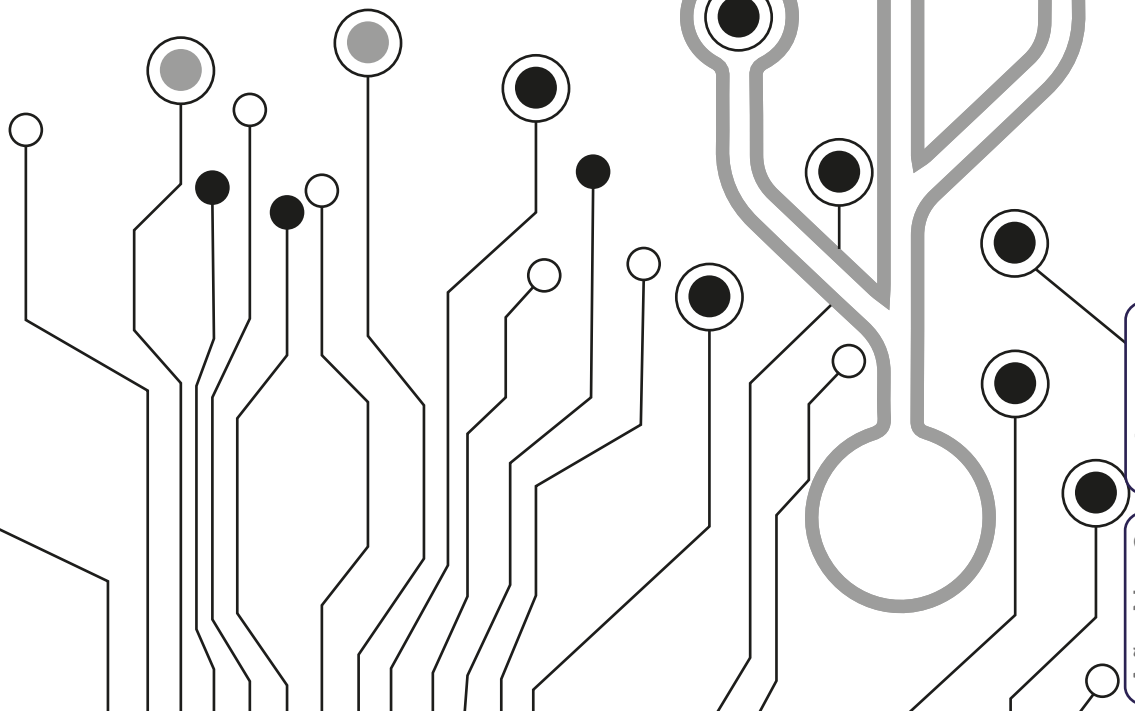
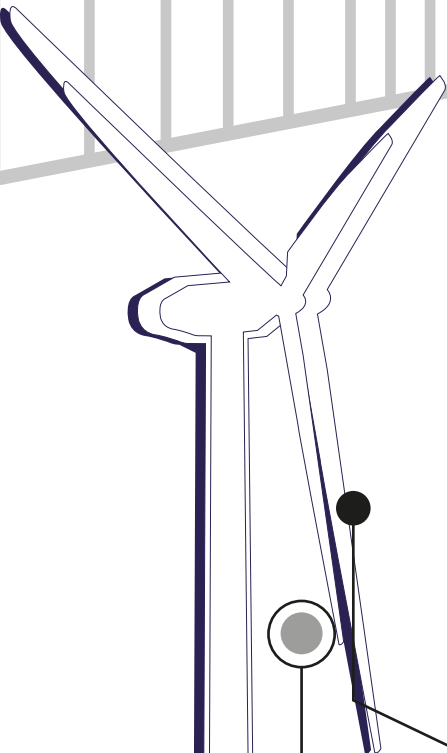
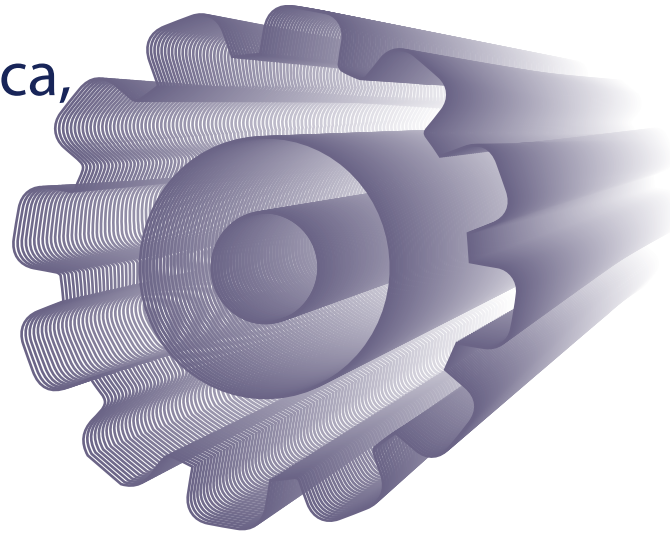


# Revista

Congreso Nacional de Mecatrónica,  
Tecnologías de la Información,  
Energías Renovables  
e Innovación Agrícola 2015



Congreso Nacional de Mecatrónica, Tecnologías de la Información, Energías Renovables e Innovación Agrícola, Año 2, No 2, septiembre 2014 - septiembre 2015, es una publicación anual editada por el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, a través de las divisiones de Ingeniería Mecatrónica, Ingeniería en Sistemas Computacionales, Ingeniería en Energías Renovables e Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable, Domicilio Conocido S/N El Saucillo Huichapan, Hidalgo, CP 42411, tel 7617248080, [www.iteshu.edu.mx](http://www.iteshu.edu.mx), [iteshu@iteshu.edu.mx](mailto:iteshu@iteshu.edu.mx), editor responsable: Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, reserva de derechos al uso exclusivo No 04-2014-101513315200-203, ISSN 2395-8510, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, Diseñada e Impresa por Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Domicilio Conocido S/N El Saucillo Huichapan, Hidalgo, CP 42411, Municipio de Huichapan estado de Hidalgo, este número se terminó de digitalizar el 30 de septiembre de 2015 con un tiraje de 800 ejemplares, distribuidos en forma gratuita.

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

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

## COMITÉ EDITORIAL

Ing. María Angélica Bravo Cadena  
Presidenta del Comité Editorial  
[mabravo@iteshu.edu.mx](mailto:mabravo@iteshu.edu.mx)

Ing. Justo Juan Manuel Martínez Licona  
Coordinador General  
[jmartinez@iteshu.edu.mx](mailto:jmartinez@iteshu.edu.mx)

Lic. Marcos Mendoza Hernández  
Coordinador Académico Científico de Ingeniería en Sistemas  
Computacionales  
[mmendoza@iteshu.edu.mx](mailto:mmendoza@iteshu.edu.mx)

Dr. Donaji Jiménez Islas  
Coordinador Académico Científico de Ingeniería en Energías  
Renovables e Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable  
[djimenez@iteshu.edu.mx](mailto:djimenez@iteshu.edu.mx)

Mtro. Sergio Quintanar García  
Coordinador Académico Científico de Ingeniería Mecatrónica  
[squintanar@iteshu.edu.mx](mailto:squintanar@iteshu.edu.mx)

## Revisor

Dr. Ciro F. Flores Rivera

Dr. Omar Arturo Dominguez Ramirez

Dr. Luis Morales Velázquez

Dr. Jorge N. Gracida Rodriguez

Dr. Donaji Jiménez Islas

Dr. Joel Suárez Cansino

M. C. Luis Felipe Serna Hernández

M en C. José Miguel Hernández Paredes

MGP. Sergio Quintanar Garcia

Dr. German Cuya Simbro

Mtro. Jorge Alberto Azuara Jiménez

Lic. Jenny Virgilio León

Mtra. Gabriela Maribel Jiménez Chacón

M. C. Francisco Escorza Pérez

Ing. Eleazar Campero Ángeles

Ing. Carlos Arturo Espinoza Galicia

Ing. Ricardo Francisco Guillén Mallette

Ing. Erick Hernández Nájera

Lic. Marcos Mendoza Hernández

## Institución

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Hidalgo.

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Universidad Autónoma de Querétaro

Universidad Autónoma de Querétaro

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Universidad Autónoma de Hidalgo

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Universidad Politécnica de Huejutla

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

**Energías Renovables**

Dimensionamiento de Campo Solar para Climatización de una Piscina Semi-Olímpica.....	1
Diseño de Prototipo Didáctico para Extracción de Aceite De Higuierilla Para la Producción de Biodiesel.....	7
Estimación y Medición De La Radiación Solar en la Universidad Tecnológica de Salamanca para su Utilización En Sistemas Fotovoltaicos.....	11
Efecto del aceite vegetal sobre el crecimiento de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> durante la fermentación alcohólica.....	16
Diseño de un concentrador solar multipropósito, controlando variables de temperatura y posición.....	19

**Innovación agrícola**

Efecto de las cerdicompostas de excretas de cerdos pelones mexicanos en el crecimiento del maíz.....	25
--	----

**Mecatrónica**

Estudio de la Variación de Constantes en el Modelo de Fricción de LuGre.....	35
Estado Físico de la Planta, Paradigmas de Identificación Experimento en Motor de Corriente Directa. ....	40

**Robótica**

Modelado matemático de un robot tipo PHANTOM Premium.....	46
Diseño y Construcción de un brazo Antropomórfico de 3 Grados de libertad (GDL).....	51
Comunicación Serial Maestro - Esclavo entre Microcontroladores para el Control Articular de Una Estructura Robótica de 3 Grados de Libertad.....	56
Diseño de Un Robot Háptico Mediante Manufactura Concurrente.....	61
Control de posición PD con acción acotada arco tangente para un robot de 3GDL.....	65

**TIC's**

Turismo virtual como herramienta de rehabilitación motriz.....	70
Cálculo del polinomio de independencia de familias de grafos utilizando matrices de transferencia y sumas de Zykov.....	74
Bootstrap: Una Herramienta de software libre para el diseño Responsivo.....	79

## Dimensionamiento de Campo Solar para Climatización de una Piscina Semi-Olímpica

Araceli Godínez Chávez<sup>1</sup>, Antonio Téllez Federico<sup>1</sup>, Karla M. Velazquez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> División de Ingeniería en Energías Renovables e Innovación Agrícola Sustentable, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan,  
Domicilio conocido s/n El Saucillo, Hidalgo, 42411, México.  
agch\_ara@hotmail.com, jesustef@hotmail.com, kmvelazquez@iteshu.edu.mx

**Resumen**— El presente trabajo reporta la propuesta de dimensionamiento utilizando colectores solares de placa plana para la climatización de la piscina semi-olímpica del balneario San Joaquín, ubicada en el municipio de Ezequiel Montes, Querétaro. También se reporta el potencial del recurso solar de la localidad utilizando datos de la estación meteorológica “CEA-Ezequiel Montes”, del estado de Querétaro. Con base en los datos de radiación solar, se presentan dos propuestas de dimensionamiento de campo solar. La primera es considerando un escenario cien por ciento solar, es decir, que el sistema no posee un sistema auxiliar o de respaldo. La segunda propuesta, es un sistema híbrido que utilizaría el mismo tipo de colectores solares que en la primer propuesta, pero también utilizaría una caldera de gas L.P. como sistema de auxiliar. Finalmente, es calculado el Retorno de la Inversión (ROI) para ambos casos.

**Abstract**— This paper reports the proposal sizing using flat plate solar collectors for heating of a the semi-Olympic pool in the Spa San Joaquin, located in the municipality of Ezequiel Montes, Queretaro. The solar potential of the town was calculated using data from the weather station "CEA-Ezequiel Montes", the state of Queretaro is also reported. Based on the data of solar radiation, two proposals for dimensioning solar field are presented. The first stage is considering a hundred percent solar, (i.e., the system does not possess an auxiliary or backup system). The second proposal is a hybrid system that would use the same type of solar collectors in the first proposal, but would also use a gas boiler LP as auxiliary system. Finally, it is estimated the return on investment (ROI) for both cases.

**Palabras clave** — Colectores solares, Climatización de piscinas, Energía solar térmica, Energías Renovables.

### I. INTRODUCCIÓN

El actual sistema energético está basado en hidrocarburos, lo que ha generado serios

problemas de contaminación. Esto ha llevado a la búsqueda e implementación de nuevas fuentes de energía, que puedan satisfacer la demanda energética de la sociedad, pero de manera amigable con el medio ambiente.<sup>1</sup>

Las energías renovables son una excelente alternativa, pues sus ventajas fundamentales residen en su bajo impacto ambiental y el hecho de que no emiten gases de efecto invernadero. Algunas de éstas son la energía solar, la energía eólica y la energía de la biomasa, entre otras.<sup>2</sup>

La energía renovable más importante es la solar, y se divide en energía solar térmica y energías solar fotovoltaica. La energía solar térmica se basa en el aprovechamiento de la energía contenida en la radiación solar y su transformación en calor útil para obtener agua caliente o vapor, mismo que puede ser utilizado para diversas aplicaciones industriales. Las aplicaciones sanitarias de esta energía, permite reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, disminuir los costos asociados al gas L.P. y gas natural, y a aumentar la diversificación de las fuentes de energía, disminuyendo la dependencia exterior de países no productores de combustibles fósiles.<sup>3</sup>

Los sistemas de climatización solar de piscinas son una de las variadas aplicaciones de la energía solar térmica, además de ser una tecnología desarrollada y consolidada, pues los fabricantes llevan décadas produciendo colectores solares y debido a su continua innovación proporcionan productos cada vez más eficientes.<sup>4</sup> Sin embargo, las aplicaciones de la energía solar térmica no es algo nuevo, de hecho un invento fundamental en la historia de ésta, fue la “caja negra”, creada por el naturalista suizo Horace de Saussure en 1767 quien se inspiró en el efecto invernadero y decidió potenciar al máximo el efecto, para comprobar qué temperatura lograba alcanzar. Para ello dispuso una caja acristalada con el interior pintado de negro y todas las caras, excepto la acristalada, contaban con una capa aislante que retenía el calor producido en su interior, logrando alcanzar una temperatura de 109 °C.<sup>5</sup> Con base en todo lo anterior, se propone la implementación de colectores solares de placa plana para la

climatización de la piscina semi-olímpica, pues logrará calentar el agua a una temperatura de confort, pero disminuyendo los costos asociados al combustible, además de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

*A. Localización geográfica y características del lugar*

El municipio de Ezequiel Montes está ubicado al centro del Estado de Querétaro en la latitud Norte 20° 39'53'' y en la longitud Oeste 99° 53' 58'' y se encuentra a 1978 msnm. Su superficie es de 298.27 km<sup>2</sup>, ocupando en extensión el penúltimo lugar entre los 18 municipios. Limita al Norte con Toliman (12.7 km); al Este y Noreste limita con colinda con Cadereyta (51.8 km) y al Sudeste con el estado de Hidalgo (9.5 km).

