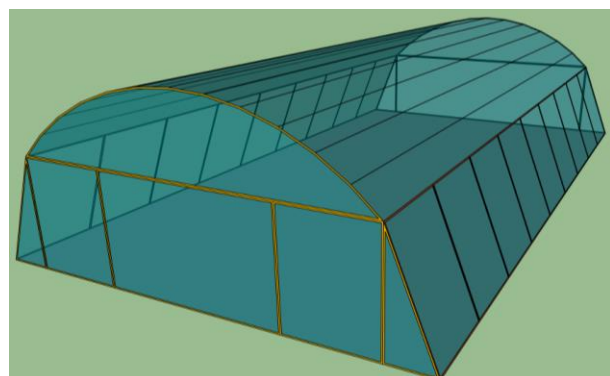


Figura 3 Modelo 3D del invernadero simulado

Superficie de suelo cubierta (m ²)	180
Superficie de cubierta plástica (m ²)	321.19
Volumen total de invernadero (m ³)	572.62
Capacitancia térmica (kJ/K)	27824

Tabla 2 Características del invernadero simulado

Donde C es la capacitancia térmica, m es la masa de la sustancia, y c_p es el calor específico de la misma. Para el cálculo se contabiliza la masa de la estructura del invernadero, del aire contenido dentro del mismo y del cultivo de tomate, el cual se espera tenga un rendimiento de 40 kg/m².

Se realizaron las simulaciones usando dos tipos de cubiertas plásticas, policarbonato (PC) y polietileno de baja densidad (PEBD), las propiedades de estos materiales se encuentran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Propiedades del material	Unidades	PC	PEBD
Conductividad térmica, k	W/m·K	0.19	0.45
Espesor	mm	4	0.18
Densidad, ρ	kg/m ³	0.18	0.91
Transmisividad solar, τ_{sol}	-	0.78	0.88
Reflectividad solar, ρ_{sol}	-	0.14	0.09
Transmisividad visible, τ_{vis}	-	0.75	0.89
Reflectividad visible, ρ_{vis}	-	0.15	0.1
Transmisividad IR, τ_{ir}	-	0.02	0.53
Reflectividad IR, ρ_{ir}	-	0.09	0.07
Coef. de pérdidas de calor, U	W/m ² ·°C	5.38	6.831
SHGC	-	0.802	0.884

Tabla 3 Propiedades de las cubiertas plásticas simuladas. Fuente: Valera, Molina, & Álvarez, 2008; U y $SHGC$ calculados con Window 7.4

Simulación

Como se indicó anteriormente, para la simulación se empleó el software TRNSYS 17, el cual ha sido muy utilizado para simular el desempeño de sistemas térmicos.

El programa fue desarrollado por la Universidad de Wisconsin en Estados Unidos, y por su sistema modular, permite construir sistemas a gran detalle y con buena precisión (Almeida, Carvalho, Amorim, Mendes, & Lopes, 2014; Sibbitt et al., 2012). Dichos módulos, dentro del entorno de TRNSYS son llamados “types” en los cuales el usuario alimenta información que luego es utilizada por el programa para realizar la simulación.

Types de TRNSYS

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el sistema simulado en TRNSYS, en el que cada ícono representa un “type” en el que se carga información y se generan conexiones con otros types. A continuación se describen los principales.

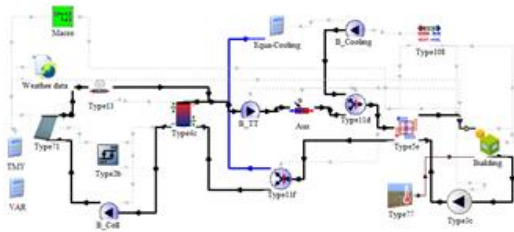


Figura 4 Simulación en TRNSYS del sistema de climatización para el invernadero

Invernadero (Type 56)

Este componente modela el comportamiento de una edificación de múltiples zonas térmicas, en este caso, el invernadero comprende una sola zona térmica. El type lee la descripción del invernadero de distintos archivos externos generados por TRNBuild, donde se describen las características del invernadero.

Temperatura del suelo (Type 77)

Calcula el cambio de temperatura del suelo a lo largo del periodo de simulación a partir de las características del mismo, previamente indicadas en el componente. Esta temperatura es enviada al type 56 del invernadero

Datos climáticos (Type 15-2)

A partir de los datos del archivo TMY obtenido de Meteonorm, este type es capaz de generar el clima de la zona seleccionada a pasos de tiempo establecidos, incluyendo, entre otras variables, la temperatura ambiente, la humedad y radiación solar. En el caso del presente trabajo, el clima se generó cada hora.

Colector solar (Type 71)

Se utilizó un colector solar de tubos evacuados, modelado con curva de eficiencia cuadrática. Las características de este colector son las de un modelo que se comercializa en México. Cada colector tiene un área total de 4.397 m². Los colectores fueron probados a una tasa de flujo de 0.02 kg/s·m² y se simularon con una inclinación de 24°. La ecuación 2 describe la eficiencia térmica del colector solar.

$$\eta = 0.437 - 0.9585 \frac{T_i - T_a}{G} - 0.0073 \frac{(T_i - T_a)^2}{G} \quad (2)$$

Donde η es la eficiencia térmica del colector solar, T_i es la temperatura del agua a la entrada del colector, T_a es la temperatura ambiente y G es la radiación solar incidente sobre el colector. Estos datos son obtenidos a partir de la ficha de certificación de la SRCC (Solar Rating & Certification Corporation, 2017).

Válvula de alivio (Type 13)

Este modelo monitorea la temperatura del agua en la parte superior del tanque de almacenamiento y permite la liberación de energía al superarse el punto de ebullición del fluido.

Tanque de almacenamiento estratificado (Type 4c)

El tanque de almacenamiento o termotanque cuenta con dos salidas y dos entradas de agua. Recibe agua caliente por la parte superior, proveniente del circuito de colectores solares, y sale agua por la parte inferior, a más baja temperatura, hacia el mismo circuito. Este funcionamiento está accionado por un controlador diferencial con histéresis que monitorea ambas temperaturas (superior e inferior) en el tanque. Este se activa cuando hay una diferencia de 10 °C y se desactiva hasta que la diferencia es menor a 1°C. Por el otro lado, el agua caliente sale por la parte superior hacia el circuito del intercambiador de calor, para aprovechar el agua más caliente en el almacenamiento, y el agua a la salida del intercambiador regresa a la parte inferior. El volumen del tanque es de 60 L por cada metro cuadrado de área total del campo de colectores solares.

Calentamiento auxiliar (Type 6)

El calentador auxiliar mantiene el agua del tanque de almacenamiento a 60°C, se activa cuando el agua proveniente del circuito de los colectores no alcanza esa temperatura.

Intercambiador de calor (Type 5e)

Es un intercambiador de calor agua-aire, de flujos cruzados sin mezclar. A este type se le proporciona el valor del producto UA de 400 W/K, obtenido de un intercambiador comercial, con el flujo de agua y aire especificados por el fabricante. De esta manera, el type calcula la efectividad del intercambiador.

Bombas de velocidad constante (Type 3d)

Son las bombas que hacen circular el agua en distintas partes del sistema.

Ventilador (Type 3c)

Se encarga de hacer fluir aire por el intercambiador de calor agua-aire, el aire es tomado del interior del invernadero.

Termostato (Type 108)

Es el controlador del sistema de climatización. Monitorea la temperatura del aire al interior del invernadero y activa el circuito de enfriamiento cuando la temperatura alcanza 29°C, o de calefacción cuando la temperatura es de 16°C.

Circuito de enfriamiento

En esta parte del sistema, no se simula algún equipo comercial en específico. Se compone de una bomba de agua, la cual tiene una temperatura de salida de 2°C. Una vez que pasa por el intercambiador, la temperatura de salida de éste es sensada y se procede a calcular la energía requerida para que alcance nuevamente los 2°C mediante la ecuación 3.

$$Q_{enf} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{i_{HX}} - T_{o_{HX}}) \quad (3)$$

Donde Q_{enf} es la energía requerida para enfriar el agua, \dot{m} es el flujo másico del agua, c_p es el calor específico del agua (4.19 kJ/kg·°C), T_{iHX} y T_{oHX} son la temperatura del agua de entrada (2°C) y salida del intercambiador de calor, respectivamente.

Fracción Solar

La fracción solar es la proporción de energía suministrada por el campo de colectores solares en relación al total de energía demandada para el calentamiento del agua, y se calcula mediante la ecuación 4 descrita por Duffie y Beckman (Duffie & Beckman, 2013) mostrada a continuación:

$$FS = \frac{Q_{total} - Q_{aux}}{Q_{total}} \quad (4)$$

Donde FS es la fracción solar calculada, Q_{total} es el total de energía demandada (solar y auxiliar), y Q_{aux} es la energía suministrada por el calentador auxiliar.

Procesamiento de datos

Los resultados se procesaron y analizaron por medio de Microsoft Excel, con el que se generaron las gráficas presentadas en la siguiente sección.

Resultados

Comportamiento térmico del invernadero sin climatización

Se realizaron simulaciones a lo largo de un año (8760 h) con los dos tipos de cubiertas plásticas para conocer la temperatura al interior del invernadero. En el

Gráfico 2 se muestran los resultados de estas simulaciones así como la temperatura ambiente a lo largo del año.

Para visualizar el comportamiento de una manera más clara, en los

Gráfico 3 se presenta el comportamiento con ambos tipos de cubierta, para periodos del mes de enero y mayo, respectivamente. Estos períodos se eligieron por haber presentado la temperatura más baja y más alta en el año. En ambos gráficos, la franja de color gris representa el rango de temperaturas deseadas al interior del invernadero.

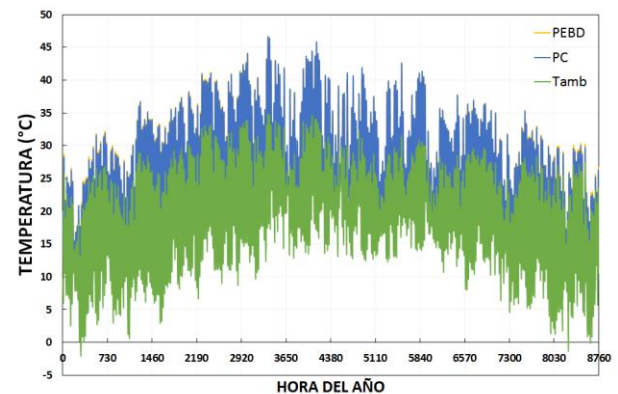


Gráfico 2 Temperatura horaria a lo largo el año en el interior y exterior del invernadero sin climatizar para ambos tipos de cubierta

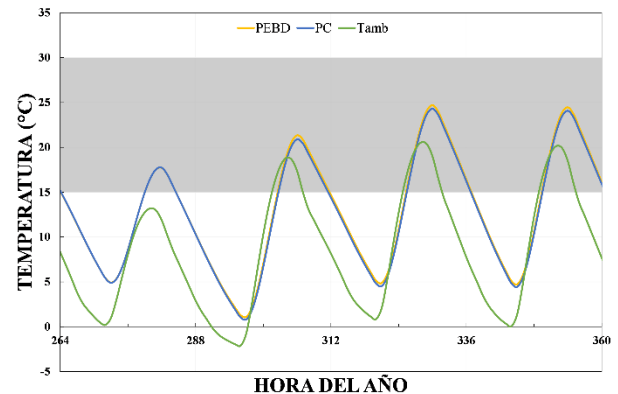


Gráfico 3 Temperatura en el interior y exterior del invernadero sin climatizar, para el período del 12-15 de enero

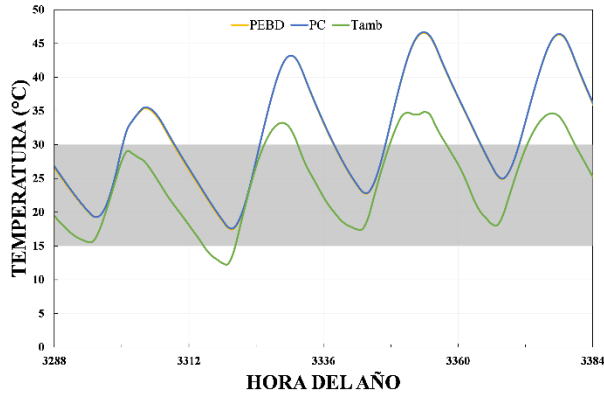


Gráfico 4 Temperatura en el interior y exterior del invernadero sin climatizar, para el período del 18-21 de mayo

La temperatura más baja, registrada al interior del invernadero con cubierta de PEBD, fue de 1.11 °C, mientras que con la cubierta de PC fue de 0.83°C, presentándose en ambos casos el 13 de enero a las 9:00. La temperatura más alta se presentó el día 20 de mayo a las 18:00, igualmente en ambos casos, con un valor de 46.56 °C, con cubierta de PEBD, y de 46.67 °C, con cubierta de PC.

Consumo base de energía

Se realizó una simulación a lo largo de un año (8760 h) para conocer el consumo energético para climatizar el invernadero, sin colectores solares instalados para la calefacción. En los Gráfico 5 se muestra el consumo con ambos materiales de cubierta (PC y PEBD).

Es notable la diferencia entre el consumo de energía para calefacción con cubierta de PC Y PEBD. En ambos casos, los meses de enero y diciembre son los de mayor demanda de calefacción. Para el invernadero con PEBD, en diciembre se requirieron 1629 MJ, y con PC 58615 MJ.

El consumo anual de calefacción con PEBD es de 65,379 MJ, y con PC es de 227,609 MJ, el cual es más de tres veces el del PEBD.

En el requerimiento energético para el enfriamiento del invernadero abril, mayo y junio son los meses de mayor demanda. Para mayo fueron requeridos 17,923 y 17,600 MJ, con cubierta de PEBD y PC, respectivamente.

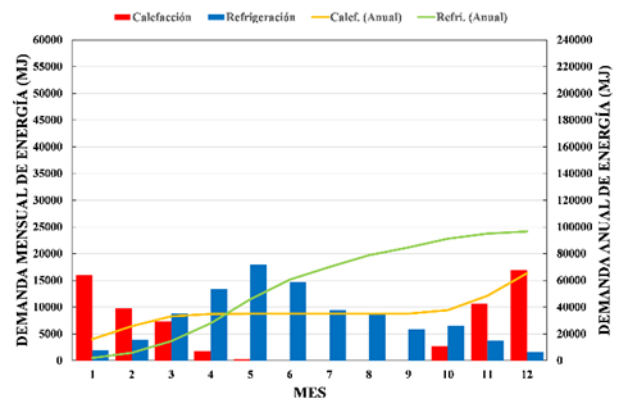


Gráfico 5 Consumo de energía para climatización del invernadero, para PEBD. Las líneas indican el consumo acumulado de energía a lo largo del año

Se observa que a pesar de que la temperatura ambiente está cercana o debajo de los 0°C, el invernadero se mantiene por encima de los 15°C para el período del 12 al 15 enero, mientras que en el período del 18 al 21 de mayo, la temperatura ambiente supera los 34°C, y el interior del invernadero se mantiene por debajo de los 30°C la mayor parte del período, presentando algunos picos que no superan los 31°C.

El consumo anual es similar para ambas cubiertas. Con PEBD es de 96,626 MJ, y con PC es de 95,643 MJ.

Comportamiento térmico del invernadero con climatización

Al incorporar el sistema de climatización, la temperatura al interior del invernadero permanece dentro del rango deseado la mayor parte del año.

En el Gráfico 7 se muestra la temperatura ambiente y al interior del invernadero con ambos tipos de cubiertas, y en los Gráfico 8 se grafican los períodos críticos del año con el invernadero climatizado.

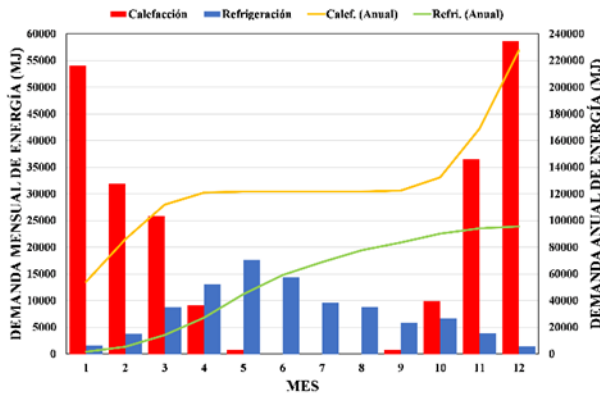


Gráfico 6 Consumo de energía para climatización del invernadero para PC. Las líneas indican el consumo acumulado de energía a lo largo del año

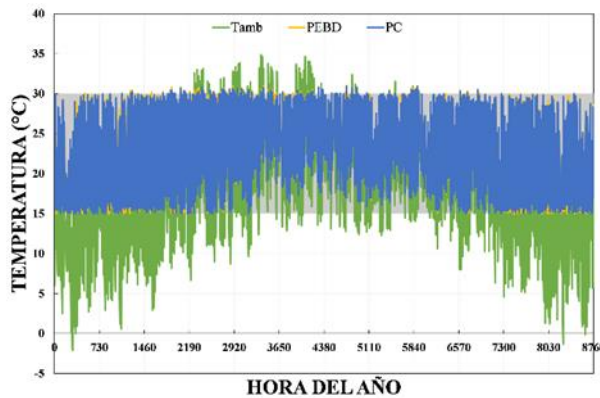


Gráfico 7 Temperatura horaria a lo largo el año en el interior y exterior del invernadero climatizado para ambos tipos de cubierta

Fracción solar

Generalmente los sistemas solares son diseñados para obtener una fracción solar mínima (Escobedo Bretado & Martín-Domínguez, 2016), en el sistema propuesto se busca obtener una FS de al menos 0.60, la cual se alcanza con 8 colectores (FS=0.632), ya que con 7 colectores, aún no se cumple con este valor mínimo propuesto (FS=0.589). El comportamiento de la FS es muy similar sin importar el tipo de cubierta, lo cual se ilustra en el Gráfico 10.

Energía consumida para climatización de invernadero

Una vez definido el número de colectores, se comparó el consumo base de energía con el consumo después de incorporar el sistema de colectores solares, lo cual se puede observar en el

Gráfico 11. El requerimiento energético para enfriar el agua en el circuito de enfriamiento es de 95.64 GJ y 96.63 GJ, para PC y PEBD, respectivamente, sin importar si está o no instalado el sistema solar. Para la calefacción, con la cubierta de PC es muy notoria la disminución del consumo. Cuando no hay colectores instalados, se requieren 227.6 GJ en el año, y con el sistema solar en funcionamiento, el consumo anual se reduce a 52.35 GJ. Para el invernadero con cubierta de PEBD, cuando no hay colectores solares en funcionamiento, el consumo es de 65.38 GJ, y de 51.94 GJ con los colectores funcionando.

Energía liberada por la válvula de alivio

Se contabilizó la energía liberada por la válvula de alivio a lo largo del año, esta energía se puede considerar como no aprovechada. En el Gráfico 12 se muestra la energía liberada por

mes y acumulada a lo largo del año, para el invernadero con cubierta de PC y PEBD.

En el período de primavera y verano es cuando se observa un mayor rechazo de energía, ocasionado principalmente por el estancamiento del agua en el circuito solar.

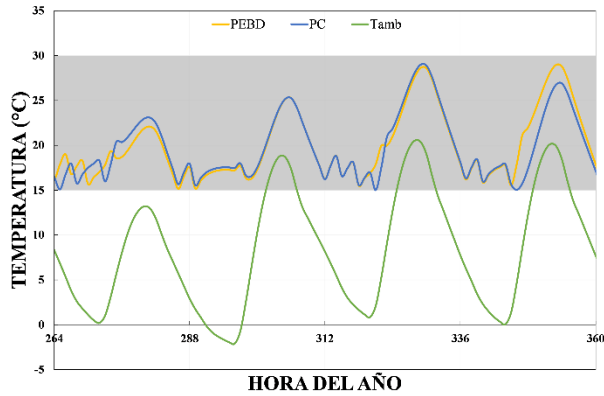


Gráfico 8 Temperatura en el interior y exterior del invernadero con climatización, para el período del 12-15 de enero

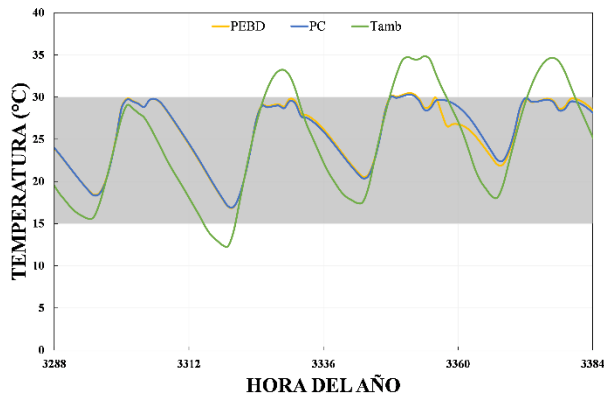


Gráfico 9 Temperatura en el interior y exterior del invernadero con climatización, para el período del 18-21 de mayo

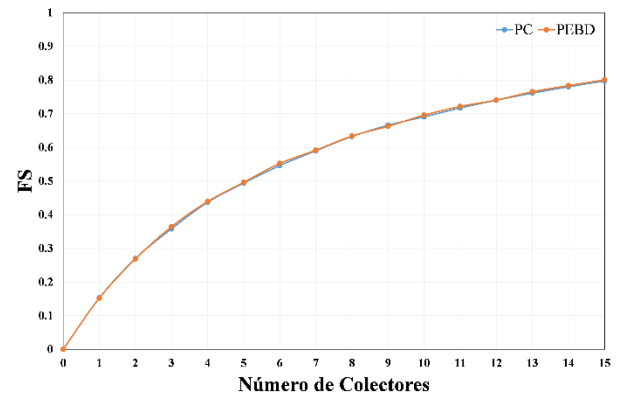


Gráfico 10 Cambio de la fracción solar (FS) con respecto al número de colectores solares instalados

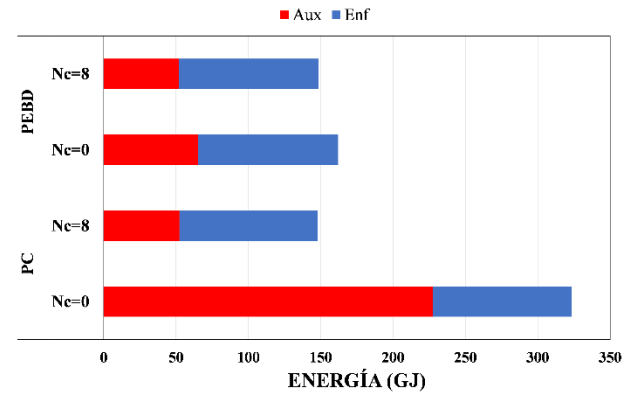


Gráfico 11 Comparación del requerimiento energético anual para climatización del invernadero, evaluando ambas cubiertas. Nc representa el número de colectores instalados

Sistema de climatización propuesto

Con base a los resultados obtenidos, en la Tabla 4 se muestran las características del sistema de climatización para el invernadero.

Las capacidades mínimas del calentador auxiliar y del sistema de enfriamiento se determinaron luego de analizar los picos de demanda de la simulación con 8 colectores solares, y se comprobó con otra simulación, con estas capacidades, si se cumplían los rangos de temperatura deseados.

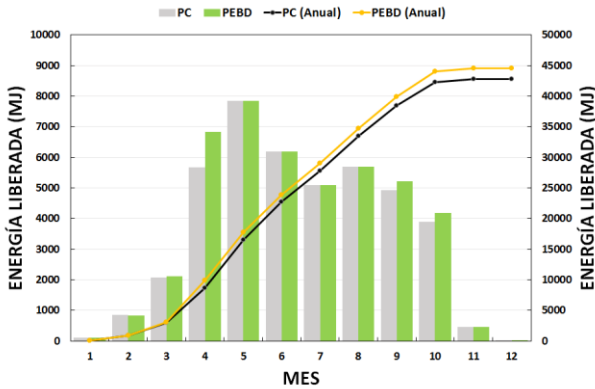


Gráfico 12 Energía liberada por la válvula de alivio, de manera mensual y acumulada a lo largo del año

Característica	Cant.	Unidad
Colectores solares	8	-
Intercambiadores de calor	5	-
Capacidad min. calentador aux.	62	kW
Capacidad min. sistema de enf.	40.7	kW

Tabla 4 Características del sistema de climatización propuesto

Conclusiones

Se analizó el comportamiento de un invernadero de túnel sencillo, de 180 m², con un sistema de calefacción asistido con energía solar, evaluando dos cubiertas plásticas mediante el uso de un software de simulación dinámica en la ciudad de Durango, Durango.

El uso de estos programas de simulación, provee información valiosa para el diseño y optimización de sistemas térmicos.

La temperatura interior del invernadero sin climatizar, no se mantiene dentro del rango óptimo necesario para el cultivo, por lo que es necesario utilizar sistemas de climatización a lo largo del año. La incorporación de sistemas solares para climatizar invernaderos supone un ahorro en el consumo de energía destinada a la calefacción, en la ciudad de Durango. En el caso del invernadero con cubierta de policarbonato, el ahorro de energía para la calefacción es significativo en comparación al de polietileno de baja densidad.

La diferencia en el requerimiento energético anual debido al cambio de cubiertas plásticas es muy poca, menor al 1%, de ambas cubiertas, la que menor energía requiere es la de PC, la cubierta de PEBD es la que menor cantidad de energía requiere para calefacción, caso contrario en la energía requerida para enfriamiento. Por lo que es necesario realizar un análisis económico para elegir la cubierta apropiada y la configuración del sistema completo de climatización que mejores beneficios económicos otorgue.

La energía requerida para el enfriamiento del invernadero es solo un parámetro que indica la cantidad de energía que es necesaria extraer al agua utilizada en el circuito de enfriamiento, para evaluar algún equipo comercial, es necesario tomar en cuenta la eficiencia del mismo, entre otras características.

La energía liberada por la válvula de alivio podría ser utilizada en algún otro proceso, o se podría almacenar sobre todo en los periodos donde el calentador auxiliar no es requerido para su posterior uso en meses de alta carga por calefacción.

GONZÁLEZ, Mario Humberto, RODRÍGUEZ-MUÑOZ, Norma Alejandra, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio. Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango. Revista de Innovación Sistemática 2017

Agradecimiento

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol), a través del Proyecto:

P13 “Laboratorios de pruebas para baja y media temperatura, laboratorio para el diseño e integración de sistemas termo solares asistido por computadora”

Pertenece a la Convocatoria 2013-02, del:
Fondo SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA.