Las condiciones meteorológicas del lugar corresponden a una temperatura promedio del de 16.2 °C, con una velocidad de viento promedio de 29 km/hr y una humedad de 56%.

1) *Ubicación de la piscina semi-olímpica* La piscina está ubicada dentro de las instalaciones del balneario San Joaquín, el cual se encuentra en el km 12 de la carretera Tequisquiapan-Ezequiel Montes y cuenta en total con 6 piscinas.

Fig. 1 Vista de las piscinas del Balneario San Joaquín.



La piscina cuenta con un volumen de agua de 438.75 m<sup>3</sup>, misma que posee una temperatura de confort de 31 °C. La piscina opera 8 horas al día.

*B. Recurso solar disponible del lugar*

Para realizar un dimensionamiento de campo solar, un factor considerable es el recurso solar disponible del lugar. Para fines de este proyecto, los datos que se muestran en la tabla I, fueron tomados de la estación meteorológica “CEA-

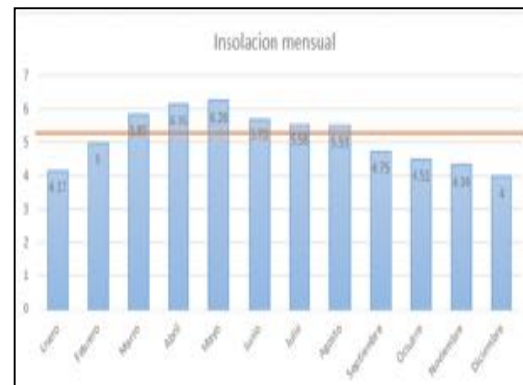
Ezequiel Montes<sup>69</sup> perteneciente al estado de Querétaro con una media de 22 años.

TABLA I  
DATOS DE IRRADIACIÓN MENSUAL

Meses	Irradiación (kWh/m <sup>2</sup> )
Enero	4.17
Febrero	5
Marzo	5.85
Abril	6.15
Mayo	6.26
Junio	5.73
Julio	5.58
Agosto	5.53
Septiembre	4.75
Octubre	4.51
Noviembre	4.34
Diciembre	4

Los meses con mayor irradiación corresponden a Marzo, Abril y Mayo. El promedio de irradiación anual en la zona es de 5.15 kWh/m<sup>2</sup> y tal como se observa en la figura 2, los meses por debajo del promedio (línea naranja) corresponden a Enero, Febrero, Septiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre.

Fig. 2 Irradiación anual promedio de Ezequiel Montes, Qro.



Estos meses son relevantes para el cálculo del dimensionamiento, pues se debe calcular la energía faltante no abastecida por la irradiación solar de la zona para esos meses.

**II. MATERIALES Y MÉTODOS**

El procedimiento utilizado para el dimensionamiento de este proyecto, está basado en la norma ambiental NADF-008-AMBT-2005<sup>6</sup>, que establece las especificaciones técnicas para el aprovechamiento de la energía solar en el calentamiento de agua en albercas,

fosas de clavados y regaderas, entre otros servicios sanitarios. A continuación se presentan las dos propuestas de dimensionamiento de colectores solares de placa plana, como posibles opciones de climatización de la piscina semi-olímpica.

**A. Características del colector seleccionado para el dimensionamiento**

El colector seleccionado corresponde a la marca Chromagen modelo CR-120, mismo que posee las especificaciones mostradas en la tabla II. Es importante mencionar que el captador posee un tiempo de vida útil de 20 años.

TABLA II  
CARACTERÍSTICAS DEL COLECTOR

Especificaciones	Modelo CR-120
Área bruta (m <sup>2</sup> )	2.80
Abertura efectiva (m <sup>2</sup> )	2.60
Largo (cm)	219
Ancho (cm)	129
Peso (kg)	51
Presión de operación (bar)	10
Eficiencia térmica máx. (%)	82

**B. Caso cien por ciento solar**

El primer paso consiste en determinar el número de captadores solares. Considerando el volumen de agua de la piscina y su tiempo de operación, se procede a calcular el gasto mediante la ecuación 1:

$$G = \frac{V}{hrs\ de\ uso} \quad Ecu. 1$$

Donde  
G es igual al gasto de agua por hora (l/hr)  
V es el volumen del agua (l)

Posteriormente se calcula la energía requerida mediante la ecuación 2:

$$E_R = \Delta T * G \quad Ecu. 2$$

Donde  
 $\Delta T$  es igual a la pérdida de temperatura nocturna en el agua establecida en la norma.  
 $E_R$  es la energía requerida por el sistema.

Posteriormente se calculó la eficiencia del colector, evaluándolo con las condiciones climáticas del lugar, por lo que se utiliza la ecuación de diseño del colector solar mostrada en la ecuación 3:

$$x = \frac{T_m - T_a}{G} \quad Ecu. 3$$

Donde  
x es la eficiencia del colector  
 $T_m$  es la temperatura media del fluido  
 $T_a$  es la temperatura ambiente  
G es la constante solar de 1000 W/m<sup>2</sup>

Conociendo la energía requerida, la eficiencia del colector y la irradiación crítica del lugar (4 kWh/m<sup>2</sup>) se procede a calcular la superficie requerida mediante la ecuación 4:

$$S = \frac{E_R}{I * \eta} \quad Ecu. 4$$

Donde  
S es la superficie requerida  
I es la irradiación crítica del lugar  
 $\eta$  es la eficiencia del colector

**C. Caso híbrido solar-gas L.P.**

Este propuesta consiste en tener un sistema de calentamiento para piscina mediante energía solar, pero con un sistema auxiliar de gas L.P. Considerando la temperatura mínima del agua de 24 °C, una temperatura deseada de 31 °C y la irradiación promedio del lugar de 5.15 kWh/m<sup>2</sup> Considerando que la energía solar requerida es igual a la irradiación promedio multiplicada por los 365 días del año, obteniendo una energía requerida de 1881.57 kW/día.

Retomando la Figura 1 se puede observar que debajo de la línea naranja (línea del promedio de irradiación anual), existen meses en los que no se alcanza la irradiación promedio, por lo que se suman los faltantes de energía solo para esos 6 meses, obteniendo un total de 4.16 kWh/m<sup>2</sup>. Por lo que se procede a calcular la energía requerida de acuerdo a la ecuación 6:

$$E_R = \frac{(energía\ faltante) * (30\ días) *}{(meses\ faltantes)} \quad Ecu. 6$$

La energía requerida anual, representa un 100% con 1,881.575 kWh/día, por lo que ahora se procede a determinar cuánto representa 748.8 kWh/día, del total del porcentaje, lo cual equivale a 39.79%.

Una vez obtenido el porcentaje de equivalencia, se obtienen 523,735.87 kcal/día, por lo que se selecciona el sistema auxiliar, en



este caso una caldera de gas L.P. que cubra tal requerimiento. Considerando 8 horas de trabajo del balneario, se obtiene una razón de 65,466.98 kcal/hra misma que deberá ser la capacidad de salida de la caldera.

La caldera AFJ-II-1200 tiene una capacidad de entrada de 73,595 kcal/hr y una capacidad de salida de 66,000 kcal/hr.

Es importante enfatizar que la energía requerida restante, correspondiente al 60.21% será cubierta con colectores solares, misma que corresponde a 792,514.12 kcal/día.

*1) Selección de la caldera para el cálculo del costo sin proyecto*

La selección de la caldera está dada en función de las calorías de salida, misma que a su vez está dada por las correcciones de combustible, eficiencia de la caldera y metros sobre el nivel del mar del lugar.

Retomando un  $G=54,843.75$  l/hr y un  $\Delta T=7$  °C, se obtiene una  $E_R = 383,906$  kcal/hr. Partiendo de este dato se realiza el primer ajuste, como se muestra en la ecuación 7:

$$Ajuste\ calentador = \frac{E_R}{F_{CC}} \quad Ecu. 7$$

Donde  $F_{cc}$  es el factor de corrección de la caldera correspondiente a 0.8.

Posteriormente se realiza la corrección dada por la ecuación 9:

$$Ajuste\ combustible = \frac{Ajuste\ calentador}{FF_{comb}} \quad Ecu. 9$$

Donde  $FF_{comb}$  es el factor de corrección de combustible correspondiente a 0.91.

Finalmente, se realiza la corrección correspondiente a la altura del lugar. Considerando que la capacidad de las calderas se disminuye un 4% por cada 300 msnm, y que el municipio de Ezequiel Montes se encuentra a 1978 msnm, se obtiene una capacidad de salida de la caldera de 527,343.75 kcal/hr.

Con base en este dato, se seleccionó una caldera MASSTERCAL AFJ-II 2800 EE, la cual tiene una capacidad de entrada de 705,600 kcal/hr y una capacidad de salida de 627,984 kcal/hr.

Una vez establecidas las características del calentador, se procede a calcular el consumo de gas L.P. anual, el cual es útil para el cálculo del retorno de inversión. Este cálculo está dado por la ecuación 10:

$$Consumo\ combustible = \frac{E_R}{P_c} \quad Ecu. 10$$

Donde  $P_c$  es el poder calorífico del gas L.P.

Sustituyendo los valores correspondientes se obtiene un consumo de 204.39 l/día.

Retomando la capacidad entrada y salida de la caldera, se obtiene la eficiencia de la misma de acuerdo a la ecuación 11:

$$\eta = \frac{capacidad\ salida}{capacidad\ de\ entrada} \quad Ecu. 11$$

Sustituyendo valores se tiene una eficiencia de 87%. Con base en esto, se calcula el consumo real de gas L.P. mediante la ecuación 12:

$$Consumo\ comb_{real} = \frac{consumo\ comb.}{\eta\ caldera} \quad Ecu. 12$$

Sustituyendo valores se obtiene un consumo de gas L.P. real de 234.93 l/día.

*D. Retorno sobre la inversión irradiación crítica*

El retorno de la inversión está dado por la ecuación 13, 14 y 15:

$$ROI = \frac{Inversión}{Ahorro} \quad Ecu. 13$$

$$Ahorro = costo\ sin\ proyecto - costo\ con\ proyecto \quad Ecu. 14$$

$$Costo\ sin\ proyecto = costo\ de\ la\ caldera + costo\ anual\ gas\ L.P. \quad Ecu. 15$$

Una vez establecidas las ecuaciones, se calculó el retorno de inversión para los dos casos.

**III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Una vez aplicada la metodología de acuerdo a la norma ambiental NADF-008-AMBT-2005 y el retorno de inversión de acuerdo a Van-horne, 2010<sup>8</sup>, se tiene que aplicando la ecuación 1 el gasto corresponde a  $G=54,843.75$  l/hr, obteniendo un total de energía requerida de 1,316,250 kcal/día.

De la ecuación 3 se tiene un resultado de 0.0113, mismo valor que se buscó en la gráfica de la curva de eficiencia del colector, para obtener una eficiencia de 79%. Con esta eficiencia se obtiene una superficie requerida de 484.42 m<sup>2</sup>, por lo que 187 colectores serán requeridos, teniendo un costo de inversión de \$ 5, 555, 400.00.

Sin embargo, para los meses faltantes, en los que no se alcanza a cubrir la energía requerida con energía solar y que corresponde a 748.8 kWh/día, se propone una caldera MASSTERCAL AFJ-II-1200 que tiene un costo de \$113,815.00.

Conociendo la energía requerida, la eficiencia del colector y la irradiación promedio del lugar, la superficie necesaria para la implementación del campo solar de los colectores, corresponde a 225.69 m<sup>2</sup>, por lo que se emplearían 87 colectores, teniendo una inversión de \$ 2, 600, 400.00.

Por otra parte, para realizar una comparación entre el caso cien por ciento solar y el caso con sistema de respaldo, se debe considerar el sistema convencional de calentamiento de agua, la cual sería una caldera más los costos asociados al gasto de combustible del mismo. La caldera seleccionada es MASSTERCAL AFJ-II 2800 EE, tiene un costo de \$228,450.00. Para esta caldera se obtiene un consumo de gas L.P. real de 234.93 l/día. Si se considera un costo del litro de gas L.P. en \$14.00 se tiene un costo anual del mismo de \$1, 200, 497.85

#### 1) Retorno de inversión para sistema cien por ciento solar

Considerando que para este caso se tendrán cero gastos en consumo de gas L.P. y que solo se tiene la inversión de los colectores solares (el costo por metro cuadrado es de \$10,553.00) y el costo de instalación, se tendría una inversión de \$5, 855,400.00.

El ahorro corresponde al costo sin proyecto, el cual es el escenario actual, que contempla la compra de una caldera para abastecer toda la energía requerida más los costos asociados al combustible consumido por dicha caldera, por lo que se tendría un ahorro de \$1,428,947.58 teniendo un retorno de inversión de 4.12 años.

#### 2) Retorno de inversión para sistema híbrido solar-gas L.P.

Para este cálculo se considera una inversión de \$2, 900, 400.00 considerando la compra de los 88 colectores más los gastos de instalación.

El ahorro contempla un costo sin proyecto de \$1, 428, 947.58 menos un costo con proyecto asociado a la compra de la caldera de respaldo que tiene un costo de \$113,815.00 más el gasto de combustible anual asociado a la misma y que corresponde a \$477,678.00, por lo que se tendría un ahorro anual de \$826, 754.58, otorgando un retorno de inversión de 3.5 años.