Para el desarrollo y presentación de éste trabajo.

Referencias

Almeida, P., Carvalho, M. J., Amorim, R., Mendes, J. F., & Lopes, V. (2014). Dynamic testing of systems - Use of TRNSYS as an approach for parameter identification. *Solar Energy*, 104, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.010>

Antonopoulos, K. A., & Koronaki, E. (1998). Apparent and effective thermal capacitance of buildings. *Energy*, 23(3), 183–192. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(97\)00088-1](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(97)00088-1)

Castilla, N. (2007). *Invernaderos de plástico: tecnología y manejo*. Mundi-Prensa Libros.
CNCP. (2013). NORMA MEXICANA INVERNADEROS DE CUBIERTAS PLÁSTICAS - DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN - ESPECIFICACIONES. Naucalpan de Juárez, México: Diario Oficial de la Federación.

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley.

Escobedo Bretado, J., & Martín-Domínguez, I. (2016). Determinación del requerimiento energético para calefacción en un invernadero agrícola y dimensionamiento del sistema Termosolar-Gas L . P . requerido para su suministro óptimo. *Revista de Aplicaciones de La Ingeniería*, 3(9), 150–159.

Gaxiola Carrasco, H. (2010). Importancia de Sinaloa y México en la agricultura protegida. *Revista Ciencia Y Universidad*, 29, 69.

Moreno Reséndez, A., Aguilar Durón, J., & Luévano González, A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, XV(29), 763–774.

Nieves Garcia, V., Van der Valk, O., & Elings, A. (2011). Mexican protected horticulture Production and market of Mexican protected horticulture described and analysed. *Wageningen UR Greenhouse Horticulture*, 31, 108.

Nisen, A., Grafiadellis, M., Jiménez, R., La Malfa, G., Martínez-García, P. F., Monteiro, A., ... Baudoin, W. (1988). *Cultures protégées en climat méditerranéen*. Rome: FAO. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=b7bcRyV2E1gC>

Papasolomontos, A., Baudoin, W., Lutaladio, N., Castilla, N., Baeza, E., Montero, J. I., ... Abou Hadid, A. F. (2013). *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops: : principles for mediterranean climate areas*. FAO Plant Production and Protection Paper. Rome.

PESA México. (2007). Producción de hortalizas a cielo abierto y bajo condiciones protegidas Contenido.

Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., Lugo, E., & MacCleery, B. (2014). *Greenhouse Design and Control*. CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/b17391>

Reddy, P. P. (2016). *Sustainable Crop Protection under Protected Cultivation*. Springer Science + Business Media. Singapore: Springer

<https://doi.org/10.1007/978-981-287-952-3>

SIAP. (2016). Atlas Agroalimentario 2016. México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Retrieved from http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016

Sibbitt, B., McClenahan, D., Djebbar, R., Thornton, J., Wong, B., Carriere, J., & Kokko, J. (2012). The performance of a high solar fraction seasonal storage district heating system - Five years of operation. *Energy Procedia*, 30, 856–865.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.097>

Solar Rating & Certification Corporation. (2017). SRCC. Retrieved July 29, 2017, from <http://www.solar-rating.org/>

Valera, D., Molina, F., & Álvarez, A. (2008). *Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos*.

von Zabeltitz, C. (2011). *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates. Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates: Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14582-7>

Control de un sistema mecatrónico mediante señales mioeléctricas

CASTILLO-QUIROZ, Gregorio†, VELAZQUEZ-APARICIO, Mahali, OLVERA-SOLIZ, Moisés y GONZAGA-LICONA, Elisa

Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Huauchinango-ITSH-TecNM, Av. Tecnológico No 80, Huauchinango, Puebla, México

Recibido 7 de Enero, 2017; Aceptado 15 de Marzo, 2017

Resumen

En este trabajo de investigación se presenta la implementación de un sistema para la detección, adquisición y acondicionamiento de señales mioeléctricas, obtenidas específicamente del bíceps braquial, que serán empleadas en el control de la posición angular de un aeropéndulo, con el fin de usar las señales electromiográficas en la manipulación de sistemas mecatrónicos. Para la adquisición de estas señales se utilizaron electrodos superficiales adheribles a la piel, una tarjeta electrónica que amplifica y filtra las señales de posibles ruidos electrostáticos y una tarjeta Arduino como receptor de esta información, posteriormente se creó un algoritmo en LabVIEW para el acoplamiento de la señal y así transmitirla a un programa en Matlab Simulink que se encarga de interpretar y posicionar el aeropéndulo de acuerdo a la magnitud de la señal electromiográfica. Obteniendo como resultado la interpretación de la señal que genera la contracción y relajación del bíceps braquial, en el posicionamiento angular del aeropéndulo.

Señales mioeléctricas, Arduino, Simulink, Sistemas Mecatronicos

Abstract

In this work we present the implementation of a system for the detection, acquisition and conditioning of myoelectric signals, specifically obtained from the biceps brachii, which will be used in the control of the angular position of an aeropendulum, with the final purpose that use the signals Electromyography in the manipulation of mechatronic systems. To acquire these signals, skin-surface electrodes were used, a commercial card that amplifies and filters the signals of possible electrostatic interference and an Arduino card as receiver of this information, after that an algorithm was created in LabVIEW for the coupling of the Signal and thus transmit it to a program in Matlab Simulink that is responsible for interpreting and positioning the aeropendulum according to the magnitude of the electromyographic signal. Obtaining as a result the interpretation of the signal that generates the contraction and relaxation of the biceps brachii, in the angular positioning of the aeropendulum.

Myoelectric signals, Arduino, Simulink, Mechatronics System

Citación: CASTILLO-QUIROZ, Gregorio, VELAZQUEZ-APARICIO, Mahali, OLVERA-SOLIZ, Moisés y GONZAGA-LICONA, Elisa. Control de un sistema mecatrónico mediante señales mioeléctricas. Revista de Innovación Sistemática. 2017. 1-1:46-54

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

En el cuerpo humano se generan diferentes señales bioeléctricas presentes en tejidos, células, nervios, glándulas, entre otros. Que permiten el funcionamiento de órganos tales como el cerebro, el corazón, los ojos y los músculos. Estas señales reciben nombres característicos dependiendo del órgano en el que se originan. Para los órganos mencionados, las señales reciben el nombre de electroencefalografías, electrocardiográficas, electrooculográficas y electromiográficas, respectivamente (Flóres, 2007). El estudio de estas señales ha dado como resultado sistemas que prevén enfermedades degenerativas en los músculos, además de que gracias al avance de la tecnología se han creado dispositivos que resuelven problemas de sistemas biológicos, entre ellos se encuentran los diferentes tipos de prótesis mioeléctricas y sistemas de control de posición instrumental médico.

Hoy en día, gran parte de la población nacional tiene alguna discapacidad motora por causas como accidentes, enfermedades o problemas congénitos. Tomando en cuenta las necesidades de las personas con problemas motores, es que surge el interés de estudiar el proceso de adquisición de las señales mioeléctricas.

Mediante la obtención de estas señales, adquiridas superficialmente de los músculos de una de las extremidades, se podrá controlar la posición angular de los grados de libertad de un sistema mecatrónico, como consecuencia de la contracción y relajación voluntaria del músculo a estudiar. Con el fin de contribuir a futuros proyectos centrados en el uso de las señales electromiográficas con aplicaciones en prótesis, siendo este trabajo la base teórica y práctica de su obtención.

El desarrollo de este trabajo de investigación está dividido en las secciones que a continuación se describen:

Materiales

Se describen las características de los componentes utilizados en la construcción del prototipo.

Metodología

Se describen los pasos que se siguieron para el desarrollo de la investigación.

Resultados

En esta sección se analizan los resultados obtenidos para determinar si se ha logrado el objetivo.

Conclusiones

Se habla de los objetivos logrados satisfactoriamente y de cómo contribuye este trabajo en diversas aplicaciones relacionadas con el uso de señales mioeléctricas.

Agradecimientos

Se agradece a las personas e instituciones que permitieron el desarrollo de esta investigación.

Materiales

Para la elaboración de este trabajo se precisó de electrodos superficiales de cloruro de plata, sensores musculares MyoWare, tarjeta programable Arduino, dos laptops o CPU's, un aeropéndulo, los programas LabView, Matlab y la IDE de Arduino, jumpers y cables USB, en la Figura 1 se muestran los elementos más indispensables para el tratamiento de este tipo de señales.



Figura 1 Elementos electrónicos

Electrodos superficiales

Se utilizaron electrodos húmedos de cloruro de plata, entre la placa de metal y la piel estos contienen una sustancia electrolítica o gel conductor, esto se hace con el fin de minimizar el ruido intrínseco que se genera entre el contacto de la piel y el metal, este gel conductor mejora la conductividad y el flujo de la corriente. Las características eléctricas se mencionan en la Tabla 1.

Característica	Especificación
Impedancia ACZ I (antes de la simulación de desfibrilación)	220 Ohm
Voltaje de compensación de CC (antes de la simulación de desfibrilación)	0,2 mV
SDR (potencial restante después de la simulación de desfibrilación)	11 mV
Pendiente (disminución potencial después de la simulación de desfibrilación)	0,2 mV / s
COIN (inestabilidad de desplazamiento combinado y ruido interno)	4 μ V
Tolerancia de corriente de polarización (tensión de compensación de CC después de la carga de CC)	6 mV

Tabla 1 Especificaciones eléctricas del electrodo

Sensores musculares

El sensor muscular que se utilizó mide, filtra, rectifica, y amplifica la actividad eléctrica de un músculo, y produce una señal de salida analógica, que fácilmente pueda ser leído por un microcontrolador.

Las características del mismo se encuentran en la Tabla 2.

Parámetro	Mín	TYP	Max
Voltaje de Suministro	+2.9V	+3.3v o +5v	+5.7v
Potenciómetro de Ganancia Ajustable	0.01 Ω	50 k Ω	100 k Ω
Voltaje de la señal de salida: EMG (centrado alrededor de + Vs / 2)	0 V 0V	-- --	+Vs +Vs
Impedancia de Entrada	--	110 G Ω	--
Corriente de Suministro	--	9 mA	14 mA

Tabla 2 Especificaciones eléctricas del sensor

Tarjeta programable Arduino

La tarjeta Arduino fue utilizada como una tarjeta de adquisición de datos, para recabar la información proveniente del sensor.

Aeropéndulo

El aeropéndulo es un sistema que basa sus movimientos angulares en un motor montado en un extremo del eje de un péndulo, el cual cuenta con una hélice para generar un impulso al eje rotatorio del péndulo.

Metodología

El desarrollo de esta investigación se llevó a cabo mediante el diseño experimental, debido a las diversas variables que intervienen en el sistema para cumplir con su objetivo principal. Este proyecto se realizó en los siguientes pasos:

Detección de señales electromiográficas en los músculos del brazo

La piel del ser humano es un tejido conductor que está formado de soluciones electrolíticas, en la cual la corriente es transportada por iones; mientras que el metal es un material altamente conductor, en el cual la corriente es transportada por electrones, teniendo como resultado, la interacción entre el electrodo y la piel mucho ruido. Existen varios tipos de electrodos de superficie, estos se dividen en dos principalmente: electrodos secos y electrodos húmedos. Los electrodos húmedos son los que entre la placa de metal y la piel se encuentra una sustancia electrolítica o gel conductor, esto es con el fin de minimizar el ruido que se genera entre el contacto de la piel y el metal, este gel conductor mejora la conductividad y el flujo de la corriente, por esa razón se decidió que se utilizara este tipo de electrodos para este proyecto.

Para la obtención de las señales, se utilizó un sensor muscular y electrodos superficiales húmedos, este sensor necesita de tres electrodos, dos de ellos son adyacentes a la placa y el tercero es una extensión del sensor y sirve como referencia de la señal. La señal fue obtenida del bíceps braquial, el sensor fue colocado como se muestra en la Figura 2.

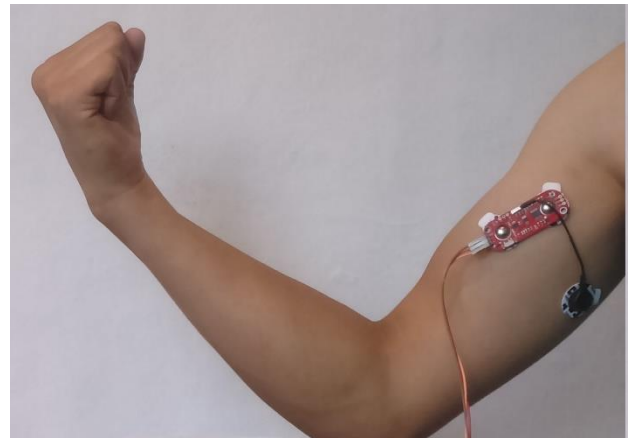


Figura 2 Ubicación del sensor muscular en el brazo de prueba

Creación de la interfaz de LabVIEW

La interfaz que se creó permite acoplar la señal obtenida del sensor y visualizarla en pantalla, para ello se utilizó un ciclo *while loop* que mantiene la lectura de la señal del músculo actualizada de manera constante, también se colocó un indicador de voltaje para visualizar la amplitud de la señal en cualquier instante de tiempo. La interfaz de LabVIEW creada se observa en la Figura 3.