#### 3) Estructuras mediante el software Solid Works

Adicionalmente se realizó la simulación en el software Solid Works 2014 de la estructura (ver figura 3) y los arreglos básicos del campo solar (ver figura 4):

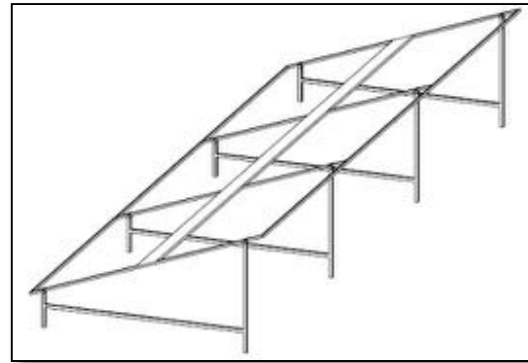


Fig. 3 Estructura de montaje de los colectores solares.



Fig. 4 Vista lateral de los colectores montados en la estructura.

## IV. CONCLUSIONES

De las dos propuesta presentadas, se cree que la más viable es la del sistema híbrido solar-gas

L.P. , esto debido al hecho de que a lo largo del año se tienen días nublados, afectando la eficiencia de los colectores. Sin embargo, con el sistema de respaldo se podría operar durante todo el año, con un costo mucho menor de gas L.P. El sistema híbrido estará cubriendo el 60.2% de las necesidades energéticas con los colectores solares, además de que la implementación de colectores solares representa un atractivo para los visitantes del balneario y por supuesto contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Con respecto a la recuperación de la inversión correspondiente a 3.6 años (menor al caso de la implementación cien por ciento solar) y considerando un tiempo de vida de los colectores de 20 años, se tendrían 16.4 años de energía gratuita.

#### REFERENCIAS

- [1] Velazquez, K. y Jaramillo, O. "Construcción y evaluación de un concentrador solar de canal parabólico para calor de proceso de baja entalpia". Instituto de Energías Renovables UNAM. Temixco, Morelos, 2015.
- [2] Estrada, C. e Islas, J. "Energías Alternas: Propuesta de investigación y desarrollo tecnológico para México". 1ra ed. Academia mexicana de ciencias, Cuernavaca, Morelos, 2010.
- [3] Sedigas. "Guía sobre aplicaciones de la energía solar térmica", 2013.
- [4] Richter, C. et al. "Energía solar térmica de concentración, perspectiva mundial 2009". Greenpeace, SolarPACES y ESTELA, Tabernas, España, 2009.
- [6] Kalogirou, S. A. Solar Energy Engineering: processes and systems, 1st Ed. Academic Press, U. S. A, 2009 (2015). The Weather Channel, L. CEA -Ezequiel MONTES IQUERETA30. Obtenido de <http://www.wunderground.com/personal-weather-station/dashboard?ID=IQUERETA30#radar>
- [7] Secretaría del medio ambiente. Norma ambiental para el Distrito Federal NADF-008-AMBT-2005. D.F., México, 2006.
- [8] Van-horne, J. Fundamentos de administración financiera. Décimo tercera edición. Editorial Prentice Hall. México, 2010.

## Diseño de prototipo didáctico para extracción de aceite de higuera para la producción de biodiesel

Jiménez-Hernández Guillermo <sup>1</sup>; Juan Olguin Camacho <sup>1</sup>; Venegas Sánchez Josué Addiel <sup>1</sup>.

*División de Ingeniería en Energías Renovables <sup>1</sup>Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Domicilio conocido El Saucillo, S/N, Huichapan, Hgo., México.  
gjimenez@iteshu.edu.mx*

### I. INTRODUCCIÓN

**Resumen**— En el presente trabajo se desarrolló el diseño de un prototipo didáctico para extracción de aceite de higuera con el propósito de usarse en la producción de biodiesel, en el cual se realizó un estudio de los métodos mecánicos de extracción de aceite de higuera. Se propone el diseño y construcción de un mecanismo, que permite la extracción del aceite de semilla de higuera, consumiendo la menor energía posible para realizar la extracción. En el diseño de la máquina extractora de aceite de semillas, se toman en cuenta diferentes factores para el diseño, como la potencia del motor, el mecanismo de trituración y compresión de la semilla, la velocidad con la que se transportara y las dimensiones ideales del equipo. Para mejorar la extracción se agrega calor mediante un concentrador solar, con el objetivo de reducir la viscosidad del aceite de la semilla de higuera.

**Abstract** In the present work the design of an educational prototype for extraction of castor oil for biodiesel production using a mechanical method was carry out. The design and construction of a mechanism that allows a more efficient extraction of castor seed oil, consuming the least possible energy for extraction is proposed. The design of the extraction machine seed oil, various design factors were taken into account, as the power output, the mechanism that crush and compress the seed, the speed of transporting and the ideal dimensions. To improve the extraction a heat source is added by a solar concentrator; in order to reduce the viscosity of the paste from the seeds of castor oil, therefore, achieve an increase of the oil concentration.

**Palabras clave** — *Biodiesel, Máquina extractora, Semilla de higuera.*

Durante la historia se han generado diferentes tipos de extracción para obtener el aceite de diferentes tipos de semillas. Unos de los procesos más relevantes son por presión, una vez que las semillas han sido molidas, son sometidas al prensado. Las prensas pueden ser hidráulicas, discontinuas y continuas [4].

En la actualidad la extracción por presión se lleva a cabo casi exclusivamente por prensas continuas, por la economía de sus instalaciones, pero no realiza una profunda extracción de las materias grasas contenidas en las semillas. En recipientes calentadores de doble fondo se calienta la pasta (semillas molidas) a temperaturas que oscilan entre 90 °C y 95 °C, dependiendo del material con que se trabaje. El calentamiento busca eliminar el exceso de humedad de la pasta obtenida, con lo cual se aumenta el rendimiento al lograrse mayores presiones y facilitarse la fluidez del material trabajado. Luego el material pasa a una cuba de acero, que posee en su interior un tornillo sin fin, en el cual, el número de espiras y el diámetro aumenta de un extremo al otro, viéndose el material obligado a pasar por espacios cada vez más reducidos, aumentando de esa manera la compresión se logra extraer el aceite.

Extracción por solvente, Este sistema se caracteriza por su gran rendimiento sobre los demás métodos, poco empleo de mano de obra y fuerza motriz, pero altos costos de producción. Permitiendo la recuperación del solvente utilizado. Para el eficaz cumplimiento de los fenómenos de ósmosis, difusión y extracción, la materia prima debe recibir una adecuada preparación. Esta consiste en el laminado de la misma, donde el material, sin sufrir extracción ni molienda, toma forma de láminas delgadas que favorecen la difusión. El disolvente usado es hexano, siendo este el más inofensivo para la salud y el que produce aceite más puros [4]; y el Sistema combinado, se hace una primera extracción utilizando el método por presión continua y luego una segunda extracción con solvente. En México cuando se usa solvente, se

utilizan sistemas mixtos, siendo poco común el uso exclusivo del método por solvente. Estos procesos de extracción son de los más utilizados, debido a su eficiencia ya que se obtiene un 6 ó 7% de aceite del total de masa utilizada. [16].

El aceite de higuera (ricino), es un producto de importancia a nivel mundial debido a las muchas aplicaciones que incluyen usos en medicina, cosméticos, tintas, jabones, desinfectantes, lubricantes, barnices y esmaltes. Sin embargo, la mayor proporción se destina para tratamientos de oxidación, hidrogenación, deshidratación, sulfonación, descomposición térmica, etc. De aquí se obtienen varios productos, entre ellos el nylon 11 y una espuma rígida de uretano. Su alta resistencia a las elevadas presiones le permite ser aprovechado como lubricante de aviones [22]. y principalmente para la obtención de biodiesel [23].

Para una mayor extracción del aceite de semillas oleaginosas se implementan un sistema que permita la extracción a un corto periodo con una eficiencia aceptable y a bajos costos de operación siendo un sistema viable para la generación de biocombustibles, esto por los métodos de solvente, por compresión y combinado; básicamente los métodos por solvente son aquellos que utilizan un solvente para separación del aceite de sus demás componentes dentro de la semilla; la compresión se caracteriza por la utilización de medios mecánicos como la utilización de un tornillo sin fin encargado de la trituración y la compresión de la semilla el ultimo método es la combinación de los dos procesos en los cuáles se aumenta la eficiencia [16].

Una maquina extractora de aceite es un dispositivo que comprime, tritura y extrae de manera mecánica el aceite está compuesta de un tornillo sin fin encargado de hacer presión, la carcasa que cubre los elementos interiores de la máquina y un moto reductor el encargado de brindarle la movimiento mecánico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó el diseño mecánico del prototipo de maquina extractora de aceite de higuera, se optó por utilizar un tornillo sin fin de hélice helicoidal, se realizó el cálculo de los esfuerzos a los que se sometió el sin fin, el momento flexionante y los esfuerzos cortantes y el torque, la velocidad de desplazamiento del tornillo sin fin y el flujo del material transportado.

Con los datos obtenidos mediante los cálculos se dimensiono la maquina en SolidWorks, se

realizó en diseño del tornillo sin fin y se simulo la concentración de esfuerzos en los elementos de la máquina.

Se construyó el prototipo de la máquina, para ello se obtuvo la presión de 30 MPa necesaria para comprimir la semilla, Se utilizó un eje de acero el cual tiene un módulo de elasticidad  $G=200$  GPa. Para la realización de pruebas de extracción se realizó con un filtro metálico en combinación con una válvula de alivio para controlar la salida del bagazo o pasta de la semilla de higuera.

### 2.1 materia prima

La semilla de higuera se obtuvo directamente de una cosecha, la cual se expuso al sol para retirar humedad durante 5 días, se sometió a un proceso de descascarado. Las muestras para las pruebas fueron medidas en cantidades 1 kg.

### 2.2 pruebas de extracción

Con la semilla previamente deshidratada con un porcentaje entre 5 y 10% de humedad para no obtener alta acidez [21]. Se llevó a cabo la extracción del aceite de la semilla de higuera se estudiaron 2 condiciones, sin calentamiento y con calentamiento por medio de un concentrador solar. Para el calentamiento con concentrador solar el rango de temperatura fue 60 a 90 °C. Medido mediante una cámara termográfica. Ya que si se incrementa la temperatura provocaría una alteración en la calidad y el color del aceite. Así mismo se estudió el efecto de extracción de aceite usando 1 kg de higuera como alimentación en la tolva en diferentes relaciones semilla/cascara en la maquina extractora como se especifica en la (tabla 1). La velocidad del tornillo sin fin se mantuvo constante para cada una de las pruebas a 60 rpm.

**Tabla 1.** Porcentajes de las pruebas

Prueba	% semilla	% cascara
1	100	0
2	50	50
3	70	30

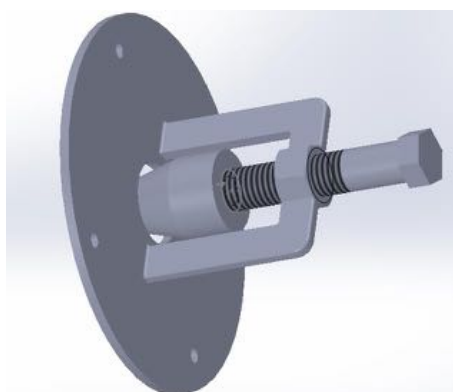
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los resultados obtenidos puede observarse que la maquina tiene un mejor rendimiento en la extracción con el precalentamiento de la maquina mediante el concentrador solar, en relación a la extracción sin precalentamiento de la misma como se observa en la tabla 2. Por otra parte, cuando la relación de semilla/cascara fue del 70/30 se logró una extracción de aceite de 45 y 100 g de aceite para el caso sin calentamiento y con calentamiento, respectivamente. En el caso donde se utiliza una relación 100/0 de semilla/cascara, la pasta no pudo ser comprimida, es decir, la semilla completa con su cáscara, ofrece la fricción necesaria entre el tornillo y las camisas que facilita la compresión en ellas. También esto puede deberse a la alta viscosidad que se genera en la mezcla. Por lo que la presencia de calor beneficia a la disminución de viscosidad y permite la fluidización de la pasta dentro de la máquina.

**Tabla 2.** Porcentajes de extracción

Prueba	% semilla	% cascara	aceite extraído en gramos
1	100	0	10
2	50	50	55
3	70	30	100

En el procedimiento de la extracción se colocó un filtro para que pudiera salir el aceite pero se determinó que no era suficiente, se agregó una válvula al final del filtro. figura 1. Para mejorar el proceso de extracción del aceite de la semilla de higuera



**Figura 1.** Válvula reguladora de bagazo (pasta)

**Tabla 3.** Porcentajes de extracción sin calentamiento y con calentamiento

sin calentamiento (sin concentrador solar)			
Prueba	% semilla	% cascara	Aceite extraído en gramos
1	100	0	3
2	50	50	25
3	70	30	45
Prueba con calentamiento (con concentrador solar)			
1	100	0	10
2	50	50	55
3	70	30	100

## CONCLUSIONES

Al extraer aceite, se optó por el diseño y construcción de un mecanismo, el cual permitió una forma sencilla de extracción del aceite de la semilla de higuera, el funcionamiento continuo de esta máquina facilita su operación y se obtiene un rendimiento aceptable, en comparación con a otras formas de extraer aceites vegetales. Además se determinó que en presencia de calor se mejoró la extracción del aceite de la semilla. Y que para llevar a cabo una mayor extracción del aceite la semilla tiene que llevar de un 20 a 50 % de cascara.