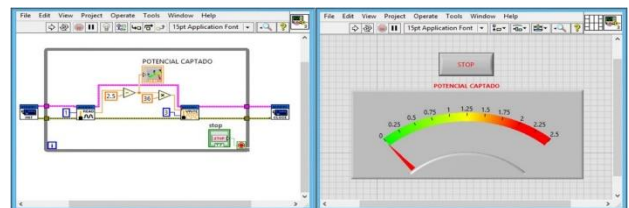


Figura 3 Interfaz de LabVIEW

Modelo Matemático del Aeropéndulo

El sistema del Aeropéndulo, como el que se muestra en la Figura 4, es de orden superior, no lineal. Es un excelente sistema para llevar a cabo pruebas para diversas técnicas de control y las teorías de control moderno. Por otra parte, también puede simular muchos fenómenos en la naturaleza, tales como robots, objetos voladores en el espacio, simuladores 3D, equipos teleoperados, exoesqueletos, etc.

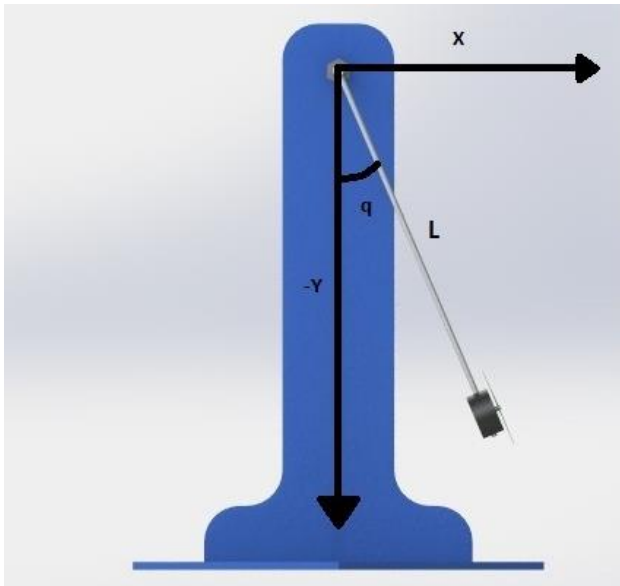


Figura 4 Diagrama del cuerpo libre del aeropéndulo

Para obtener el modelo matemático del sistema se requiere aplicar la ecuación de Euler-Lagrange. La ecuación que describe al aeropéndulo tomaría la siguiente forma:

$$m L^2 \ddot{q} = -m g L \sin(q) - b \dot{q} + T \quad (1)$$

Donde mg es el peso del motor, L es la longitud del motor del Aeropéndulo, b es el coeficiente de fricción y T es la fuerza de empuje de la hélice.

Después de un análisis de linealización de la ecuación (1). Nuestra función de transferencia la entrada será la fuerza de empuje y la salida será el ángulo que forma la barra móvil con la vertical. Por lo tanto la función de transferencia quedará de la forma:

$$G(s) = (k L) / (m L^2 s^2 + b s) \quad (2)$$

Creación de la interfaz de Matlab

Los sistemas de control son diseñados para mantener la estabilidad en un sistema. Los sistemas para tener un comportamiento óptimo necesitan de compensadores o de controladores.

Entre los compensadores más utilizados son los de adelanto, atraso, atraso adelante. En este estudio aplicaremos un compensador de atraso que funciona de manera inversa a como lo hace un compensador de adelanto. Como es de esperarse aumentará el tiempo de respuesta en estado transitorio, sin embargo se obtendrá mejor precisión en estado estable y suprime los efectos de ruido en altas frecuencias. Por el lado de controladores se aplicará la técnica del Regulador Cuadrático Óptimo Lineal (LQR) que ofrece una ley de control simple, muy robusta tanto en tiempo continuo o en tiempo discreto.

El Aeropéndulo, contiene un sistema electrónico que puede controlarse desde Matlab, para su control cuenta con un diagrama de bloques en Simulink, del cual se utilizó solamente el compensador de retardo, también se realizó un sistema de control LQR, para comparar las respuestas a los cambios de amplitud de la señal. Para la comunicación con la tarjeta Arduino se agregó el toolbox correspondiente. Estos diagramas de control se pueden observar en las Figuras 5 y 6.

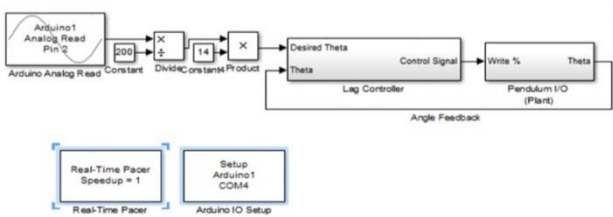


Figura 5 Diagrama de bloques del compensador de retardo

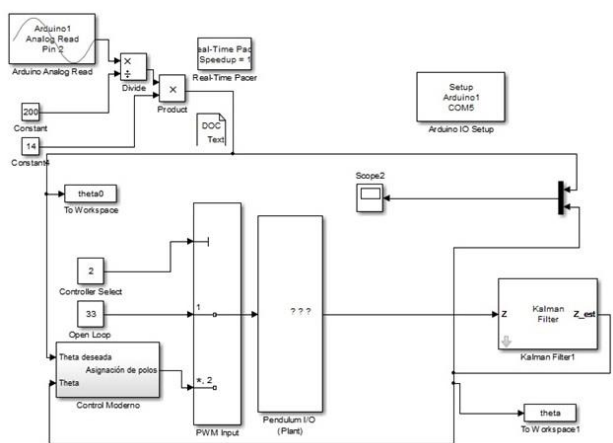


Figura 6 Diagrama de bloques del controlador LQR

Resultados

Se realizó en el software LabVIEW, un algoritmo adecuado para acoplar las señales captadas por el sensor, ya que las medidas que se obtenía de este, partían de los 2 voltios y la requerida debía partir de 0 voltios, de esta manera, cuando el músculo estaba en reposo el ángulo del aeropéndulo era nulo. Se realizó con satisfacción en el software Matlab, el algoritmo que además de la comunicación con la tarjeta del aeropéndulo, permite recibir la información necesaria para el posicionamiento angular del mismo, mediante un puerto distinto.

Además se localizó de manera certera el área superficial del músculo del brazo y la colocación favorable del sensor, donde este capta con mayor amplitud las señales electromiográficas, realizando las lecturas del sensor de manera correcta, y la interpretación de estas, en el Aeropéndulo como se muestra en la Figura 7

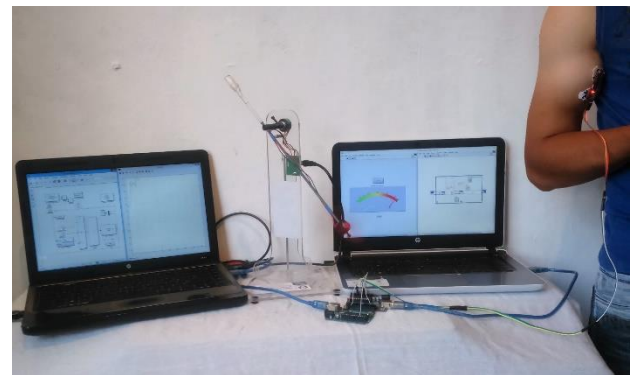


Figura 7 Prototipo final

En la prueba realizada con el compensador de retardo se tuvo un comportamiento como el del Gráfico 1, la línea azul corresponde al voltaje obtenido del sensor y la morada describe el comportamiento de la respuesta del aeropéndulo, se observa que el sistema cumple con posicionar al aeropéndulo en base a la flexión del brazo.

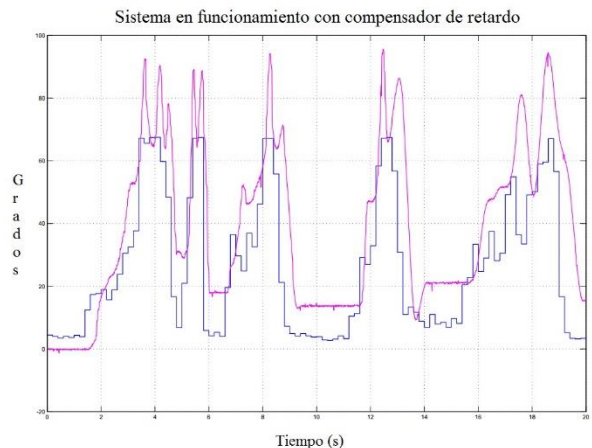


Gráfico 1 Respuesta del compensador de retardo

Se obtuvo el Gráfico 2 que muestra el comportamiento del sistema con el controlador LQR, en esta se visualiza que la respuesta es más suave ante los cambios de voltaje.

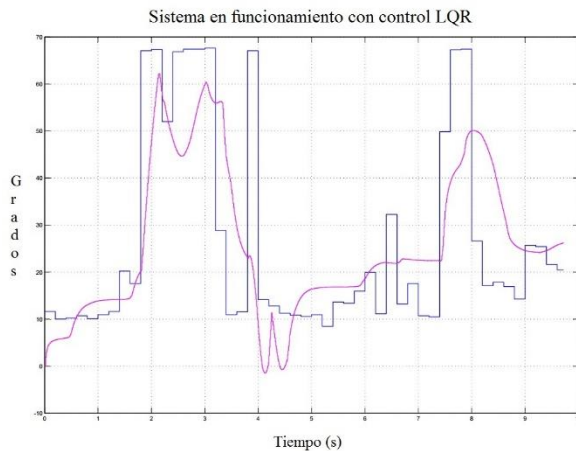


Gráfico 2 Respuesta del controlador LQR

El control LQR resultó muy efectivo consiguiendo una estabilidad con un error menor del 5% en 1.8 segundos tal como se muestra en el Gráfico 3.

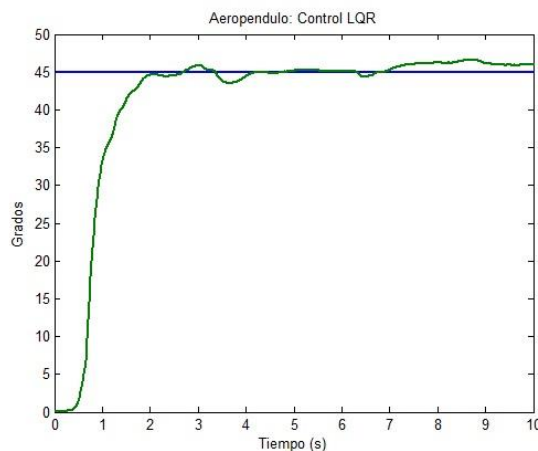


Gráfico 3 Respuesta del controlador LQR ante una posición deseada de 45 grados

En el Gráfico 4 se aprecia el comportamiento de la posición angular del aeropéndulo con respecto a la intensidad de voltaje obtenido del sensor, el cual es previamente amplificado.

También podemos observar el incremento en grados de la posición angular del aeropéndulo por cada variación de voltaje en intervalos de 0.1 volts.

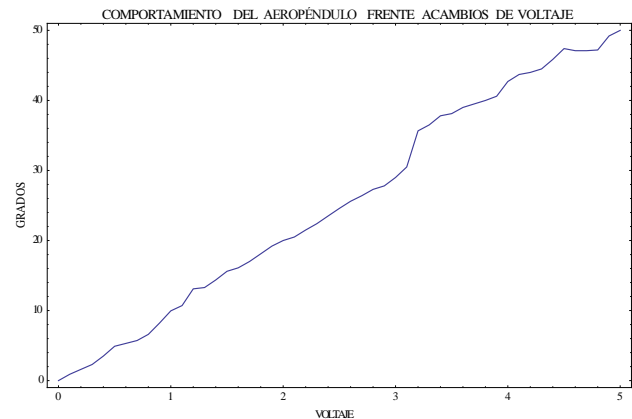


Gráfico 4 Comportamiento del sistema frente a cambios de voltaje

En este análisis se aplicó un compensador de retardo y un controlador LQR sobre el aeropéndulo y se constató que los dos tuvieron éxito en las respuestas del sistema. El controlador LQR mostró una mejor respuesta y rendimiento. Para el diseño del compensador y del controlador LQR se basaron en el sistema lineal (ver ecuación 2), pero el sistema del aeropéndulo es no lineal (ver ecuación 1) por lo que se recomienda para mejorar la respuesta y hacer más efectivo el sistema es usar la herramienta de control Fuzzy, con este control no es necesario conocer el modelo matemático de la planta, sólo consiste en conocer las reglas de control que lo gobiernan el sistema, lo cual es fácil de deducir.

Agradecimiento

Los autores desean expresar su agradecimiento a la carrera de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico Superior de Huauchinango por el apoyo y las facilidades para el desarrollo de este trabajo.

Conclusiones

Se demostró satisfactoriamente que se puede hacer uso de las señales mioeléctricas para el control de un sistema de un grado de libertad como lo es el aeropéndulo, con el fin de reproducir las acciones que son realizadas por un músculo.

Este sistema podría contribuir en la aplicación de las señales mioeléctricas en una prótesis inteligente y ayudar a gente con problemas como es la pérdida de una extremidad, sin embargo las aplicaciones se pueden extender y contribuir a otras necesidades, ejemplos de estas pueden ser simuladores 3D, equipos tele operados, exoesqueletos, entre otras.