## REFERENCIAS

- [1] B. Dale, Biofuels: thinking clearly about the issues, *J. Agric. Food Chem.* 2008, 56, 3885–3891.
- [2] J. M. F. Johnson, M. D. Coleman, R. Gesch, A. Jaradat, R. Mitchell, D. Reicosky, W. W. Wilhelm, *Biomass-bioenergy crops in the United States: a changing paradigm*, *Am. J. Plant Sci. Biotechnol.* 2007, 1, 1–28.
- [3] T. Searchinger, R. Heimlich, R. A. Houghton, F. Dong et al. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change, *Science* 2008, 319, 1238–1240.
- [4] SENER 2012 <http://www.renovables.gob.mx/renovables/port al/Default.aspx?id=2179&lang=2>
- [5] Soto P. E. (2010), Next Fuel, [en línea]. Consultado, junio de 2014. <http://biodiesel.com.ar/3988/biodiesel-a-partir-de-aceite-vegetal-usado-disminuye-el-c02>

- [6] González C. D. M. Yáñez A. Y. M. (2012) "Diseño y construcción de un extractor sólido-líquido para la obtención de aceite de semillas de sambo y zapallo" obtención del título de: ingeniera química proyecto de titulación escuela superior politécnica de Chimborazo.
- [7] L. Mott Robert. Diseño de Elementos de Máquinas, 4ta Edición 2006.editorial Prentice Hall.
- [8] Recalde, P. E. R., Duran A. J. M. (2009) Cultivos Energéticos Alternativos. Centro iberoamericano de investigación y transferencia de tecnología en oleaginosas.
- [9] Restreo, M. L. Aceite de higuera [En línea]. Antioquia, Colombia. 2007. Disponible en [http://higuerillo.blogspot.com/2007\\_05\\_01\\_archive.html](http://higuerillo.blogspot.com/2007_05_01_archive.html).
- [10] González, C. (2003) cultivo, aprovechamiento y mercadeo de la higuera. Convenio UTP-GTZ. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [11] Lizana, D. Antecedentes generales sobre biodiesel. UNIZAR. Disponible en [http://www.ecodesarrollo.cl/descargas/Antecedentes\\_Biodiesel\\_D.pdf](http://www.ecodesarrollo.cl/descargas/Antecedentes_Biodiesel_D.pdf)
- [12] [http://www.energia.gob.mx/webSener/res/PE\\_y\\_DT/pub/Biocombustibles\\_en\\_Mexico\\_Estudio\\_Completo.pdf](http://www.energia.gob.mx/webSener/res/PE_y_DT/pub/Biocombustibles_en_Mexico_Estudio_Completo.pdf)
- [13] <http://maquinasextractorasdeaceitesvegetales.blogspot.mx/2011/06/vendo-maquinas-extractoras-de-aceites.html>
- [14] Carrión, M. L.M. y Castro P.V. D. (2008) Diseño y construcción de una maquina extractora de aceite de semillas para la elaboración de Biodiesel. Proyecto de Titulación. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [15] Castro, R. F. H. (2009) Diseño de una planta de extracción, semi-refinamiento y transesterificación de aceite de jatropha (*Jatropha curcas*). Tesis de ingeniería. Honduras.
- [16] Benavides, A. Y. (2004) Biodiesel de aceite de higuera. Una evaluación de su obtención y utilización. Trabajo dirigido de grado. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- [17] Barajas, C. L. (2004) Obtención de biodiesel a partir de la higuera (*ricinus communis*). 1er Seminario Internacional de Biocombustibles. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.
- [18] Santos, J. A (2013) Desarrollo de un equipo para la extracción de aceite a partir de la semilla de algodón, universidad pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. El Hombre y la Máquina No. 42 - 43, 1-50.
- [19] Pabón G. G., (2009) Estudio de las características botánicas y etnobotánicas, Universidad Católica del Ecuador, p.p. 9-24. *In*: Recalde P. E. R. y Durán A. J. M. Cultivos Energéticos
- [20] U. G. AKPAN, A. JIMOH, and A. D. MOHAMMED (2006) Extraction, Characterization and Modification of Castor Seed Oil. Leonardo Journal of Sciences pp 43=52
- [21] Cisneros, D., Díaz A. (2006). Obtención de aceite de la nuez caryodendronorinocense Originaria del departamento del caquetá en la planta piloto de la universidad de la salle. (tesis). Universidad de la salle, 87p.
- [22] López, L. B. (2002) Cultivos industriales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 493-495, 506, 512, 524p.
- [23] Memorias Primer Congreso Internacional de Higuera (2007). Abril 18 al 20 de 2007

## Estimación y medición de la radiación solar en la universidad tecnológica de salamanca para su utilización en sistemas fotovoltaicos

José Eduardo Flores Ortega<sup>1</sup>, Román Bravo Cadena<sup>1</sup>, Rufino Demillon Pascual<sup>1</sup>, Gildardo García Acosta<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica del Valle del Mezquital, Carr. Ixmiquilpan-Capula km.4 Col. El Nith, Ixmiquilpan, Hidalgo, México.

**Resumen**— Este trabajo expone un caso de estudio de la energía solar para generar energía eléctrica empleando un panel fotovoltaico en la Universidad Tecnológica de Salamanca, Guanajuato. Se estima la radiación solar utilizando la base de datos de METEONORM, se calcula la inclinación del plano para tener el máximo de radiación absorbida a lo largo del año, por un sistema de paneles fotovoltaicos fijos. Se realizaron mediciones de la radiación solar en la Universidad Tecnológica así como la radiación absorbida por un panel y su utilización para energizar un laboratorio informático. Se observó que las horas con más incidencia de energía solar son de 10:00 a 16:00 horas, en los meses de diciembre a junio se estima la mayor cantidad de radiación disponible, se tienen niveles superiores a los 800W/m<sup>2</sup> entre las 11:00 y 16:00 h. El resto del año, la radiación supera los 600W/m<sup>2</sup> o 700W/m<sup>2</sup> en el mismo horario. Para energizar 17 computadoras de un laboratorio informático se utilizarían un conjunto de 36 paneles fotovoltaicos, los cuales no solo se pueden utilizar como fuente de energía, también darían sombra al estacionamiento en un área de 22 m<sup>2</sup>.

### Abstract

This paper presents a case study of solar energy to generate electricity using a photovoltaic panel at the Technological University of Salamanca, Guanajuato. Solar radiation is estimated using the database METEONORM, the inclination of the plane for maximum radiation absorbed throughout the year, for a system of fixed solar panels is calculated. Solar radiation measurements at the Technical University and the radiation absorbed by a panel and use to power a computer lab were performed. It was observed that the hours with the highest incidence of solar energy are from 10:00 to 16:00 pm in the months of December to June more radiation available estimates, there are higher than 800W / m<sup>2</sup> levels between 11 : 00 and 16:00. The rest of the year, the radiation exceeds 600 W / m<sup>2</sup> and 700W / m<sup>2</sup> at the same time. To power 17 computers of a computer laboratory a set of 36 photovoltaic panels would be used, which not only can be used as an energy source, would also shade the parking lot in an area of 22 m<sup>2</sup>.

**Palabras clave:** Estimación de recurso solar, energía solar fotovoltaica, Energía solar, Inclinación de plano, electricidad.

### I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y la economía de mercado han aumentado la demanda de productos y energía, por lo que es necesario la incursión en nuevas fuentes de energía menos contaminantes, por lo que la utilización de la energía solar para la generación de electricidad, es actualmente una alternativa viable para el ahorro y la generación de electricidad.

La energía solar fotovoltaica ha sido identificada como una tecnología de rápido crecimiento con un potencial de aplicación alto, con una tendencia de crecimiento mayor del 20% en la última década [Mitchel *et. al.*, 2002]. En nuestro país se han identificado dos nichos importantes en donde dicha tecnología se puede aplicar: los sistemas autosustentados y los conectados a la red.

Los sistemas autosustentados representan casi el 100% del mercado nacional y se han estado instalando desde el inicio de los años 80's. Este tipo de sistemas ha tenido su mayor aplicación en el ámbito rural para impulsar acciones sociales siendo ejemplos típicos el Programa Pronasol 1988-1994 de electrificación, el Programa de TELEXMEX de Telefonía Rural 1990-1994, el programa de Energías Renovables para México USAID-SANDIA 1994-2000, y el Programa de Energías Renovables para la Agricultura del FIRCO-SAGARPA 2000-2005; entre otros. Los proyectos anteriores han sido implementados para abastecer de electricidad a comunidades alejadas de la red eléctrica convencional con el objeto de satisfacer la demanda de electricidad para aplicaciones específicas (iluminación básica y bombeo de agua)[CIE 2005].

Determinar primeramente el recurso energético que incide en la Universidad Tecnológica de Salamanca, es de vital importancia para la implantación de sistemas fotovoltaicos, acción que constituye el objetivo de este trabajo, para lo cual se analizó la energía que puede ser usada en los sistemas fotovoltaicos.



La energía solar es un recurso renovable, gratuito, con elevado índice de incidencia en el estado de Guanajuato, por lo que puede ser utilizada para diversas aplicaciones, destacándose la generación de electricidad. Se desea además, utilizar los paneles como techo para el estacionamiento de automóviles, aprovechando la sombra de sus estructuras de montaje.

En este trabajo se realiza un análisis sobre el recurso solar para la ubicación  $101^{\circ} 11'39''$  de arco, equivalentes a 6 horas 44 minutos y 46.5 segundos de longitud oeste y  $20^{\circ}34'22''$  de latitud norte, tomando como base la torre de la Iglesia de San Antonio. Su altura sobre el nivel del mar es de 1,721 metros. La ubicación corresponde a la Universidad Tecnológica de Salamanca, en la Cd. de Salamanca Guanajuato, México (UTS).

Salamanca (Xidoo o lugar de tepetate en otomí) es una ciudad del estado de Guanajuato, tiene una población de 260.769 habitantes y una zona metropolitana de 789.548 habitantes, según el último censo realizado en el año 2010.

El municipio de Salamanca se ubica en el llamado "Corredor Industrial del Bajío", asentada en un valle rodeado de cerros.

Al tratarse de una localidad enfocada primordialmente a la industria media y pesada, el medio ambiente se ha visto afectado, convirtiéndose en un tema de preocupación local, regional y nacional, llevando a las autoridades a la firma de acuerdos y convenios, para vigilar la cantidad de emisiones contaminantes.

El clima del municipio es semidesértico templado, en la mayor parte de su superficie. Se registra un promedio de  $21.4^{\circ}\text{C}$  [INEGI 2014]. Las condiciones climáticas influyen en la cantidad de radiación solar que incide en una superficie.

Se puede referir por recurso solar, a la energía que llega del Sol a la tierra en forma de ondas electromagnéticas, también es llamada Radiación Solar. La cantidad de radiación solar recibida por unidad de área, se le conoce como "irradiancia solar", sus unidades son  $\text{W}/\text{m}^2$ . Fuera de la atmósfera presenta un valor de  $1367 \text{ W}/\text{m}^2$ , definida como constante solar [Duffie y Beckman 1991], dentro de la atmósfera se atenúa y a nivel del mar alcanza valores promedio de  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ , valor que se utiliza para el diseño de sistemas fototérmicos y fotovoltaicos.

## II. EFECTO FOTOVOLTAICO

La conversión de la energía solar en energía eléctrica, se debe al fenómeno físico de la interacción de la radiación solar con los electrones en los materiales semiconductores, este fenómeno es llamado efecto fotovoltaico. El objeto físico en el que tiene lugar este fenómeno es la célula solar, que no es otra cosa, que un diodo con la característica esencial de tener una superficie muy amplia (unas decenas de  $\text{cm}^2$ ) y construido de silicio cristalino, en el caso del panel utilizado para las pruebas.

Algunos átomos en cristal de silicio se sustituyen con átomos de fósforo, elemento que tiene 5 electrones de valencia, 4 serán utilizados para enlaces químicos con átomos adyacentes de silicio, mientras que el quinto, puede ser separado del átomo de fósforo mediante energía térmica, y así, tener libertad de movimiento en el retículo del cristal.

Si suponemos que un fotón (partícula que constituye un rayo solar) entra en la región de tipo p del diodo, el fotón será absorbido y creará una pareja electrón-hueco. El electrón liberado se moverá hacia la derecha a causa del potencial eléctrico, si un fotón entra en la zona n, el hueco creado se moverá hacia la izquierda. Este flujo producirá una acumulación de cargas positivas en la izquierda y de cargas negativas en la derecha, dando origen a un campo eléctrico opuesto al creado por el mecanismo de difusión. Esta condición determina la tensión a circuito abierto de la célula fotovoltaica. [Guerra, Ballesteros, Heras 2008]

Finalmente, al fijar los electrodos (contactos metálicos) sobre la superficie de la célula, se puede utilizar el potencial creado.

## III. METODOLOGÍA

La cantidad total de radiación solar (directa y reflejada) que se recibe en un punto determinado del planeta, sobre una superficie de  $1\text{m}^2$ , para un determinado ángulo de inclinación entre la superficie colectora y la horizontal del lugar, recibe el nombre de irradiancia. [Gasquet 2004] Con la irradiancia, es posible estimar la cantidad de energía que puede generar un panel fotovoltaico.

La secuencia de trabajo es la siguiente:

A. *Estimación de la radiación solar en la Universidad Tecnológica de Salamanca.* En la figura 1, se muestra el número de horas de máxima radiación solar, para las diferentes zonas de México. Se puede

observar que la ciudad de Salamanca México, es de las zonas con mayor incidencia de radiación solar en centro y sur del país.



Figura 1. Horas pico de energía solar disponible en la República Mexicana ([www.nasa.gov](http://www.nasa.gov))

Para obtener la estimación de la energía solar en la Cd de Salamanca, se utilizó el software METEONORM, referencia meteorológica comprensible; que incorpora un catálogo de datos meteorológicos y procedimientos de cálculo para aplicaciones solares en cualquier localidad del mundo. En la versión actual, la mayoría de los datos se han tomado de GEBA (Global Energy Balance Archive), de la Organización Meteorológica Mundial, (WMO/OMM) Normales Climatológicas 1961–1990 y de la base de datos Suiza, compilada por MeteoSwiss (Solartronic, S.A. de C.V).

Introduciendo la ubicación en METEONORM (que es una referencia meteorológica comprensible; que incorpora un catálogo de datos meteorológicos y procedimientos de cálculo para aplicaciones solares, así como de diseño de sistemas para cualquier localidad en el mundo), e interpretando los datos con ayuda de TRNSYS y de Excel, se obtiene la radiación promedio diaria para planos horizontales e inclinados. La serie de pasos son: Introducir en METEONORM la localidad, obtener datos meteorológicos así como datos solares representativos, agregar los datos a base de datos, que será extraída con la ayuda de TRNSYS y graficada con Excel.[Ortega, Bravo, Carbajal. 2014].