Referencias

- Roger Álvarez Fiallo, D. C. (05 de Diciembre de 2016). Instituto Superior de Medicina Militar "Dr. Luis Díaz Soto". Obtenido de http://bvs.sld.cu/revistas/mil/vol35_4_06/mil08406.htm
- Dudley S. Childress. Historical aspects of powered limb prostheses. *Clinical Prosthetics and Orthotics*, Vol, 9 Num 1, 1985-American Academy of Orthotists and Prosthetists,1985
- Dunlop, G.R. "A distributed controller for the Canterbury hand", ICOM2003. International Conference on Mechatronics. Professional Engineering Publishing, London, UK, 2003
- Harris, M., P. Kyberd "Design and development of a dextrous manipulator", ICOM2003. International Conference on Mechatronics. Professional Engineering Publishing, London, UK, 2003.
- González, J. M. (2004). *ROBÓTICA Y PRÓTESIS INTELIGENTES*. Revista Digital Universitaria, 8-15.
- Terrazas, K. C., & Rodriguez, M. d. (2016). *SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES MIOELÉCTRICAS*. Ciudad Juárez: La Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Bryant Fernando Salas Flórez, Y. A. (2007). Análisis de Señales Mioeléctricas orientadas a la Robótica. En Y. A. Bryant Fernando Salas Flórez, Análisis de Señales Mioeléctricas orientadas a la Robótica (pág. 12). Bogotá: Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería de diseño y automatización electrónica.
- S.A., C. O. (Agosto de 2016). El sistema Nervioso: Documental completo.
- Tresguerres, J. A. (2005). *Fisiología Humana*. México: McGraw-Hill Interamericana.
- Barone, L. R. (s.f.). *Anatomía y Fisiología del cuerpo humano*. Buenos Aires-Rep. Argentina: Cultural Librería Americana S.A. -MMIV, Grupo Clasa.
- Loyola, L. F. (2008). Tejido Nervioso. En L. F. Loyola, *Histología* (pág. 241). Lima, Perú: Departamento de Ciencias Morfológicas.
- Edgar Leandro Cota Maman, A. C. (Agosto de 2016). *Sistema Nervioso Parte 1*. Lima, San Marcos, Perú.
- John E. Hall, A. C. (2011). Fisiología de la membrana, el nervio y el músculo. En A. C. John E. Hall, *Tratados de Fisiología médica* (págs. 61-62). Jackson Mississippi: ELSEVIER.

Navarro, R. B. (s.f.). Electromiografía. En Instrumentación Biomédica (págs. 2-6). Universidad de Alcalá Departamento de Electrónica.

Miyara, F. (2004). Filtros Ideales. En F. Miyara, Filtros Activos (págs. 8-12). Argentina: Universidad Nacional de Rosario.

V., E. i. (Septiembre de 2016). Equipos Interferenciales. Obtenido de www.interferenciales.com.mx

Ebay. (Septiembre de 2016). Obtenido de www.ibay.com

MyoWare. (2015). MyoWar TM Muscle Sensor (AT-04-001) DATACHEET. Advancer Technologies.

Enicov, E. T., & Campa, G. (Octubre de 2016). PROYECTO AEROPENDULUM. Obtenido de PROYECTO AEROPENDULUM: <http://aeropendulum.arizona.edu/>

MathWorks. (18 de Noviembre de 2016). Simulink. Obtenido de MathWorks: <https://www.mathworks.com/products/simulink/>

Instruments, N. (noviembre de 2016). National Instruments. Obtenido de <http://www.ni.com/labview/esa/>

Arduino. (01 de Diciembre de 2016). Obtenido de Arduino: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

Torrente Artero, Óscar (2013), Arduino, Curso práctico de formación, Alfaomega, México.

Humana, F. (Septiembre de 2016). Biología Humana. Obtenido de Biología Humana: <https://www.blogger.com/profile/08882214844849646299>

Neurofisiológicos, E. (Septiembre de 2016). Electromiograma / EMG. Obtenido de Electromiograma / EMG: <http://estudios-neurofisiologicos.com/que-es-un-emg/>

Adafruit. (Octubre de 2016). Obtenido de <https://www.adafruit.com/product/2773>

Andrés Tovar Pérez, P. (Abril de 2017). Biomecánica, Biomecatrónica. Obtenido de Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia: <http://www.ing.unal.edu.co/eventos/mmp/docs/conferencias/Biomecnic.pdf>

Alda, F. L. (abril de 2017). B.log.ia 2.0. Obtenido de B.log.ia 2.0: <http://b-log-ia20.blogspot.mx/2016/06/>

Player, S. (Abril de 2017). Células del sistema nervioso. Obtenido de <http://slideplayer.es/slide/154867/>

Construcción de un túnel de viento

FRANCO-MARTINEZ, David*† y RAMIREZ-SILVA, Pablo

FES Aragón, Centro Tecnológico, UNAM

Recibido 11 de Enero, 2017; Aceptado 16 de Marzo, 2017

Resumen

Las industrias del automovilismo y la aeronáutica fueron las pioneras en elaborar dispositivos capaces de medir el flujo del viento, el caudal y el impacto que infligía en sus modelos de prueba. Esto llevó a la creación de túneles de viento con velocidades subsónicas (0.75). Para este caso se optó por diseñar un Túnel de Viento subsónico partiendo con que la cámara de pruebas tenga una velocidad de 50 m/s (0.145 M) y unas dimensiones de 35x35 cm y con un largo de 50 cm. El objetivo es mostrar la aplicación conocimientos de Dinámica de Fluidos, especialmente en temas como Número de Reynolds, Ecuación de Bernoulli y la Primera Ley de la termodinámica para la construcción del túnel de viento. Cada componente se calculó por separado debido a que iban a ser fabricarse de un material distinto. El colector y el difusor serían de fibra de vidrio y la cámara de pruebas de acrílico. Luego de obtener los valores de cada componente del Túnel de Viento, se diseñaron en SolidWorks[1]. Pese a no cumplir los objetivos principales, los resultados que se alcanzaron son satisfactorios teniendo una mínima pérdida a lo largo del túnel y pudiendo hacer pruebas aerodinámicas a objetos.

Túnel de viento, mecánica de fluidos, ingeniería

Abstract

The motoring and aeronautics industries were the pioneers in developing devices capable of measuring wind flow, flow and the impact it inflicted on their test models. This led to the creation of wind tunnels with subsonic speeds (0.75). For this case it was decided to design a Subsonic Wind Tunnel starting with that the test chamber has a speed of 50 m / s (0.145 M) and dimensions of 35x35 cm and a length of 50 cm. The aim is to show the application knowledge of Fluid Dynamics, especially in subjects such as Reynolds Number, Bernoulli Equation and the First Law of thermodynamics for wind tunnel construction. Each component was calculated separately because they were to be manufactured from a different material. The manifold and diffuser would be fiberglass and acrylic testing chamber. After obtaining the values of each component of the Wind Tunnel, they were designed in SolidWorks. Despite not meeting the main objectives, the results achieved are satisfactory having a minimum loss along the tunnel and being able to do aerodynamic tests on objects.

Wind tunnel, fluid mechanics, engineering

Citación: FRANCO-MARTINEZ, David y RAMIREZ-SILVA, Pablo. Construcción de un túnel de viento. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-1:55-71

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: davd_francom@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

El diseño y construcción del túnel de viento que se realizó en el Laboratorio de Diagnostico Energético de la FES Aragón, se enfocó para realizar pruebas a prototipos de turbinas de vapor ya sea a escala o tamaño real. Con esto se podrá elegir el mejor diseño de alguna turbina y ser modificada para un mejor rendimiento.

El diseño del túnel de viento se enfocó en 5 componentes (ventilador, difusor, cámara de pruebas, colector y malla rectificadora) y para darles la geometría se hicieron cálculos en base a la ecuación de Bernoulli y al número de Reynolds. No solo eso, también se modeló en un programa de diseño llamado Solid Works [2], el cual sirvió para simular el túnel de viento y tener una vista preliminar de cómo se comportará el viento una vez que sea construido.

Con la gran variedad de materiales que hay para la construcción de túneles, este túnel se construyó lo más ligero posible por lo cual se escogió un material nuevo pero muy difícil de manejar (fibra de vidrio). No solo eso, la elección de la instrumentación fue otra dificultad que se tuvo que resolver, debido a los precios de unos y al costo de manufactura de otros de ellos, por lo cual se ha decidido posponerlo hasta obtener presupuesto para su compra. Pero al conjuntar todo y ensamblarlo es cuando se aprecia todo el trabajo que se requirió para hacer funcionar un túnel de viento, no solo eso, ver el proyecto desde la idea original de diseño, hasta el momento de poner el primer objeto y hacer una prueba para ver su funcionamiento, fue algo realmente increíble

Cada Túnel de viento es distinto, se fabrica de acuerdo a las necesidades para lo que se va a usar y para los objetos que se van a analizar. Hay dos tipos de túnel de viento, los de circuito cerrado y los de circuito abierto; el diseño de este Túnel de Viento es de circuito abierto, parecido al Tipo Eiffel; está constituido con cuatro secciones.[2]

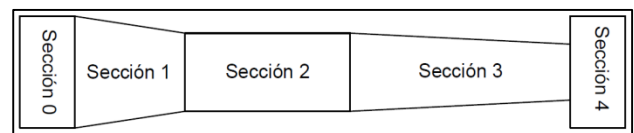


Figura 1 Numeración de las Secciones del Túnel de Viento

- Sección 0 → Sección de Estabilización (Mallas y/o Pantallas)
- Sección 1 → Colector
- Sección 2 → Cámara de Pruebas
- Sección 3 → Difusor
- Sección 4 → Ventilador y/o Extractor

Cada parte del diseño del túnel, se diseñó en el programa de CAD SolidWorks para visualizarlo antes de su manufacturación y hacer análisis de comportamiento del túnel de viento.

A continuación, se describirán el diseño de cada parte que comprende el Túnel de Viento:

Cámara de Pruebas

Como ya se había mencionado antes, en esta sección es donde se debe de empezar a diseñar el túnel de viento. Las relaciones geométricas de la cámara de pruebas son la relación de aspecto, y relación ancho alto definidas así:

$$R_a = \frac{\varepsilon}{b_f} = 0.8 R_{wh} \quad (1)$$

Dónde:

- R_a = Relación de aspecto
- R_{wh} = Relación de ancho-alto
- ε = Envergadura del modelo (m)
- b_f = Base de la cámara de pruebas (m)

Las dimensiones que se sugirieron para tener una cámara de pruebas donde se pueda observar agradablemente los objetos a analizar son las siguientes:

Velocidad V	50 m/s	180 Km/h
Altura A	0.35 m	35 cm
Ancho B	0.35 m	35 cm
Longitud L	0.50 m	50 cm
Sección Rectangular A	0.1225 m^2	1225 cm^2

Tabla 1 Dimensionas de la Cámara de Pruebas

Para tener una mayor precisión de los cálculos, fue necesario saber las propiedades térmicas de la región donde va a colocar el túnel de viento. Con los datos de las propiedades del aire de la Ciudad de México y considerando una Temperatura de 23.5°C y una humedad Relativa del 62% que es un promedio anual de la Ciudad.

Determinación del Tipo de Flujo

Con la ecuación de número de Reynolds se determinó el tipo de flujo que pasará a través de una sección cerrada. El tipo de diseño de la cámara de pruebas es un ducto de forma cuadrada, por lo que, para determinar el tipo de flujo se obtiene el Perímetro Mojado y el Área transversal, se sustituyen en la ecuación 1 del Diámetro Hidráulico generando los datos de la tabla 2.

Área Transversal A	0.1225 m^2
Longitud L	0.350 m
Perímetro Mojado PM	1.400 m

$$D_h = 0.35 \text{ m}$$

Tabla 2 Tipo de Flujo

El valor obtenido en el diámetro hidráulico es el valor final para determinar el número de Reynolds y reemplazarlo en la ecuación 1:

$$N_R = \frac{v D_h \rho}{\mu} \quad (1)$$

Así, se sustituyó en la Ecuación 1 con los datos de la tabla 3.

Velocidad N	50.00 m/s
Diámetro Hidráulico D_h	0.350 m
Densidad P	0.910 Kg/m^3
Viscosidad Dinámica μ	1.41×10^{-5} $Kg/m \cdot s$

$$N_R = 1.13 \times 10^6$$

Tabla 3 Determinación del Tipo de Flujo

El número de Reynolds que se obtuvo fue muy elevado, un resultado mayor a 4000 da un flujo turbulento, por lo que se deben de utilizar pantallas para mantener un flujo laminar.

Calculo del Caudal de Aire Necesario

El caudal es el volumen de fluido que avanza por unidad de tiempo, esto determinó el tipo de ventilador que se compró. Se calcularon las velocidades de cada sección, así como, las presiones y pérdidas. El Caudal se expresa en la ecuación 2:

$$Q = vA \quad (2)$$

Dónde:

- Q = Caudal (m^3/s)
- V = Velocidad (m/s)
- A = Área Transversal (m^2)

Así tendremos que el caudal es:

$$Q = 6.13 \frac{m^3}{s}$$

Este es el caudal necesario para alcanzar la velocidad máxima requerida para los análisis. Una vez obtenido el caudal, se procedió a calcular el flujo másico requerido en la ecuación de continuidad entre cada sección, que, junto la ecuación de Bernoulli, se utilizó para calcular las presiones y las velocidades. El flujo másico se calculó de la siguiente manera:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad (3)$$

Dónde:

- \dot{m} = Flujo Másico (Kg/s)
- ρ = Densidad (Kg/m^3)
- Q = Caudal (m^3/s)

Así tenemos un flujo másico de:

$$\dot{m} = 5.57 \text{ kg/s}$$

Perdidas de la Cámara de Pruebas

Las pérdidas se calcularon con el modelo de Darcy-Weisbach el cual se puede utilizar para calcular la pérdida de energía en secciones largas y rectas de tuberías, tanto para flujo laminar, así como el turbulento.