B. *Inclinación óptima de un sistema fotovoltaico fijo para captación de recurso solar.* Una vez estimada la radiación, es necesario realizar la orientación de los paneles fotovoltaicos de acuerdo al movimiento aparente del sol, se pretende que la mayor parte del tiempo, el sistema fotovoltaico reciba los rayos solares en forma perpendicular. En particular, para este caso se busca el máximo de captación de energía con el mínimo costo, se propone un sistema fijo. Con la

radiación estimada a lo largo de todo el año, se hace un comparación de irradiancia incidente en un plano inclinado a diferentes ángulos y con ayuda del software EES, se obtiene la inclinación más apropiada que debe de tener el panel fotovoltaico para el máximo de absorción. Para salamanca la inclinación del panel fotovoltaico deberá de estar a los 20° orientado al Sur, para absorber el máximo de radiación sin seguidores solares.

C. *Medición de la radiación solar en la Universidad Tecnológica de Salamanca.* Una vez obtenida la inclinación del sistema fotovoltaico, se procede a medir la radiación para plano inclinado, en las coordenadas geográficas 20° 29' latitud norte y 99° 13' longitud oeste Se midió la radiación solar utilizando el MacSolar V4, de la empresa alemana SOLARC, Innovative Solarprodukte GmbH, el cual está certificado y calibrado de acuerdo a las normas CE/EN50081, EN50082 y IEC904/3. El tiempo de medición de la radiación para plano inclinado fue de un año, considerando la inclinación óptima para captar el recurso solar en el colector.

D. *Medición de radiación absorbida por el panel fotovoltaico.* Se Midió la energía absorbida en un panel de la marca Solarex, modelo SX75U, con las características: Max. sys. Oper. Volt-600V, Min. Bypass Diode if 8A, series fuse 20A, stc@1000 W/m<sup>2</sup> Las especificaciones eléctricas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características eléctricas de panel fotovoltaico SX75U

Panel Fotovoltaico modelo SX75U	
Cell Temp.	25 °C
P <sub>máx</sub>	75W
V <sub>oc</sub>	20.7 V
I <sub>sc</sub>	4.97A
I <sub>pmax</sub>	4.54A.

El voltaje, corriente y potencia eléctrica, fueron medidos utilizando el equipo Heme Analyst-2060 de la empresa Lem y el 1000A 3-Phase Power Analyzer/Datalogger Modelo 382090 de la empresa Exttech Instruments para analisis de potencia eléctrica.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvo la estimación de la radiación promedio diaria para planos horizontales, utilizando el software METEONORM como base de datos, TRNSYS para extraer la información y Excel para su representación gráfica.

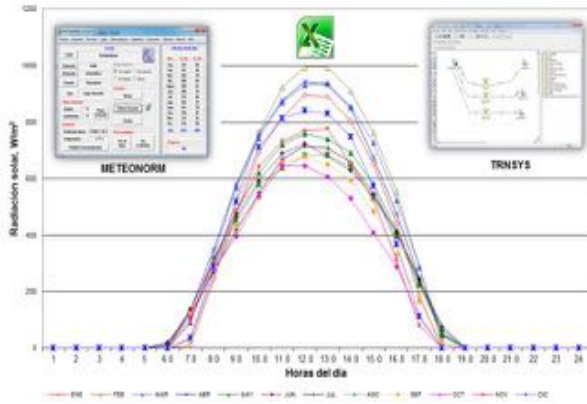


Figura 2. Radiación anual estimada para un plano con una inclinación de 20°34', en Salamanca, Guanajuato

Como se observa en la figura 2, las horas con mas incidencia de energía solar son de 10:00 a 16:00 horas, en los meses de diciembre a junio se estima la mayor cantidad de radiación disponible, se tienen niveles superiores a los 800W/m<sup>2</sup> entre las 11:00 y 16:00 h. El resto del año, la radiación supera los 600W/m<sup>2</sup> en el mismo horario.

Con la información de la radiación a lo largo del año, se obtiene la inclinación óptima para absorber el máximo de energía solar del panel: entre los 30° y 35° hacia el sur (Figura 3). Se coloca el panel con una inclinación de 20° en dirección al sur.

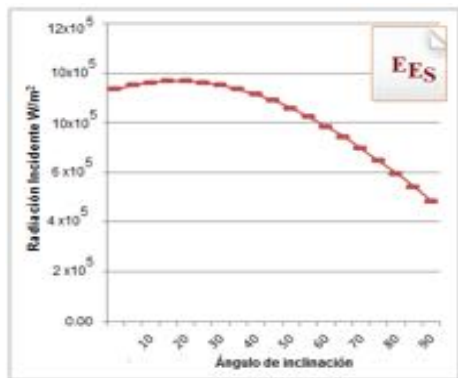


Figura 3 Radiación incidente en un Panel en Salamanca según su ángulo de inclinación

Una vez colocado el panel fotovoltaico, se mide la radiación incidente. Véase figura 4.

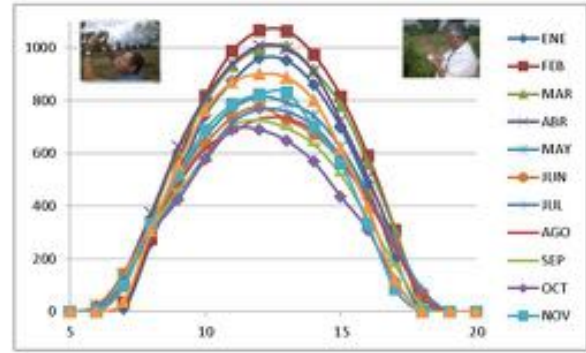


Figura 4 Radiación anual medida para plano con una inclinación de 20° en Salamanca, Guanajuato.

Se observa de la figura 4, que se tienen mediciones de radiación solar incidente en el plano inclinado superiores a los 1000W/m<sup>2</sup>, en el mes de febrero, marzo y abril en las horas cercanas al medio día solar, y mediciones superiores a los 600W/m<sup>2</sup> entre 10 y 15h prácticamente cualquier día soleado del año.

En el panel fotovoltaico, con un área de 0.6102m<sup>2</sup>, se midió I<sub>sc</sub> de 4.97A con un voltaje de 19.2V y potencia de 95.42W (obtenida a partir de la expresión  $P = VI$ , al dividir esta potencia entre el área del panel, resulta[Duffie y Beckman 1991]:

$$I = \frac{95.42 \text{ w}}{0.6102\text{m}^2} = \frac{156.375\text{w}}{\text{m}^2} \quad (1)$$

entonces

$$n = \frac{156.37\text{w}/\text{m}^2}{982\text{w}/\text{m}^2} = 0.159 \approx 16\% \quad (2)$$

que es un valor aproximado a las eficiencias de conversión del orden del 16% en producción en línea de soldas policristalinas de Si, teniéndose eficiencias record en celdas experimentales de hasta del 24.7% [Green *et. al.*, 2002].

Se tiene un laboratorio de computo con 17 computadoras instaladas, con las siguientes características:

No	Equipo	Cantidad	Hrs/ Dia	Potencia (W)	Vn (V)	Ic (A)	Ecl (A-H)
1	CPU Dell de 529 Watts c/u	17	5	8993	127	7	595
2	Monitor Dell de 150 Watts c/u	17	5	2550	127	1.5	128
				<b>11543</b>			<b>723</b>

Utilizando la Ecuación (3) [Tiwari, Dubey, 2010] se obtiene el tamaño del arreglo,

$$N_p = \frac{E_c F_s}{H_p I_m \eta_c \eta_i \eta_{CB}} \quad (3)$$

donde

**Ec** es la energía total a consumir por las cargas en A-h,

**Fs** es el factor de sobredimensionamiento (5% al 10%),

**Hp** recurso solar disponible en horas-pico,

**Im** corriente del módulo en el punto de máxima potencia bajo condiciones STC.

**η** es la diferencia en el manejo de energía.

Tomando la referencia del panel fotovoltaico SX75U y las consideraciones: ηw Cables (97%), ηc controlador (97%), ηI Inversor (95%), ηb coulombica en batería (95%), el recurso solar disponible para Salamanca Gto. con un valor promedio de 5.5 y sustituyendo en la ecuación (3), se obtiene un numero de 35.632 paneles.

## V. CONCLUSIONES

De las mediciones, se observa que los niveles de radiación solar son superiores a los 900W/m<sup>2</sup> tres meses al año en las horas cercanas al medio día solar, también se observan niveles de radiación promedio superiores a los 600W/m<sup>2</sup> entre 4 y 5 horas durante cualquier día soleado del año. Estos resultados son favorables y pueden ser considerados en la utilización de sistemas fotovoltaicos.

Realizando una analogía, se midieron niveles de radiación incidente, aproximada de 9 focos de 100W en un metro cuadrado, en las horas pico en los meses de enero y febrero.

Al incidir radiación solar en el panel Solarex, modelo SX75U, se calculó que puede absorber 15.9% de la radiación solar incidente, para el caso de suministrar energía a un laboratorio, con 17 computadores, se utilizarían un conjunto de 36 paneles los cuales no solo se pueden utilizar como fuente de energía, también darían sombra al estacionamiento en un área de 22 m<sup>2</sup>.

Cabe mencionar, que el nivel de contaminación en Salamanca Gto., es un tema de debate en esta región, por lo que, la utilización de sistemas fotovoltaicos es una alternativa viable para la generación de energía limpia, que puede ser utilizada no solo como sistemas energéticos, sino también como sistemas que otorguen otro tipo de prestaciones, como la protección para autos contra deterioro ambiental.

## Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). Anuario estadístico y geográfico de Guanajuato 2013 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía.—INEGI. ISBN 978-607-494-899-8. México, 2014.
- [2] Duffie, J.A. y Beckman, W.A.. "Solar Engineering of Thermal Processes". Ed. John Wiley & Sons, (2ª Edición), ISBN: 0-471-22371-9. New York, EEUU. 1991
- [3] Hector L. Gasquet. Conversión de la Luz Solar en Energía Eléctrica. Manual Teórico y Práctico sobre los Sistemas Fotovoltaicos. Solartronic, S.A. de C.V. SOL/DT-002-04. México. 2004.
- [4] Flores Ortega, José Eduardo. Bravo Cadena, Román. Carvajal Mariscal, Ignacio. Estimación Y Medición De La Radiación Solar En El Valle Del Mezquital Para Su Utilización En Sistemas De Deshidratación. CONAMTI 2014. ITESHU. ISSN: 2395-8510. Mexico. 2014
- [5] Jan Remud And Stefan Kuns, Meteorolog 5.1, Meteorolog Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern. Pág. WEB [www.meteorolog.com](http://www.meteorolog.com) 2004.
- [6] CIE. Vision a Largo Plazo Sobre la Utilizacion de las Energias Renovables en Mexico. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. México. 2005
- [7] Green M. A., Emery K., Bucher K., King D. L., and Igari S. "Solar cell efficiency tables (version 19); Prog. Photovolt. Res. Appl., 7, 321-326. 2002
- [8] Guerra Plasencia, Ignacio. Ballesteros Perdices, Mercedes. Heras Celemin, María Del Rosario. Fuentes de energía para el futuro. MEPSYD. Secretaría General Técnica. ISBN:978-84-369-4675-8. España. 2008.
- [9] Tiwari, G. N. Dubey, Swapnil. Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications. RSC Energy Series No. 2. ISBN: 978 1 84973 020 4. Cambridge, UK. 2010.

## Efecto del aceite vegetal sobre el crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae* durante la fermentación alcohólica.

Torres Cruz Brenda, Venegas Sánchez Josué Addiel, Jiménez Islas Donaji\*

División de Ingeniería en Energías Renovables e Innovación Agrícola Sustentable, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, domicilio conocido s/n El Saucillo Huichapan Hgo, México. \*djimenez@ithesu.edu.mx

**Resumen**— En el presente trabajo se analizó la producción de etanol a partir de jugo de betabel utilizando *Saccharomyces cerevisiae*. Se estableció como variable de estudio el efecto del aceite para mantener la anaerobiosis. Se cuantificó la biomasa y CO<sub>2</sub>. A partir de la cinética de CO<sub>2</sub> se determinó que durante las primeras 3 h no existe generación de CO<sub>2</sub> y posterior a ellas se obtuvo respiración en forma exponencial, sin embargo el proceso de respiración no tiene el mismo comportamiento cinético con respecto al crecimiento de la biomasa. La fermentación en presencia de aceite tiene menor crecimiento de biomasa con respecto a la fermentación con ausencia de aceite.

### Abstract—

In this work the production of ethanol was analyzed from beet juice using *Saccharomyces cerevisiae*. The effect of oil was evaluated to maintain anaerobic. Biomass and CO<sub>2</sub> was quantified. From data kinetics of CO<sub>2</sub> were determined that there is not generation of CO<sub>2</sub> and following them exponentially breathing was obtained during the first 3 h, but the breathing process has the same kinetic behavior with respect to biomass growth. The fermentation in the presence of oil is less growth from fermentation with no oil

**Palabras clave:** *Beta vulgaris*, CO<sub>2</sub>, velocidad específica, inmiscible.

## I. INTRODUCCIÓN

El consumo de combustibles fósiles ha contribuido a la contaminación del medio ambiente. Han surgido nuevas alternativas como: energía eólica, fotovoltaica, térmica, etc., además de algunos biocombustibles como el etanol, biohidrógeno y biodiesel.

Dentro de los biocombustibles, el etanol ha ganado interés en los últimos años como una nueva alternativa a los combustibles convencionales. El hecho de que el etanol se

pueda mezclar con la gasolina como un aditivo u oxigenante reduce el uso de combustibles fósiles y las emisiones del CO<sub>2</sub> (Jiménez *et al.* 2014). La producción de etanol se lleva a cabo mediante la síntesis química y biología a través del proceso de fermentación utilizando el desecho de algunas fuentes ricas de azúcares como el tallo del sorgo, frutas, caña de azúcar, remolachas, etc. (Jiménez *et al.* 2014).

Para que se lleve a cabo la fermentación alcohólica se utilizan microorganismos que ayuden a la degradación de azúcares como *Saccharomyces cerevisiae*. Durante la fermentación alcohólica se procura la anaerobiosis, lo que facilita el proceso de generación de alcohol y se reduce el crecimiento de biomasa a través de un proceso desasimilativo. Además, se puede agitar el medio sin necesidad de airear durante la fermentación. En el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto del aceite vegetal en el crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae* para la producción de etanol.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la cepa *Saccharomyces cerevisiae* a 30°C en medio YPD que contiene (g/L): extracto de levadura 10, peptona 20, glucosa 20 y agar 16 (para cajas Petri).