La fórmula de Darcy-Weisbach para calcular las pérdidas en una tubería es:

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

Dónde:

- hf = Pérdidas de Energía Debido a la Fricción (m)
- f = Factor de Fricción
- L = Longitud (m)
- V = Velocidad (m/s)
- D_h = Diámetro Hidráulico (m)
- g = Gravedad de la ciudad de México m/s^2

El factor de fricción (f) se determina por el tipo de flujo.

Teniendo un flujo turbulento como el que se obtuvo, se tuvo que utilizar la ecuación de Colebrook o el diagrama de Moody para determinarlo. La ecuación de Colebrook es:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/(D_h)}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (5)$$

Dónde:

- ε = Rugosidad Equivalente

Para cualquiera de las dos formas para obtener el factor de fricción, fue necesario determinar la rugosidad equivalente (ε) del material que se va a utilizar. La cámara de pruebas se construyó de plástico cristal (Acrílico) para poder observar las pruebas que se realicen, la rugosidad del plástico teóricamente es cero, pero para poder ejecutar los datos, se utilizó el valor del plástico en la unidad de metros de 3×10^{-7} . Para poder aplicar la ecuación de Colebrook, fue necesario combinarla con el diagrama de Moody y una vez obtenido el resultado, se realizó un proceso de iteraciones hasta llegar al punto más aproximado.

En el diagrama de Moody, se localiza el factor de fricción utilizando la tabla 4.

Rugosidad Relativa ε/D_h	8.57×10^{-7} m
Rugosidad ε	3.00×10^{-7} m
Diámetro Hidráulico D_h	0.350 m
Número de Reynolds Re	1.13×10^6

Tabla 4 Datos para el Diagrama de Moody

Se pudo apreciar en el Diagrama 1 un factor de fricción de $f = 0.0155$ aproximadamente, se tomó el punto superior del diagrama que fue 0.016 y se sustituyó en la ecuación 5 de Colebrook en f_n hasta que el valor iterado fuese menor que 0.001.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{(8.57 \times 10^{-7})}{3.7} + \frac{2.51}{1.13 \times 10^6 \sqrt{f_n}} \right)$$

Dando el nuevo valor de $f = 0.0111$ y su diferencia es:

$$f_n - f = 0.016 - 0.0111 = 0.0049 < 0.001$$

Se vuelvo a iterar otra vez, pero ahora con $f = 0.0049$ porque no fue menor a 0.001. Eso nos dio un valor de $f = 0.0115$

$$f_n - f = 0.0111 - 0.0115 = -0.0004 < 0.001$$

Se tomó nuevamente el nuevo factor de fricción que fue $f = 0.0115$ para calcular las pérdidas en la cámara de pruebas.

Una vez obtenidos estos resultados se utilizaron en la ecuación 4.

$$hf = f \frac{L V^2}{D_h 2g}$$

$$= 0.0115 \left(\frac{0.50 \text{ m}}{0.35 \text{ m}} \right) \left(\frac{(50 \text{ m/s})^2}{2 \left(9.78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} \right)$$

$$hf = 2.09 \text{ m}$$

Esto significó que cada 2.09 N*m de energía se pierden por cada Newton de aire que fluya a lo largo de la longitud de 50 cm de la cámara de pruebas.

Colector

Tiene una doble función, la primera, estabilizar el flujo que entra de forma turbulento y la segunda, incrementar la velocidad del flujo de aire para que pase a la cámara de pruebas.

El colector incrementa la velocidad con respecto a su entrada, pero reduce la presión en el mismo punto, al variar la presión, también puede llegar a variar la densidad, ley que cumplen los flujos compresibles. Al variar la densidad, es necesario determinarlo para aplicar la variación en la ecuación de Bernoulli.

Se determinó el número de Mach para conocer las condiciones del tipo de flujo (compresible o incompresible) y obtubo un resultado menor de 0.3 para considerar que la densidad del aire es constante en todo el túnel de. Se sustituyeron los datos de la tabla 5 en la ecuación 6 de Número de Mach para obtener su valor.

Velocidad V	50.00 m/s
Velocidad del Sonido a	345.60 m/s

Tabla 5 Datos para Determinar el Número de Mach

$$M = \frac{v}{a} = 0.145 \quad (6)$$

$$M = 0.145 < 0.3 \text{ Flujo Incompresible}$$

Este resultado indicó que si se mantendrá la densidad constante en el interior del túnel de viento.

A continuación, se dieron las dimensiones del colector para determinar sus propiedades (tabla 6).

Velocidad V2	50.00 m/s
Área de Entrada A1	0.360 m^2
Área de Salida A2	0.1225 m^2

Tabla 6 Datos del Colector

Calculo de Velocidades en la Entrada del Colector

Se sabe que el flujo másico teóricamente será el mismo en todo el conducto, por lo tanto, se debe de cumplir la ecuación de continuidad, donde:

$$\dot{m} = \dot{m}_0 = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dots = \dot{m}_n \quad (7)$$

Y en términos de velocidad:

$$\rho \cdot v \cdot A = \rho_0 \cdot v_0 \cdot A_0 = \rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 = \dots = \rho_n \cdot v_n \cdot A_n \quad (8)$$

Se sabe que la velocidad de un fluido se incrementa al reducir su área por eso la velocidad a la entrada del colector será menor por tener un área mayor.

Entonces limitando la ecuación de continuidad a los valores que se tienen en la tabla 6, se tiene:

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 \quad (9)$$

Pero, recordando el resultado que nos dio el número de Mach dando que la densidad del aire va a ser constante, reducimos la ecuación 8 de continuidad a:

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (10)$$

Despejamos la velocidad de entrada y sustituimos con los datos de la tabla 6:

$$v_1 = \frac{v_2 \cdot A_2}{A_1}$$

$$v_1 = 17.01 \text{ m/s}$$

Para comprobar que se va por buen camino, se multiplicó la velocidad que obtuvo por el área transversal de la entrada (**0.36 m²**) y se encontró el mismo caudal (**6.13 m³/s**) que se calculó en la cámara de pruebas.

Calculo de Presiones en el Colector

Para calcular la presión en el colector, se recurrió a la ecuación de Bernoulli, es una de las más importantes en la mecánica de fluidos, ayuda a resolver una gran cantidad de problemas en la vida real, siempre y cuando se cumplan tres condiciones para poder aplicarla:

- El fluido debe de ser de régimen estacionario
- El fluido debe ser incomprensible
- El fluido no debe ser viscoso

En este caso, se cumplieron dos de las tres condiciones, pero como el aire tiene una viscosidad relativamente baja, se podría considerar como un fluido no viscoso. Eso hace que si se pueda usar la ecuación 3.3 de Bernoulli y poder calcular las presiones.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + \gamma \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \gamma \cdot h_2$$

Como el diseño del túnel es horizontal se puede observar en la fórmula el término $\gamma \cdot h$ que se refieren a la energía potencial que se genera al cambio de alturas. Al ser que la altura 1 es igual a la altura 2, estos términos se eliminan y la ecuación se simplifica:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 \quad (11)$$

Despejando la presión 2 y sustituyendo los datos de la tabla 7.

Velocidad Salida v2	50.00 m/s
Velocidad Entrada v1	3.40 m/s
Presión Atmosférica P1	78130.0 Pa
Densidad ρ	0.910 Kg/m ³

Tabla 7 Magnitudes para Determinar la Presión

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 - \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2$$

$$P_2 = 77124.43 \text{ Pa} = 77.12 \text{ kPa}$$

Ahora se saca la diferencia entre presiones:

$$P_1 - P_2 = 78130 - 77124.43 = 1005.57 \text{ Pa}$$

$$= 1.01 \text{ kPa}$$

Se observó que, al reducir el área transversal, disminuye la presión y aumenta la velocidad.

Diseño de la Geometría del Colector

Hay dos formas para diseñar la geometría del colector. La primera es haciendo cálculos matemáticos usando una fórmula. La segunda (es la forma en la que se hizo), fue utilizando el programa de Solid Works.

Primera Forma: Usando Formula

Se utilizó la fórmula de 5to orden polinómica del modelo de Brassard, asegurando la condición de que la primera y segunda derivada son cero a la entrada y a la salida. Dando la ecuación 12:

$$h = [-10(\xi)^3 + 15(\xi)^4 - 6(\xi)^5](h_i - h_o) + h_i \dots\dots\dots (12)$$

$$\xi = \frac{X}{L}$$

Dónde:

- ξ = Razón de Longitud
- X = Longitud del Colector Parcializada en Pequeños Tramos (m)
- L = Longitud del Colector (m).
- h_i = Altura del Colector en la Entrada de Aire a Partir del Eje de Simetría (m)
- h_o = Altura del Colector en la Salida de Aire a Partir del Eje de Simetría (m)

En la Figura 2 se podrá apreciar las cotas y forma del colector para poderlo sustituir en la ecuación 12.

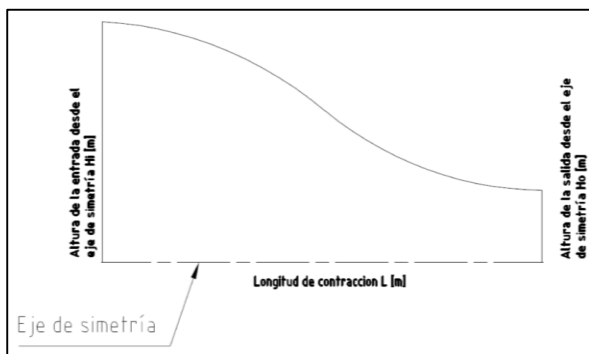


Figura 2 Geometría del Colector

Las medidas del colector están dadas por la tabla 8:

Longitud L	0.600 m
Longitud de Entrada h_i	0.300 m^2
Longitud de Salida h_o	0.175 m^2

Tabla 8 Cotas del Colector

Sustituyendo los datos en la ecuación 11, nos genera la Figura 3 que es la forma que deberá de tener el colector.

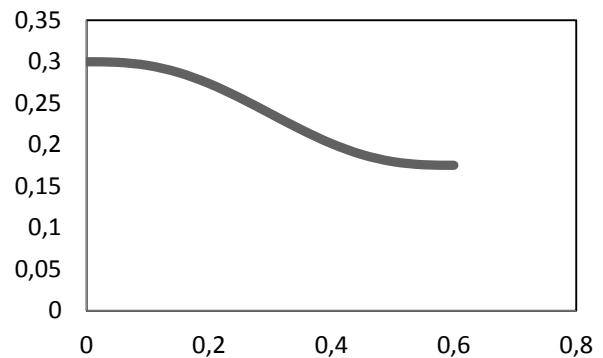


Figura 3 Forma del Colector

Segunda Forma: Usando SolidWorks

Se dimensiona el colector con los datos de la tabla 9 y se empieza a dibujar.

Longitud L	0.600 m
Área de Entrada A1	0.360 m^2
Área de Salida A2	0.1225 m^2

Tabla 9 Tamaño del Colector

Se dibujó en SolidWorks en dos partes, partiendo de la mitad de la longitud (30 cm) se hizo un cubo con el área de salida y otro cubo después con la otra mitad de entrada y su área respectiva (Figura 4).

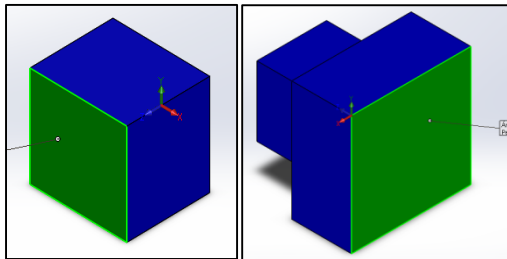


Figura 4 Primera y Segunda Mitad del Colector

Después se usó la función de redondeo hasta el máximo (Figura 4) que permitiera el programa en el área de salida (por que tiene la menor área del colector), una pasando cierto límite, el programa no permite realizar la operación (Figura 5).

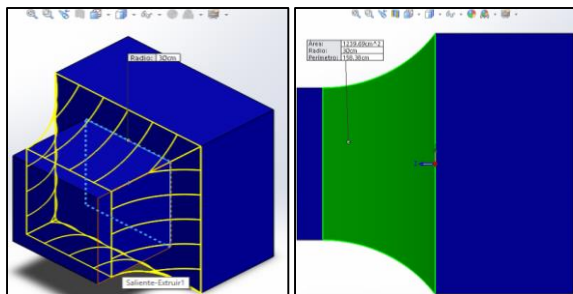


Figura 5 Redondeo del Área de Salida

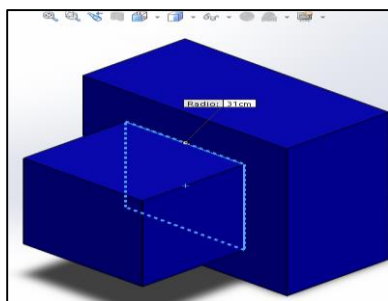


Figura 6 Pasando el Límite del Redondeo

Se vuelve a usar la función de redondeo, pero ahora para el área de entrada, con la diferencia de que en este no se va a usar el máximo radio de redondeo, sino va a ser igual al radio de redondeo de salida (Figura 7) para generar una curva igual para que sea tangente a la primera curva.

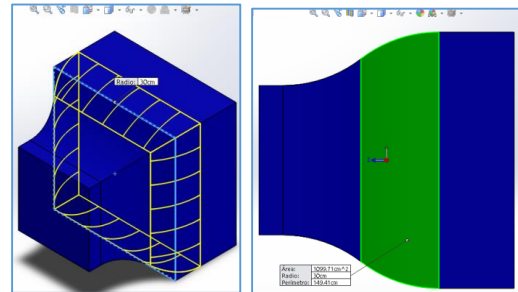


Figura 7 Redondeo del Área de Entrada

Se puede apreciar más de cerca las curvas del colector en la Figura 8, que son parecidas a las que se obtuvieron con el método matemático.

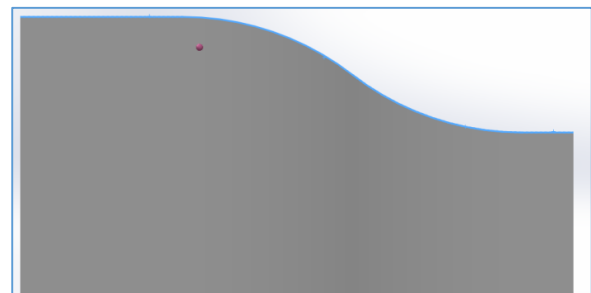


Figura 8 Curvas del Colector

Calculo de Perdidas en el Colector

La pérdida de energía es directamente proporcional a la velocidad del fluido al fluir alrededor de una contracción como el colector. Los valores experimentales de pérdidas de energía generalmente se reportan en coeficientes de resistencia (**k**), de la siguiente manera:

$$hf = k_c \frac{v^2}{2g} \tag{12}$$

Dónde:

- hf = Coeficiente de Perdida menor
- k = Coeficiente de Resistencia

Para saber el valor **k**, depende de la proporción de los tamaños de los conductos como también la magnitud de la velocidad de flujo. En la Figura 9 se muestran las cuatro configuraciones de los conductos y el valor sugerido de **k** para cada una.

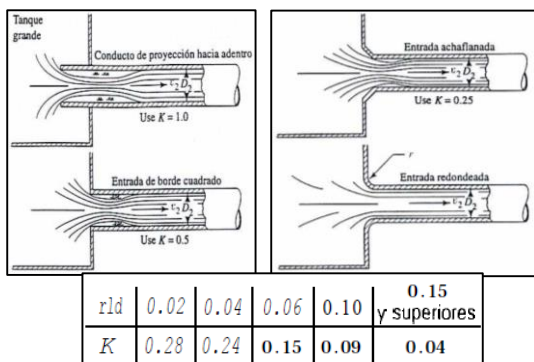


Figura 9 Coeficiente de Resistencia a la Entrada. Conducto de Proyección hacia adentro

(a), Entrada Achaflanada (b), Entrada de Borde de Cuadrado (c) y Entrada Redondeada (d).

Se uso la “Entrada Redondeada” para saber el valor de **k** donde se conoce el radio del colector con lo que se hizo el conducto y también se sabe el diámetro de la salida. Por lo tanto, se tiene:

$$\frac{r}{d_s} = \frac{30}{35} = 0.86$$

Con el resultado de 0.86 y viendo la tabla de la Figura 9 (d), que dice que diferencias mayores de 0.15, el valor del coeficiente de perdida es **k= 0.04**, ese es el valor que sustituiremos en la ecuación 12 de pérdidas y, utilizando los datos de la tabla 10 se obtendrá su valor.

Coefficiente Resistencia k	de	0.04
Velocidad v		50.00 m/s
Gravedad g		9.78 m/s ²

Tabla 10 Datos para la Ecuación de Perdidas del Colector

$$hf = 5.11 m$$

Mallas de Rectificado del Flujo

Se ubica al inicio de todo el túnel de viento y sirve para rectificar el flujo de aire que ingresara. Está compuesto por mallas que deben de estar montadas firmemente, de lo contrario pueden pandearse notablemente, perturbando la capa limite. Existen distintos tipos de perfiles de mallas como son el hexagonal (panel), circular y cuadrada (como se pueden ver en la Figura 10). Una malla también refracta el flujo incidente hacia la normal local y reduce la intensidad de turbulencia en todo el campo de flujo.

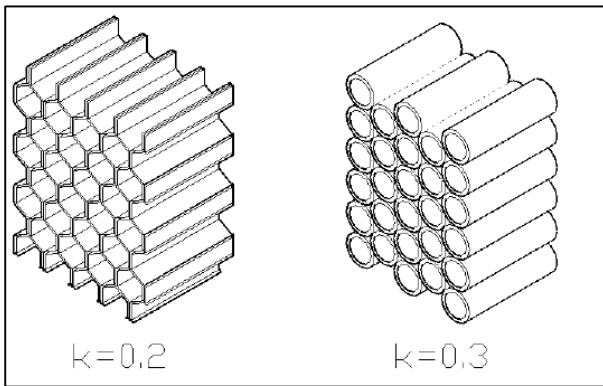


Figura 10 Coeficiente de Pérdidas

Calculo de Perdidas en las Mallas

El modo de encontrar el coeficiente de resistencia *k* va a depender del tipo de malla que se elija. De los tres tipos (Figura 9) el que menos resistencia se opone es el de forma hexagonal (Panal), pero su fabricación es un poco complicada, por lo que se optó por la forma circular.

Se volverá a utilizar la ecuación 4.13 de pérdidas menores que se utilizó en el colector, pero ahora, la velocidad no será la de 10 m/s, sino, se utilizara la velocidad de entrada que se calculó con anterioridad, teniendo entonces:

$$hf = k_L \frac{V^2}{2g}$$

Dónde:

- k_{df} = Coeficiente de Perdidas de la Malla.

Usando los datos de la tabla 11 y sustituyendo los en la fórmula de perdidas, se tiene:

Coeficiente de Resistencia K	0.30
Velocidad de Entrada v	17.01 m/s
Gravedad g	9.78 m/s ²

$$hf = 4.44 \text{ m}$$

Tabla 11 Datos para la Ecuación de Perdidas del Mallado

Difusor

El difusor disminuye la velocidad de flujo de aire lentamente para evitar la separación de la capa límite que se va a llegar a formar en la cámara de pruebas. La forma más conveniente es una expansión gradual para reducir las pérdidas y evitar la turbulencia manteniendo así un flujo uniforme en el túnel.

Para hacer los cálculos y la dimensionar el colector con una expansión gradual que se encuentran definidas por la cámara de pruebas y el tamaño del ventilador axial. La longitud del difusor queda limitada a tener un ángulo (Figura 11) no mayor a 2.5° definido por la relación de áreas.

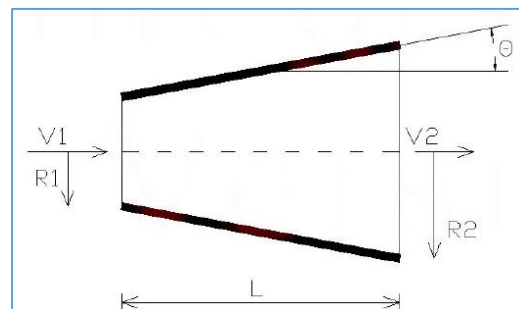


Figura 11 Difusor

Como la sección de entrada es rectangular y la salida es circular, viendo la Figura 13 se utiliza **R1** como la mitad del diámetro hidráulico a la entrada del difusor, **R2** como la mitad de la circunferencia a la salida del difusor y **L** como la longitud que los separa. De esta forma, se obtiene la siguiente ecuación para calcular el ángulo:

$$\theta = \arctan\left(\frac{R_2 - R_1}{L}\right) = \arctan\left(\frac{1}{2} \frac{\sqrt{A_R - 1}}{\frac{L}{D_1}}\right) \quad (13)$$

Dónde:

- R_2 = Radio hidráulico de la sección final (m).
- R_1 = Radio hidráulico de la sección inicial (m).
- L = Longitud de la sección (m).
- D_1 = Diámetro hidráulico
- A_R = Relación de áreas A_2/A_1

Se tienen los valores del área circular como del área rectangular y se pueden ver en la tabla 12.

Área de Entrada (Circular) R2	0.130 m^2
Área de Salida (Rectangular) R1	0.1225 m^2

Tabla 12 Relación de Áreas del Difusor

Dichos valores se sustituyen para obtener la relación de área:

$$A_R = \frac{A_2}{A_1} = \frac{0.13}{0.1225} = 1.03$$

El difusor tendrá una longitud de **80 cm**, con esto, se tienen todos los valores para llenar la tabla 13 y poder sustituirlos en la ecuación 13.

Relación de Áreas A_R	1.03
Longitud L	0.80 m
Diámetro Hidráulico D_h	0.35 m

$$\theta = 2.01^\circ$$

Tabla 13 Ángulo del Difusor

Este ángulo es bastante aceptable por no superar los 2.5° que se había planteado.

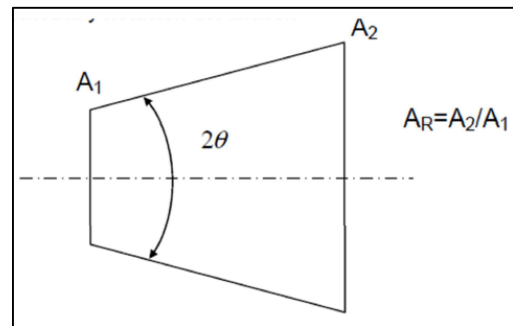


Figura 12 Difusor

Viendo la Figura 12, se multiplica dos veces el ángulo (2θ) para tener el ángulo interno y buscar en la figura 13 el valor del coeficiente de pérdidas k .

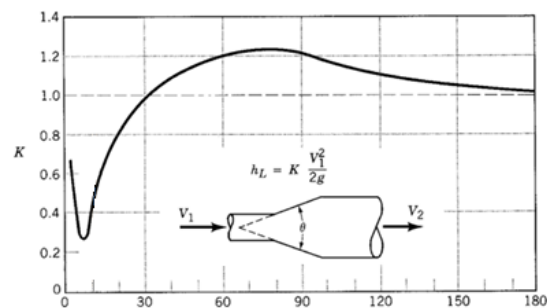


Figura 13 Coeficiente de Pérdidas en una Expansión Gradual

Dado el que el ángulo es $\theta = 4.02^\circ$, entonces se localiza el coeficiente de pérdidas en la Figura 13 obteniendo un valor aproximado de $k = 0.34$.

El cálculo de pérdidas se da por la ecuación 14:

$$hf = k_{dif} \frac{v_3^2}{2g} \quad (14)$$

Dónde:

- k_{dif} = Coeficiente de Pérdidas
- v^2 = La Velocidad de Salida del Difusor

La velocidad de salida del difusor es una incógnita nueva, pero se puede calcular con la ecuación de continuidad o con los caudales que deben ser los mismos a lo largo de todo el túnel:

$$V_{Dif} = V_{Cám Pru} * \frac{A_1}{A_2} \quad (15)$$

Dónde:

- V_{Dif} = Velocidad del Difusor
- $V_{Cám Pru}$ = Velocidad de la Cámara de Pruebas
- A_1 = Área de Entrada del Difusor
- A_2 = Área de Salida del Difusor

Sustituyendo los datos:

$$V_{Dif} = 50 \left(\frac{m}{s} \right) * \frac{0.1225 m^2}{0.13 m^2}$$

$$V_{Dif} = 48.74 m/s$$

Sustituimos todos los datos de la tabla 14 en la ecuación 15 para obtener las pérdidas.

Coeficiente de Resistencia k	0.340
Velocidad de Salida v	48.74 m/s
Gravedad g	9.78 m/s ²

$$hf = 41.30 m$$

Tabla 14 Pérdidas en el Difusor

Finalmente, se calcula la presión a la salida del difusor conociendo la presión a la entrada, que es la misma a la salida en la cámara de pruebas. Teniendo en cuenta otra vez la ecuación de Bernoulli:

$$P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \gamma \cdot z_2 = P_3 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_3^2 + \gamma \cdot z_3 \quad (16)$$

Simplificando la ecuación porque tanto el peso específico y la altura ($\gamma \cdot z$) no varían y tampoco la densidad del aire, queda la ecuación como:

$$P_2 + \frac{1}{2} v_2^2 = P_3 + \frac{1}{2} v_3^2 \quad (17)$$

Despejando la P_3 (presión en el difusor) nos quedamos con:

$$P_3 = P_2 + \frac{1}{2} v_2^2 - \frac{1}{2} v_3^2 \quad (18)$$

Dónde:

- P_2 = Presión de Entrada
- v_3^2 = Velocidad de Salida del Difusor
- v_2^2 = Velocidad de Entrada del Difusor

Sustituyendo los datos de la tabla 15 en la ecuación 18, sabremos la presión a la salida.

Presión Entrada P2	78130.00 Pa
Velocidad de Salida V3	9.75 m/s
Velocidad de Entrada V2	50.00 m/s

$$P_3 = 78192.15 \text{ Pa} = 78.19 \text{ Kpa}$$

Tabla 15 Datos para Calcular la Presión en el Difusor
Con esto, vemos que la presión de salida va a aumentar ligeramente a la presión de entrada

El reajuste de los cálculos para una mejor eficiencia en el Túnel de Viento. Por eso fue que se compró un ventilador/extractor axial industrial de 1/4 HP, que da la potencia necesaria para alcanzar tanto la velocidad como el caudal.