Para el crecimiento de la cepa se utilizaron matraces de 250 mL con 100 mL del medio líquido YPD estéril, el matraz se colocó en el shaker (IKA) y se incubó por 12 h, 130 rpm y 30 °C. Una vez transcurrido el tiempo del cultivo, se realizó la cuantificación de biomasa mediante la cámara Neubauer y se transfirió el volumen necesario del cultivo a 100 mL del medio YPD estéril inoculando  $1 \times 10^6$  cel/mL; posteriormente se incubó por 12 h, 130 rpm y 30°C. Se cuantificó el crecimiento de la levadura mediante cámara de Neubauer. Una vez determinada la concentración de biomasa se usó como inóculo para el jugo de betabel con una concentración inicial de  $1 \times 10^6$  cel/mL.

### 2.1 Sustrato

El betabel se lavó con agua directamente del grifo. Después se cortó para introducirlo al extractor de jugos. El gabazo y el jugo se obtuvieron a partir del extractor.

### 2.2 Fermentación alcohólica

La fermentación del jugo de *Beta vulgaris* se realizó en matraces Erlenmeyer de 500 mL. Cada matraz contenía 200 mL de jugo, se usó 50 mL de aceite vegetal y otros sin aceite como control; después se esterilizó el medio en autoclave (15 min, 121 °C; 1 kg/cm<sup>2</sup>). Todos los matraces se inocularon e incubaron sin agitación a  $1 \times 10^6$  cel/mL y 30°C. Las muestras se tomaron en intervalos de 2 h para determinar el crecimiento de biomasa, después las muestras se conservaron a 4°C para que posteriormente se hiciera el análisis de azúcares y producción de etanol.

La biomasa también se determinó gravimétricamente para conocer la relación células/mL vs g/L.

Se realizó la cuantificación de CO<sub>2</sub> utilizando CO<sub>2</sub> meter y se monitoreó cada 2 h.

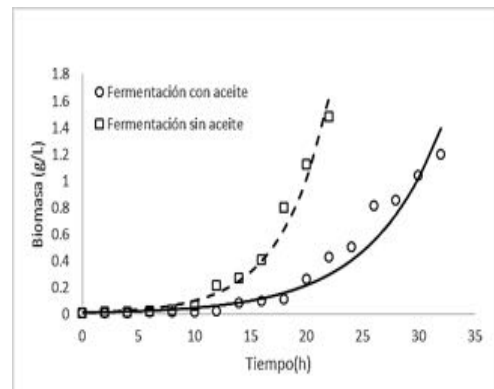
Los datos cinéticos se ajustaron a los modelos matemáticos utilizando como método de solución una función objetivo resuelta mediante la función solver® de Microsoft Excel.

La ecuación logística, se usó para ajustar los datos cinéticos experimentales. De las simulaciones se estimaron los parámetros cinéticos del crecimiento microbiano ( $\mu_{\max}$  y  $X_{\max}$ ), dichas ecuaciones fueron reportadas por Soto-Cruz *et al.* (2002).

## III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

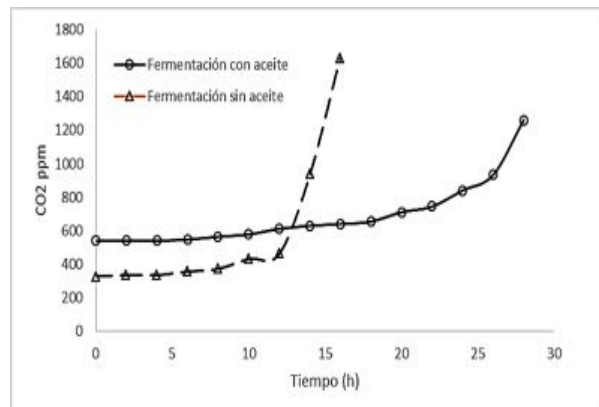
El efecto del aceite se determinó mediante la comparación de la fermentación con aceite y sin aceite. Los resultados obtenidos mostraron que con presencia aceite en la fermentación alcohólica la fase lag se extiende en comparación con la fermentación sin presencia de aceite, también, se observó que la concentración máxima de biomasa fue de 1.6 g/L sin la presencia de aceite; a diferencia de 1.2 g/L obtenida cuando se utiliza aceite, Figura 1.

La disminución en la concentración de biomasa cuando se usa aceite es debida a la ausencia de oxígeno en el medio, lo que garantiza el flujo de carbono hacia la formación de etanol.



**Figura 1.** Efecto del aceite en el crecimiento de la cepa *Saccharomyces cerevisiae*. ○ Fermentación con aceite □ Fermentación sin aceite — modelo con aceite - - - modelo sin aceite.

En la Figura 2, se muestra el efecto de la presencia del aceite sobre la respiración de la cepa *Saccharomyces cerevisiae*. La generación de CO<sub>2</sub> en la fermentación con aceite se incrementa hasta las 30 h. la fermentación sin presencia de aceite tienen una mayor velocidad de producción de CO<sub>2</sub> es debido a la presencia de aire en el head space que se tiene en los matraces.



**Figura 2.** El efecto del aceite en la respiración de cepa *Saccharomyces cerevisiae*. Δ Fermentación sin aceite, ○ Fermentación con aceite. - - -Modelo sin aceite, — Modelo con aceite.

Crecimiento de la cepa *S. cerevisiae* tiene en promedio una velocidad específica en el mismo de 0.2 a 0.4, comparado con el crecimiento que se obtuvo en este trabajo se encuentra dentro del intervalo de velocidades. Para el caso de la cepa con presencia de aceite se tiene una disminución en su capacidad metabólica (Tabla 1), pero se reduce la formación de biomasa.

**Tabla 1.** Velocidades específicas

Cepa	$\mu_{\max}$	Autor
<i>S. cerevisiae</i> . ATCC9763	0.3794	Jiménez et al. 2014
<i>S. cerevisiae</i> . Sin aceite	0.23	En este trabajo
<i>S. cerevisiae</i> . Con aceite	0.15	En este trabajo

Papanikolau *et al.* (2008) ha reportado que en presencia de aceite en los medios de cultivo provoca inhibición en el crecimiento de *Saccharomyces*, en este trabajo no se tuvo inhibición.

La fermentación en presencia y ausencia de aceite se llevó a cabo, sin embargo si se encontró diferencia en la capacidad metabólica relacionada con la velocidad específica.

#### IV. CONCLUSIONES

El aceite tiene efectos significativos con el crecimiento de la cepa *Saccharomyces cerevisiae*. En presencia del aceite se mantiene una anaerobiosis completa que ayudo a garantiza el flujo de carbono hacia la formación de etanol.

#### Referencias

- Jiménez D., Páez J., Soto N. (2014). Modelling of ethanol production from red beet juice by *Saccharomyces cerevisiae* under thermal and acid stress conditions. Food Technol. Biotechnol. 52, 93-100.
- Jiménez D., Abreu A., López y López V., Téllez A., Gracida J. (2012). Obtención de azúcares fermentables mediante hidrólisis ácida de *Beta vulgaris* L. Rev. Int. Contam. Ambie. 28, 151-158.
- Soto O., Favela E., Saucedo G. (2002). Modeling of growth, lactate consumption, and volatile fatty acid production by *Megasphaera elsdenii* cultivated in minimal and complex media. Biotechnol. 18, 193-200.
- Papanikolau S., Gortzi O., Margeli E. (2008). Effect of Citrus essential oil addition upon growth and cellular lipids of *Yarrowia lipolytica* yeast, Eur. J. Lipid Sci, Technol. 110, 997-1006.

## Diseño de un concentrador solar multipropósito, controlando variables de temperatura y posición.

Ventura Cruz Ignacio<sup>1</sup>, Azuara Jiménez Jorge Alberto<sup>2</sup>, Jiménez Islas Donaji<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>División de Ingeniería Mecatrónica, <sup>2</sup>División de Ingeniería en Energías Renovables, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, México.

Domicilio Conocido El Saucillo Municipio de Huichapan, Hidalgo, México, [iventura@iteshu.edu.mx](mailto:iventura@iteshu.edu.mx),  
\*[djimenez@iteshu.edu.mx](mailto:djimenez@iteshu.edu.mx)

**Resumen**— La realización de este diseño tuvo como finalidad aprovechar la energía solar con el uso de diferentes tipos de concentradores solares para ser empleados en la preparación de alimentos. En la construcción del concentrador solar, se analizó el nivel de radiación solar existente en el transcurso de un año en la región para poder ser usado como horno-estufa y se pueda usar en la cocción de alimentos de una forma limpia, se eligió el más adecuado para la región y el de mayor eficiencia. Por tal motivo, se realizó un diseño mecánico del concentrador, así como un control de diferentes niveles de temperatura y posición. Lo que se consiguió con el diseño del concentrador solar fue obtener una alternativa de aprovechamiento de este tipo de energía, la cual fuera segura y de fácil aplicación para la población enfocándose en el cuidado del medio ambiente.

**Abstract**— The realization of this design was aimed at harnessing solar energy with the use of different types of solar concentrators for use in food preparation. In the construction of solar concentrator, the existing level of solar radiation is analyzed in the course of a year in the region to be used as a combi oven and can be used in cooking food in a clean way, chose the suitable for the region and more efficient. Therefore, a mechanical design was done hub and control different temperature levels and position. This was achieved with the design of solar concentrator was to obtain an alternative use of this type of energy, which is safe and easy to apply to the population focusing on environmental stewardship.

**Palabras clave** — cilíndrico-parabólico, cocción, horno-estufa, multipropósito, solar térmica.

### I. INTRODUCCIÓN

Los cambios significativos actuales en el clima [1], tales como: variaciones de temperatura, presión y viento, son originados en gran parte por las actividades humanas, las cuales transforman la composición de la atmósfera mediante la quema de combustibles fósiles, deforestación, urbanización, desertificación,

entre otras. Derivado de ello existe una creciente necesidad del aprovechamiento de energías sustentables, trayendo consigo la oportunidad de desarrollar sistemas tecnológicos e innovadores que nos permitan utilizar esta fuente de energía renovable, ofreciendo una visión de plantear soluciones presentes a los problemas futuros.

El presente trabajo tiene como finalidad el desarrollo de un concentrador solar multipropósito, su principal función es ser empleado como una estufa u horno solar; se busca que tenga un costo bajo y alta eficiencia; esta configuración permite seguridad para el usuario y conlleva al cuidado del medio ambiente en la región, ya que el uso de gas natural y leña para producir calor generan contaminantes a la atmósfera.

Las energías renovables [2], solucionarán muchos de los problemas ambientales, como el cambio climático, los residuos radioactivos, las lluvias ácidas y la contaminación atmosférica. Bajo la denominación de energías renovables, alternativas o blandas, se engloban una serie de fuentes energéticas que a veces no son nuevas, como la leña o las centrales hidroeléctricas.

La historia de los colectores solares se remonta al siglo XX, donde el pionero en el aprovechamiento de la energía solar fue Frank Schuman [3], los principales trabajos que realizó fueron un motor solar con una eficiencia equivalente a un motor de carbón con un colector plano. En 1741 Lomonsov desarrollo un horno solar utilizando combinaciones de espejos y lentes. En 1924 Moreau construyo un horno solar utilizando el proyecto de Lomonsov. En la actualidad, la mayoría de las aplicaciones de los concentradores solares es para la producción de agua caliente doméstica, calefacciones y electricidad, donde el uso de los concentradores solares son planos y de tipo cilíndrico-parabólico.

Los colectores solares [4], son dispositivos diseñados para captar la radiación solar,



transformarla en energía térmica y así elevar la temperatura de un fluido, esto nos facilita por ejemplo calentar el agua para su posterior aprovechamiento a nivel doméstico o comercial. Los concentradores solares son dispositivos que concentran la energía proveniente del Sol por medio de una superficie que absorbe la energía y la transforma en calor por medio de convección. Existen varios tipos de concentradores solares los cuales pueden ser planos y de enfoque que siguen al Sol.

El horno solar [5] se define como un intercambiador de energía solar diseñado específicamente para transmitir calor a los alimentos con el propósito de elevar la temperatura y provocar cambios químicos asociados al proceso de cocción. Por otra parte, la estufa solar se define como un equipo cuya parte superior es un área descubierta donde se colocan sobre ellos los alimentos a cocinar. Existen gran variedad de cocinas y hornos solares [4], los cuales se clasifican en: cocinas de enfoque o de concentración, cocinas indirectas o de almacenamiento térmico y horno tipo caja.

La mayor parte de los modelos de cocinas solares [6] en uso corresponde a trampas de calor, las cuales consisten en cajas pintadas de negro mate en su interior, lo cual sirve de colector, con paredes aisladas. Estas cocinas pueden tener uno o varios reflectores para concentrar la energía solar; las temperaturas alcanzadas oscilan alrededor de 150°C, estas son adecuadas para la cocción de alimentos, la purificación de agua y el horneado de panes y pasteles.

Los procesos industriales [7] exigen el control de la fabricación de diversos productos; estos procesos son muy variados; por lo consiguiente es necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes, tales como temperatura, posición, entre otros; en los inicios de la era industrial, el control de los procesos se llevó a cabo mediante tanteos basados en la intuición y en la experiencia acumulada. Por lo tanto existen diversos tipos de control que se utilizan conforme las necesidades del proceso y de ello dependen el costo de la implementación y los diversos tipos de control a emplear.

De acuerdo con [8], una fuente renovable de energía con gran potencial en México y en la región de Hidalgo es la energía solar. El calor emitido por el Sol se puede aprovechar a través de sistemas solares térmicos para fines prácticos, que permiten utilizar la radiación solar en dispositivos de cocción de alimentos y

calentamiento de agua para disminuir el uso de recursos naturales no renovables. El desarrollo del proyecto “Diseño de un concentrador solar multipropósito, controlando variables de temperatura y posición” tiene como objetivo aprovechar una fuente de energía ilimitada y brindar beneficios que sirvan de apoyo a la sociedad con el uso de energías limpias y sustentables.

Su contenido debe estar relacionado con el tema específico y el propósito de la investigación; señala el problema e importancia de la investigación, los antecedentes bibliográficos que fundamenten la hipótesis y los objetivos. La introducción debe ser soportada con referencias científicas o trabajos previos. No se permiten palabras con valoración subjetiva como: grandes, altos, pequeños, mayores. La literatura citada deberá estar contenida en el apartado de referencias. En el último párrafo se establece el objetivo del trabajo.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la evaluación del comportamiento de las cocinas solares habitualmente se realizan distintas pruebas, como es la temperatura alcanzada por la placa absorbidora sin carga en la cocina, el tiempo que demora en calentar determinada carga y el cálculo de la potencia absorbida al calentar una masa de agua. El desarrollo del proyecto se divide en cuatro etapas:

En la primera etapa se realizó la adquisición de datos estadísticos sobre la radiación solar en la región, específicamente en la localidad de El Saucillo Huichapan, Hgo., utilizando fuentes de datos de la estación meteorológica de la zona (INIFAP, 2013), ubicada en el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan y estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), estos parámetros sirvieron en el desarrollo y construcción del concentrador solar.

Se realizaron mediciones de la intensidad de la radiación solar en diferentes días y horarios mediante un Solarímetro.



Fig. 1: Solarímetro SM-206

La fig. 1 muestra el Solarímetro modelo SM-206 con una resolución de  $0.1 \text{ w/m}^2$ , frecuencia de muestreo de 0.25 segundos y un rango de medición de 0.1 a  $3999.0 \text{ w/m}^2$ .

En la segunda etapa se analizaron los diferentes tipos de materiales utilizados para la superficie reflectante del concentrador solar, siendo esta etapa una parte esencial del proyecto.

Se llevaron a cabo pruebas con diferentes tipos de materiales, primeramente se utilizó lámina galvanizada calibre # 26. Otra prueba consistió en pulir la lámina galvanizada mediante un abrillantador de metales y estopa para la limpieza de la superficie. También se utilizaron para las pruebas espejos planos de 3 mm de espesor, cortados en forma cuadrangular de 3 y 5 cm.

A continuación se muestra una lista de la reflectividad de algunos tipos de materiales:

TABLA I  
Reflectividad de algunos materiales

<i>Material</i>	<i>Reflectividad</i>
<i>Aluminio de alta reflectividad (rosado)</i>	<i>0,853</i>
<i>Espejo de vidrio de 3 mm</i>	<i>0,754</i>
<i>Espejo de vidrio de 4 mm</i>	<i>0,712</i>
<i>Fibra de vidrio pintada de blanco</i>	<i>0,709</i>
<i>Acero inoxidable</i>	<i>0,572</i>

Se eligió el espejo de vidrio de 3 mm de espesor como tipo de material de la superficie reflectante, debido a que las pruebas con acero inoxidable disminuían el rango de temperatura en  $20^\circ\text{C}$ , mientras que el material de aluminio con ese porcentaje de reflectividad necesita un acabo que encarece el prototipo.

En la tercera etapa se analizó el diseño del concentrador solar el cual cumplió con las

características esenciales de calentamiento de fluidos o alimentos, en un rango de temperaturas que oscila de los  $40^\circ\text{C}$  a los  $94^\circ\text{C}$ . Se analizaron los tipos de concentradores solares: planos, cilíndricos y parabólicos. Se implementó para el proyecto una mezcla de dos tipos de concentradores: plano y cilindro parabólico, el cual es un concentrador con seguimiento en un solo eje, refleja la radiación solar directa concentrándola en un punto específico y va modificando su posición en el transcurso del día. La superficie reflectora es de lámina calibre #26 recubierta de espejo de 3 mm de espesor, ubicada en los costados de la base estructural y con un mecanismo de transmisión por cadena acoplado al motor. La parte superior del concentrador está conformada por un domo en forma de pirámide cuadrangular de vidrio transparente 300 mm de base, 294 mm de altura y 2 mm de espesor, cuya función es la de impedir la pérdida de calor del sistema, proteger los alimentos del medio ambiente y permitir al usuario verificar la cocción de los alimentos.

En la cuarta etapa se desarrolló e instaló el control de los mecanismos del concentrador solar que van a manipular el punto focal y van a dar la lectura de la medición de los niveles de temperatura. Para la selección de los demás materiales se utilizó un pic16f877a para el control y la medición de temperatura, para modificar la posición del mecanismo se usó un motor de corriente directa a  $12 \text{ V}_{\text{CD}}$  y para el resto del funcionamiento microcontrolador se emplearon diversos componentes electrónicos como son: sensores de temperatura de la familia de los LM, diodos rectificadores, cristales, visualizador LCD, capacitores, transistores, relevadores, entre otros.

### III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente trabajo del diseño de un concentrador solar multipropósito controlando variables de temperatura y posición, se consideraron una serie de parámetros y criterios para su diseño, los cuales se muestran a continuación:

- **Temperaturas de cocción:** mínima de  $30^\circ\text{C}$ , máxima de  $130^\circ\text{C}$ .
- **Ubicación geográfica:**  
 Latitud:  $20^\circ 19' 12''$   
 Longitud:  $99^\circ 42' 26''$   
 Altitud: 2110 msnm  
 (Correspondiente a la Ciudad de Huichapan, Hidalgo)
- **Radiación solar, Temperatura y Humedad relativa:**

TABLA II  
Valores promedio en la Región Huichapan

Parámetro	Registro
Radiación Global (W/m <sup>2</sup> )	531.6
Temperatura (°C)	T. máx.: 23.54 T. mín.: 9 T. med.: 15.96
Humedad relativa (%)	59.8

En la tabla II, se consideran los valores promedio de la estación meteorológica ubicada en El Saucillo Huichapan, Hgo., durante el periodo Enero-Diciembre 2013 de la Red Estatal De Estaciones Agroclimatológicas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

El diseño del concentrador solar fue de tipo plano y cilindro parabólico de la superficie reflectante, quedando de la siguiente manera:

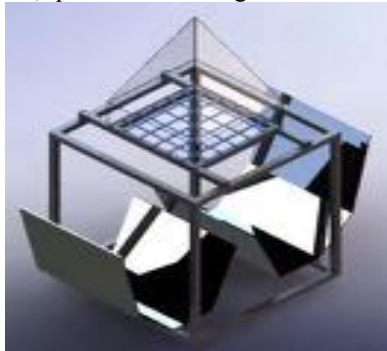


Fig. 2: Diseño 3D del concentrador solar

La fig. 2 se muestra el dibujo fue realizado en el software Solid Works 2014. A continuación se muestra el despiece:



Fig. 3: Despiece del prototipo del concentrador solar

La fig.3 se muestra el despiece de las partes principales que componen al concentrador solar, las cuales son:

1. Domo hermético de vidrio transparente

2. Superficie base para cocción de alimentos y calentamiento de agua
3. Superficie reflectante
4. Estructura base del concentrador

El principio de funcionamiento del concentrador solar es como se muestra a continuación:

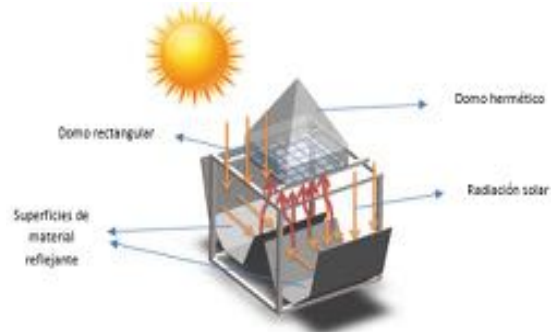


Fig. 4: Funcionamiento del concentrador solar

La fig. 4 muestra que consta de un arreglo de superficies reflejantes a base de vidrio en los costados, los cuales reciben los rayos del sol y los concentran en un área determinada en la parte superior de la estructura para realizar la función de cocción de alimentos y calentamiento de agua. El diseño de espejos puede girar sobre un eje para captar la radiación solar en diferentes horarios. La parte superior cuenta con un domo hermético que permite mantener aislados los alimentos al momento de cocinarlos, está diseñado con vidrio transparente que tiene la función de mantener la temperatura sin demasiadas pérdidas. La siguiente figura muestra el principio de funcionamiento del concentrador solar.

Para el desarrollo y elección de los materiales para el control de posición y medición de la temperatura del concentrador solar multipropósito, se contemplaron materiales que fueran de bajo costo y compatibles entre ellos para que no requieran de componentes adicionales para funcionar. Por lo tanto, para el control del sistema se empleó un microcontrolador 16F887A ya que este dispositivo cuenta con entradas y salidas analógicas y digitales. El sensor de temperatura a utilizar es el LM35 ya que su salida es de manera lineal dando como salida 10 mV por cada grado centígrado. Para poder visualizar las mediciones de temperatura y las variaciones de posición se implementó una pantalla LCD matricial de 16x2; donde también se requieren entradas digitales para la selección o modificación de la posición por lo tanto se utilizó un teclado matricial de 4x4. Para hacer uso de las señales de salida que mando el microcontrolador de acuerdo a los parámetros

establecidos en el programa se utilizaron transistores TIP120 para aislar la parte de control de los relevadores que se van a emplear para hacer funcionar los motores de corriente directa que hacen mover los materiales reflejantes y finalmente, se requiere de una batería de 12 V<sub>CD</sub> que haga funcionar los motores y el sistema de control.

Con lo que respecta al diseño del hardware, con base en el estudio de la radiación solar en la región, el diseño de la estructura mecánica y el tipo de dispositivos electrónicos a emplear para interactuar entre la parte mecánica y el control se requiere de un programa que pueda visualizar los niveles de temperatura que alcanza la incidencia de la radiación solar, quedando el programa de la siguiente forma:

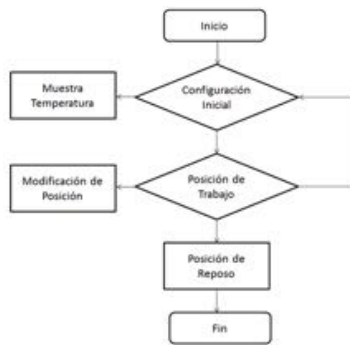
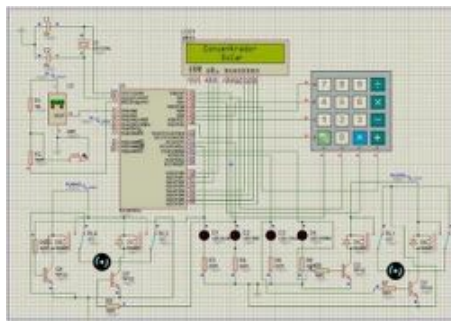


Fig. 5: Diagrama de flujo del control

La fig. 5 muestra el desarrollo de la programación del control se empleó el uso de PIC C CCS para realizar las instrucciones necesarias y que funcionara el control de acuerdo a las necesidades del proyecto; con lo que respecta a la simulación del control con los diferentes dispositivos electrónicos se utilizó el software Proteus; quedando de la siguiente manera:



En la fig. 6 se muestra el funcionamiento del control, mostrando los niveles de temperatura, así como la variación de la posición de los materiales reflejantes, incluyendo todos los dispositivos a usar en el prototipo final.

Finalmente se obtuvo la implementación del diseño mecánico con el control de posición y la medición de temperatura en el concentrador solar multipropósito quedando de la siguiente manera:



Fig. 7: Prototipo final del concentrador solar multipropósito

La fig. 7 muestra el funcionamiento del concentrador solar multipropósito para el calentamiento de agua funcionando como horno solar, el cual trabaja con los principios de flujo del aire, de refracción del calor solar y permite guardarlo dentro del domo por el mayor tiempo posible.

El concentrador puede funcionar como estufa colocando un recipiente en donde se concentra la radiación solar, con esto permite la cocción de alimentos y calentamiento de agua debido a los diferentes niveles de temperatura alcanzados.

La última prueba llevada a cabo por este prototipo fue el 6 de septiembre de 2014, en un horario de 11:00 a.m. a 01:00 p.m. en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Huichapan. Los cuales se desglosan a continuación:

TABLA III  
Registro de temperaturas

Hora	Temp. °C	Hora	Temp. °C
11:00 a.m.	25.5	12:05 p.m.	39
11:05 a.m.	26.5	12:10 p.m.	40
11:10 a.m.	26.5	12:15 p.m.	44
11:15 a.m.	27	12:20 p.m.	49
11:20 a.m.	28.5	12:25 p.m.	52
11:25 a.m.	29	12:30 p.m.	60
11:30 a.m.	30	12:35 p.m.	62
11:35 a.m.	31	12:40 p.m.	78
11:40 a.m.	33	12:45 p.m.	80
11:45 a.m.	35	12:50 p.m.	89
11:50 a.m.	36.5	12:55 p.m.	94

11:55 a.m.	37	01:00 p.m.	94
12:00 p.m.	38.5		

En la tabla III, se desglosan los horarios y las temperaturas alcanzadas por el concentrador solar en un periodo de dos horas, partiendo de una temperatura de 25.5°C a las 11:00 a.m.; con una temperatura máxima de 94°C alcanzados a la 01:00 p.m.

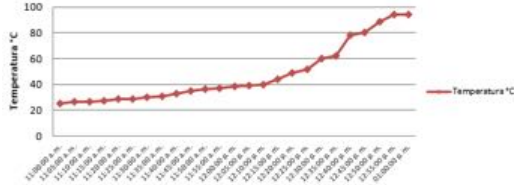


Fig. 8: Registro de temperaturas del concentrador solar multipropósito

La fig. 8 se muestra la medición también fue apoyada por un multímetro modelo mul-270, donde se puede visualizar incrementos de 0.5°C hasta 9°C cada cinco minutos aproximadamente

Con el registro de temperaturas se cumple con el objetivo del concentrador solar, alcanzando los niveles de temperatura y posición para funcionar como horno-estufa solar para preparar alimentos o simplemente calentar agua.

#### IV. CONCLUSIONES

El concentrador solar plano semi-parabólico fue el que presentó mejores características técnicas con respecto al plano y parabólico. El diseño final tuvo concentración de hasta 94°C.

El diseño de la estructura para el soporte del concentrador solar fue el de configuración cúbica que cumple con las funciones mecánicas y térmicas del dispositivo. Además, permite dar soporte al domo y a los dispositivos de control ahorrando material y espacio para el concentrador solar.

El diseño del control fue del tipo proporcional para realizar la variación de la posición con respecto al tiempo, lo que permitió alcanzar diferentes niveles de concentración en un punto, permitiendo la variación de temperatura para diferentes aplicaciones.