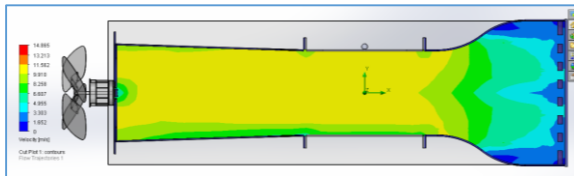


Figura 14 Análisis del desempeño del túnel de viento

En la figura 15 se puede observar el túnel de viento ensamblado.



Figura 15 Túnel de viento armado

Instrumentación y Control

A continuación, se mencionaron los equipos que se adquirieron:

Máquina de humo

Se compró una máquina de humo marca “STEELPRO” de 500 Watts de potencia (Figura 16). Esta máquina es muy útil debido a su gran potencia y al rápido calentamiento del líquido se pueden hacer descargas continuas de humo sin tener que esperar bastante tiempo a que recargue.



Figura 16 Máquina de Humo

Variador de Frecuencia (Dimmer)

Los variadores de frecuencia para un motor monofásico son muy difíciles de conseguir y tienen un costo muy elevado. Para esto se buscó fabricar un dimmer que soportara el amperaje que genera el motor al arranque. Así que se calculó la corriente que necesita el motor tomando en cuenta que es de ¼ de HP.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{186.50}{127} = 1.47 \rightarrow \text{redondeando} \rightarrow 1.50 \text{ A} \quad (19)$$

La corriente que necesita el ventilador para el arranque es de **1.50A**, pero algunos de los motores al momento del arranque generan un consumo tres veces la corriente con la que funciona normalmente, teniendo así un consumo de **4.50A** (aunque este motor cuenta con un capacitor, toma en cuenta los 4.50A).

Con estos cálculos se dibujó y fabricó un dimmer que soportara la capacidad de corriente del motor, pero aun con todo y los cálculos, no soportó el arranque del motor y quemó el circuito a la segunda prueba.

Pruebas de funcionamiento.

Primero se probó la funcionabilidad del túnel de viento midiendo la velocidad del viento con un anemómetro en cada sección del túnel y después esa velocidad se comparó con las que se obtuvieron en la simulación de SolidWorks y en la memoria de cálculo. Se verá a continuación en la tabla 16:

Parte del Túnel	Velocidad Real (m/s)	Velocidad Simulación (m/s)	Velocidad Memoria de cálculo (m/s)
Colector	3.40	3.30 – 4.95	3.40
Cámara de Pruebas	7.00	9.91 – 11.56	10.00
Difusor	9.80	9.91 – 11.56	9.75
Ventilador	12.00	S/N	S/N

Tabla 16 Velocidades en el Túnel de Viento

Después se colocaron objetos en la cámara de pruebas para observar mejor su aerodinámica y ver el efecto del viento que ejercía sobre ellos a distintas velocidades. Se probaron turbinas de gas, agua y vapor, pero como la línea de viento es irregular en la cámara de pruebas, se tuvo que buscar donde el viento chocaba con ellas para aprovechar su máximo desempeño.

Turbina de Agua

La primera turbina en probar fue la turbina de agua. En esta turbina se puede observar como el viento impacta sobre la turbina y esta a su vez rota, pero también tiene cierta aerodinámica, pero a penas y se percibe.



Figura 17 Modelo de turbina de agua

Turbina de Vapor

La segunda turbina en probarse fue la de vapor. Esta turbina fue la que mejor desempeño tuvo, solo encontró la corriente de viento y rotaba con bastante facilidad y se observó con el humo que la turbina aprovecho al máximo el viento.



Figura 18 Modelo de turbina de vapor

Turbina de Gas

La última turbina en hacerle pruebas fue la de gas. En esta no se pudo encontrar el flujo de viento capaz de hacer que girara. Esto sucedió a que el tipo de alabes que tienen estas turbinas necesitan una corriente de flujo tangencial para hacerlas rotar. Lo único que se pudo ver en esta prueba fue como aerodinámicamente la turbina cortaba el humo.



Figura 19 Modelo de turbina de gas

Agradecimiento

Se agradece el apoyo de:

- Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, al área del PAPIIT
- Técnico Rosendo Méndez Gallo
- Diseñador Industrial Felipe Cornejo Cárdenas

Conclusiones

Pese a no cumplir los objetivos principales, los resultados que se alcanzaron son satisfactorios teniendo una mínima pérdida a lo largo del túnel y pudiendo hacer pruebas aerodinámicas a objetos. A continuación, se mencionarán las conclusiones a las que se llegaron:

- La memoria de cálculo es súper importante, esta da una apreciación mejor de qué tipo de ventilador se va a necesitar para alcanzar una determinada velocidad, también da la optimización de un diseño geométrico para tener el mínimo en pérdidas y aprovechar al máximo el túnel de viento
- El diseñar y hacer simulaciones del túnel de viento en SolidWorks, ayuda a visualizar el resultado que se quiere llegar. No solo eso, se puede comprobar en parte los cálculos que se realizaron antes y ver qué tan lejos o cerca se estuvo al momento de realizarlos.

- La velocidad en la cámara de pruebas fue un objetivo no alcanzado. esto sucedió a que el rendimiento no sea el adecuado sobre la superficie del colector y el difusor no fuese lisa por la mala aplicación de la fibra de vidrio al no tener conocimientos de métodos para hacer los moldes del difusor y el colector (como usar espuma de poliuretano) y tener un mejor acabado; también si no se hubiera usado resanador ni espuma (cosas que hicieron que aumentara su masa) vieran sido ligeras las partes (otro objetivo que no se alcanzó).

Otros factores que pueden influir es la potencia de 1/4 de HP del ventilador y que, aunque se le hizo una cubierta, esta no tiene un sellado total, haciendo que tenga fugas y no se aproveche su máxima potencia.

- No se puede apreciar la aerodinámica de objetos porque el humo le hace falta densidad, pero en objetos grandes se aprecia con bastante nitidez.

Recomendaciones

Se va a cambiar de ventilador por uno más potente y con mayor velocidad, es necesario volver a rediseñar y construir el difusor y colector del túnel para evitar mayores pérdidas. Si se vuelven a construir, será con una mejor técnica hacer los moldes y colocar la fibra de vidrio u otro material que vaya a ser empleado para así mejorar considerablemente el túnel.

- Construir una mesa para tener el túnel de viento en una superficie nivelada (los planos se agregarán en el anexo).
- Modificar la máquina de humo de tal modo que funcione como el túnel de Marey para apreciar mejor la aerodinámica o hacer un hilo de humo que enfoque mejor sobre la superficie de los objetos a observar.

- Buscar la manera más práctica de calcular la velocidad del viento. No solo eso, también, hacer la balanza aerodinámica en la impresora 3D y utilizar galgas extensiométricas o sensores que calculen la presión del viento sobre un objeto y la fuerza que se genera sobre de él. Los resultados deberán ser por sección del artículo.

Referencias

- Dassault Systèmes, S.A. (2016) Manual SolidWorks Corp.
- Acevedo Vélez, F. (2006). Diseño de un Túnel de Viento para Prueba de Ventiladores y Perfiles Aerodinámicos. Medellín, Colombia.
- Brassard, G. (2000). Fundamentos de Algoritmia. Montreal, Canada Prentice Hall.
- Chicago Blower Argentina S.A. (2006). Clasificación de los Ventiladores. Recuperado el 4 de Diciembre de 2015, de http://www.chiblosa.com.ar/spanish/herramientas/teoria_de_los_ventiladores.htm#definiciones
- Chicas Molina, F. E. (2012). Diseño y Construcción de un Túnel de Viento. Antiguo Cuscatlán, El Salvador.
- Club AERODYNE IUT CACHAN. (4 de Abril de 2013). Association d'Etudes & Réalisations en Optimisation Dynamique & Energétique. Recuperado el 12 de Octubre de 2015, de Vernissage de L'exposition : Les Souffleries 100 Ans Après Eiffel: <http://aerodyne-cachan.blogspot.mx/2013/04/vernissage-de-lexposition-les.html>
- Coët, M.-C., Chanetz, B., & Peter, M. (29 de 01 de 2013). Gustave Eiffel, pionnier de l'aérodynamique. 3AF.
- Cruz Fierro, C. F. (6 de Enero de 2006). Instituto Tecnológico de Durango. Recuperado el 10 de Enero de 2016, de Formularios: <http://tecno.cruzfierro.com/formularios/estimacion/viscosidad-rev6>
- Damljanović, D. (2012). Gustave Eiffel and the Wind: A Pioneer in Experimental Aerodynamics. Scientific Technical Review, 62(3-4), 3-13.
- Eiffel, G. (1914). Nouvelles recherches sur la résistance de l'air et l'aviation faites au laboratoire d'Auteuil. Paris: H. Dunot et E. Pinat.
- Mannoni, L. (2004). Mouvements De L'air, Etienne-Jules Marey, Photographe Des Fluides. (Gallimard, Ed.) Art et Artistes.
- Potter, M. C., & Wiggert, D. C. (2007). Mecánica de Fluidos (Tercera ed.). Distrito Federal, México: Thomson.
- Resnick, R., & Halliday, D. (1971). Física (Parte 1). Distrito Federal, México: CESCOSA.
- Smithsonian Institution. (1913). Curtiss & Eiffel Awarded Langley Medal. Washington DC, United State: Chronology of Smithsonian History.
- Tippens, P. E. (1997). Física: Conceptos y Aplicaciones (Quinta ed.). D. F., México: McGraw-Hill.

Instrucciones para autores

[Título en Times New Roman y Negritas No.14]

Apellidos en Mayúsculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayúsculas -2do Nombre de Autor
Correo institucional en Times New Roman No.10 y Cursiva

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

Resumen

Título

Objetivos, metodología

Contribución

(150-200 palabras)

Abstract

Title

Objectives, methodology

Contribution

(150-200 words)

Keywords

Indicar (3-5) palabras clave en Times New Roman y Negritas No.11

Cita: Apellidos en Mayúsculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayúsculas -2do Nombre de Autor. Título del Artículo. Título de la Revista. 2017, 1-1: 1-11 – [Todo en Times New Roman No.10]

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Instrucciones para autores

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]

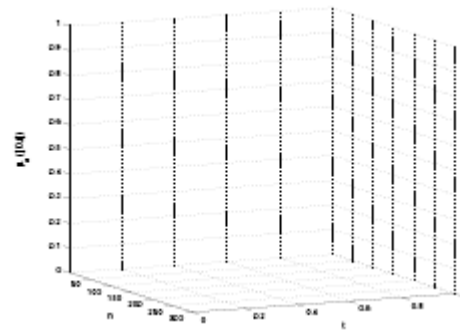


Gráfico 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

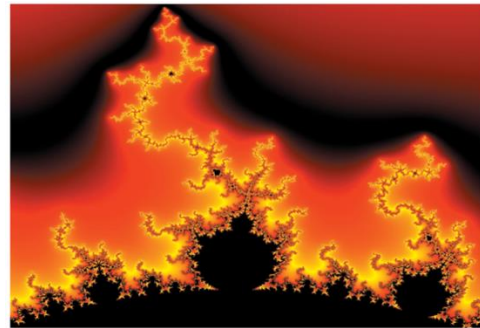


Figura 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

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.

Instrucciones para autores

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.

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

Formato de Originalidad



Taipei-Taiwan a ____ de ____ del 20____

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables por lo que deberán firmar los autores antes de iniciar el proceso de revisión por pares con la reivindicación de ORIGINALIDAD de la siguiente Obra.

Artículo (Article):

Firma (Signature):

Nombre (Name)

Formato de Autorización



Taipei-Taiwan a ____ de ____ del 20 ____

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables. En caso de ser aceptado para su publicación, autorizo a ECORFAN- Taiwan a difundir mi trabajo en las redes electrónicas, reimpresiones, colecciones de artículos, antologías y cualquier otro medio utilizado por él para alcanzar un mayor auditorio.

I understand and accept that the results of evaluation are inappealable. If my article is accepted for publication, I authorize ECORFAN- Taiwan to reproduce it in electronic data bases, reprints, anthologies or any other media in order to reach a wider audience.

Artículo (Article):

Firma (Signature)

Nombre (Name)

Revista de Innovación Sistemática

“Modelado dinámico del circuito RLC usando análisis numérico”

CAMACHO-ALTAMIRANO, Ulices, MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma y JUÁREZ-TOLEDO, Carlos

Universidad Autónoma del Estado de México

“Automatización y control de una línea de ensamble de transmisores clicker con robots de seis grados de libertad y PLC”

SALAZAR-OLIVA, Lilia Rosa, MAYORQUIN-ROBLES, Jesús Antonio, MEDINA-MUÑOZ, Luis Arturo y ROBLES-VERDUZCO, Carlos Benigno

Instituto Tecnológico de Nogales

“Análisis experimental y numérico de la transferencia de calor de un cambiador compacto”

LÓPEZ-CALLEJAS, Raymundo, VACA-MIER, Mabel, TERRES-PEÑA, Hilario y LIZARDI-RAMOS, Arturo

Universidad Autónoma Metropolitana

“Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango”

GONZÁLEZ, Mario Humberto, RODRÍGUEZ-MUÑOZ, Norma Alejandra, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio

Centro de Investigación en Materiales Avanzados

“Control de un sistema mecatrónico mediante señales mioeléctricas”

CASTILLO-QUIROZ, Gregorio, VELAZQUEZ-APARICIO, Mahali, OLVERA-SOLIZ, Moisés y GONZAGA-LICONA, Elisa

Instituto Tecnológico Superior de Huauchinango

“Construcción de un túnel de viento”

FRANCO-MARTINEZ, DAVID y RAMIRES-SILVA, Pablo

UNAM