Las pruebas llevadas a cabo permitieron localizar los puntos donde la radiación solar fue

concentrada manipulando las posiciones del dispositivo, lo que permitió alcanzar un rango de temperaturas de 40 °C a 94 °C, con este análisis se logra ajustar el sistema de control.

#### REFERENCIAS

- [1] E. Rincón, Estado del Arte de la Investigación en Energía Solar en México, Grupo ICA, México, 1999.
- [2] J. Santamarta, Las energías renovables son el futuro, Wolr-Watch, 2004.
- [3] C. Echeverría, Diseño de un colector cilíndrico parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua, Universidad de Piura, Peru, 2011.
- [4] C. Castillos, Colectores solares. Proyecto de Eficiencia Energética, Uruguay, 2007.
- [5] R. Acosta, Cocinas, estufas y hornos solares, México: Caos Conciencia, 2006.
- [6] F. Filippin, *Et al*, Estudio comparativo de ollas en una cocina solar tipo caja, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 10, 2006.
- [7] A. Creus, Instrumentación industrial, México: Alfaomega, 1997.
- [8] Secretaría de Energía, Estrategia Nacional de Energía 2013-2027, SENER, México, 2013.

## Efecto de las cerdicompostas de excretas de cerdos pelones mexicanos en el crecimiento del maíz

Emilio Raymundo Morales Maldonado<sup>1</sup>, Wilberth Trejo Lizama<sup>2</sup>, Raúl Olvera García, Francisco Javier Michel Castro

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, domicilio conocido el Saucillo s/n Huichapan, Hidalgo, México., [ermorales@iteshu.edu.mx](mailto:ermorales@iteshu.edu.mx)<sup>1</sup>.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Yucatán. Km 15.5 Carretera Mérida-Xmatkuil. Apartado postal 4-116, Mérida Yucatán, México.

**Resumen.** El objetivo del trabajo fue evaluar en el crecimiento del maíz al abono de excretas de Cerdos Pelones Mexicanos (CPM) alimentados con tres niveles: alto, medio y bajo: 3.5, 2.5 y 1.5 de Energía Metabolizable de mantenimiento (EMM)  $\text{kg}^{-1}$  peso vivo<sup>-1</sup>. Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3 x 2 con 4 repeticiones. Los datos se analizaron con SAS versión 9.0 y la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$  y  $p \leq 0.01$ ) para comparación de medias. Las excretas de cerdos alimentados con niveles altos y bajos incrementaron el contenido de Nitrógeno (N) absorbido en planta. El uso de excretas frescas, como abono, favoreció 16.8% la altura de la planta, 25.7% el diámetro del tallo, 37.3% el área foliar, 10.3% el número de hojas, 39.6% la materia seca y 11.82% el contenido de (N) en planta; respecto a las excretas maduras. Se concluyó que las excretas secas de CPM alimentados con niveles altos mejoran el crecimiento del maíz.

**Abstract.** The objective was evaluate the growth of corn fertilizer with manure Mexican Hairless Pig (MHP) feded with three levels: high, medium and low: 3.5, 2.5 and 1.5 of Metabolizable Energy Maintenance (MEM)  $\text{kg}^{-1}$  weight live. The design was completely randomized 3 x 2 factorial arrangement with 4 replications. The data were analyzed with SAS version 9.0 and Tukey test ( $p \leq 0.05$  y  $p \leq 0.01$ ) to compare means. The excreta of pigs feded with high and low levels increased the

content of nitrogen (N) absorbed plant. The use of fresh manure as fertilizer, favored 16.8% the plant height, 25.7% stem diameter, 37.3%, leaf area 10.3% the number of leaves and 39.6% dry matter content and 11.82% (N) on the ground; regarding mature excreta. It was concluded that the dry excreta CPM fed high levels enhance the growth of corn.

**Palabras clave-** Excretas, cerdos, maíz y producción.

### I. INTRODUCCIÓN

El Cerdo Pelón Mexicano (CPM) es una especie en peligro de extinción que comenzó a diezmarse cuando se introdujo el cerdo americano que ofrecía una más rápida reproducción y un crecimiento acelerado (Lemus y Ly, 2010). El CPM es parte elemental en la cría de animales del solar en la Península de Yucatán (Sierra, 2000). Así mismo, representa una opción de sustentabilidad debido a su rusticidad para adaptarse a terrenos pedregosos y su resistencia genética a enfermedades (Ly, 2008; Sierra, 2008).

Entre otras cualidades, el CPM manifiesta una tendencia hacia una menor retención de Nitrógeno (N) por lo que es capaz de adaptarse al consumo de alimentos bajos en proteína (Trejo *et al.*, 2005). Su principal alimento proviene de la milpa. Siendo el forraje, una fuente de alimento que el animal ingiere en forma libre (Ly, 2008). El consumo de alimentos con bajos niveles de Energía

Metabolizable de Mantenimiento (EMm)  $\text{kg}^{-1}$  peso vivo $^{-1}$  permite al CPM conseguir las proteínas necesarias sin deterioro en su crecimiento (Morales-Maldonado *et al.*, 2012).

Así mismo, los cerdos alimentados con altas cantidades de forraje en su dieta presentan cambios en las características de sus excretas (Gerard *et al.*, 2005; Morales-Maldonado *et al.*, 2012). El consumo de forraje también promueve un mayor contenido de N en las excretas (Delve *et al.*, 2001). En contraste, a los animales que consumen dietas concentradas sin forraje.

Una alternativa, en la búsqueda de nuevas formas de abonos orgánicos es utilizar en la alimentación del CPM diferentes niveles de EMm  $\text{kg}^{-1}$  peso vivo $^{-1}$  (Trejo, 2005; Morales-Maldonado *et al.*, 2012). Con este tipo de dietas se evita la pérdida y se regula el contenido de N en las excretas, asegurando la disposición de este elemento hacia los requerimientos de las plantas.

Dado los antecedentes anteriores el objetivo de esta investigación fue evaluar el crecimiento del maíz al abono de excretas de Cerdos Pelones Mexicanos (CPM) alimentados con tres niveles: alto, medio y bajo: 3.5, 2.5 y 1.5 de EMm  $\text{kg}^{-1}$  peso vivo $^{-1}$ .

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El presente trabajo se realizó en el Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Yucatán (CCBA-UADY). El campus se localiza en la zona centro del Estado de Yucatán a 21°06' N y 89° 27' W, a una altitud de 8 m.s.n.m. El clima se clasifica como tropical subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura promedio anual es de 25.8°C con humedad relativa de 75-80% y precipitación pluvial

media de 984.4 mm anuales acumulándose 81% desde mayo a octubre (Bautista *et al.*, 2005).

### Procedencia de las excretas

Las excretas procedieron de 12 cerdos pelones mexicanos, establecidos en corrales individuales. La alimentación se distribuyó en 3 niveles: alto, medio y bajo (3.5, 2.5 y 1.5 de EMm  $\text{kg}^{-1}$  peso vivo $^{-1}$ ). Además para complementar su alimentación se ofreció pasto estrella de África (*Cynodon nlemfuensis* L.) *ad libitum*.

### Excreta procesada seca (sin maduración y secada a la sombra)

Las excretas se recolectaron en forma individual por animal en charolas de aluminio, permaneciendo de 3-5 días bajo sombra. Posteriormente, se guardaron en bolsas de papel periódico etiquetadas con el número de repetición y nivel de EMm  $\text{kg}^{-1}$  peso vivo $^{-1}$ .

### Excreta procesada madura (composta)

Se utilizaron 50 kg de excretas secas de cada cerdo y 12 contenedores de concreto de 1.50 m de largo x 0.90 m de ancho y 0.5 m de altura, con tapa de madera. En cada contenedor se composteó la excreta de cada cerdo en forma individual. Las excretas se removieron dos veces por semana hasta que la temperatura no presentó variación (siete semanas). Al final del composteo se obtuvo excreta madura guardándose en bolsas de papel etiquetadas con el número de repetición y nivel de EMm  $\text{kg}^{-1}$  peso vivo $^{-1}$ .

### Producción de plántulas

La siembra de semillas de maíz criollo (Nal-xoy amarillo), se realizó en charolas

de polietileno de 70 x 35 cm con 72 cavidades. Las charolas se llenaron con suelo Luvisol tamizado con malla de 5 mm. En cada cavidad se depositó una semilla de maíz. Las charolas se colocaron dentro de una estructura protegida. Durante dos semanas el riego se aplicó todos los días, según la recomendación de Magdub *et al.*, (2005).

### **Trasplante y fertilización y riego de maíz en macetas**

Se utilizaron 96 bolsas de polietileno negro de 50 x 40 cm con 8 kg de suelo Luvisol tamizado. A cada maceta, se le agregó 100 g de excreta (1 gr N planta<sup>-1</sup>) y una plántula de maíz. El riego requerido se calculó con base en la capacidad de campo. Se aplicaron 60 litros de agua por planta distribuidos durante 12 semanas. El riego se aplicó 2 veces por semana. El área experimental fue una estructura protegida con malla antiáfidos de 50 m<sup>2</sup> de superficie.

### **Variables fenotípicas medidas en maíz**

Altura de la planta (cm): esta variable se midió utilizando una cinta métrica de plástico. La cinta se colocó en la base del tallo de la planta hasta la punta. Diámetro del tallo (cm): se midió con un vernier de metal. El vernier se colocó en la base del tallo de la planta. Número de hojas: las hojas de cada planta se contaron una por una hasta obtener el número total de hojas. Área foliar de la hoja (cm<sup>2</sup>): se estimó mediante la ecuación propuesta por Avendaño *et al.*, (2008) y Bolaños y Jean (2012).  $AF = LA \times AH \times 0.75$ , donde:  
LA = Largo de la Hoja  
AH = Ancho de la Hoja  
0.75= factor de corrección

### **Materia seca (Kg MS planta<sup>-1</sup>)**

Cada planta se desprendió de su respectiva maceta y se midió el peso fresco en una báscula digital Marca OREUS®, posteriormente, se introdujo en una bolsa de papel estraza etiquetada con el número de repetición y nivel de EMm perteneciente. Todas las bolsas se mantuvieron en una estufa de aire forzado a 65 °C por 3 días (peso seco).

### **Contenido de nitrógeno absorbido (Kg N planta<sup>-1</sup>)**

Las plantas de maíz se introdujeron en una estufa a 65°C por 3 días. Posteriormente, se pasaron a través de un molino eléctrico equipado con tela de criba de 1 mm. El resultado fue una harina homogénea. De cada planta se tomó 1 g de harina con un ephendor de plástico previamente etiquetado. En laboratorio se determinó el contenido de nitrógeno total por el método de Kjeldahl.

### **Diseño experimental y análisis estadístico**

El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial 3 × 2, con 4 repeticiones. El factor 1, correspondió a los niveles de energía utilizados en la alimentación: alto, medio y bajo (3.5, 2.5 y 1.5 EMm kg peso vivo<sup>-1</sup>) y el factor 2, al procesamiento de la excreta (seca y madura). Los datos se analizaron con SAS versión 9.0 y la comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$  y  $p \leq 0.01$ ).

## **III. RESULTADOS**

### **Variables fenotípicas medidas en maíz**

Las excretas de cerdos alimentados con niveles: altos 3.5, medios 2.5 y bajos 1.5 de energía metabolizable de mantenimiento (EMm) kg de peso vivo<sup>-1</sup>,



no influyeron ( $p \geq 0.05$ ) en el crecimiento del maíz. No obstante, después de un procesamiento, las excretas secas mejoraron ( $p \leq 0.05$ ) el crecimiento del maíz con porcentajes superiores a 16.8% en altura de la planta, 25.7% en diámetro del tallo, 37.3% en área foliar y 10.3% en número de hojas, en contraste con la excreta madura. En cuanto a la interacción (niveles de energía vs procesamiento), las excretas secas de cerdos alimentados con

niveles altos ( $3.5 \text{ EMm kg peso vivo}^{-1}$ ) promovieron mayor ( $p \leq 0.05$ ) diámetro en plantas de maíz. Resultados similares se comprobaron con excretas secas de cerdos alimentados con niveles medios y bajos ( $2.5$  y  $1.5 \text{ EMm kg peso vivo}^{-1}$ ) y excretas maduras de cerdos alimentados con niveles bajos ( $1.5 \text{ EMm kg peso vivo}^{-1}$ ) respectivamente como se muestra en el cuadro 1.

**Cuadro 1. Variables de crecimiento del maíz 120 días después de ser abonadas con excretas secas y maduras.**

Tratamiento	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área foliar (cm <sup>2</sup> )	Número de hojas
<b>Excreta</b>	**	**	*	*
Seca	182.1 <sup>a</sup>	1.5 <sup>a</sup>	216.8 <sup>a</sup>	10.6 <sup>a</sup>
Madura	151.5 <sup>b</sup>	1.1 <sup>b</sup>	136.0 <sup>b</sup>	9.5 <sup>b</sup>
<b>EEM</b>	ns	ns	ns	ns
Alto	159.6	1.3	180.4	9.8
Medio	174.2	1.3	194.2	10.1
Bajo	166.6	1.3	154.8	10.3
<b>Interacción (N X E)</b>	ns	*	ns	ns

Las medias de una misma fila seguidas por letras diferentes son significativamente diferentes (prueba de Tukey) ns: no significativo, \*  $p \leq 0.05$ , \*\*  $p \leq 0.01$ .

### Materia seca (Kg MS planta<sup>-1</sup>)

Las excretas de cerdos alimentados con niveles altos ( $3.5 \text{ EMm kg peso vivo}^{-1}$ ) aumentaron ( $p \leq 0.05$ ) la biomasa en maíz con porcentaje superior a 35.6% ( $0.042 \text{ Kg MS planta}^{-1}$ ) y 38.1% ( $0.045 \text{ Kg MS planta}^{-1}$ ) respecto a las excretas de cerdos alimentados con niveles medios y bajos ( $2.5$  y  $1.5 \text{ EMm kg peso vivo}^{-1}$ ) respectivamente.

Después del procesamiento, las excretas secas aumentaron ( $p \leq 0.05$ ) el contenido de materia seca en plantas 39.6% ( $0.044 \text{ Kg MS planta}^{-1}$ ) respecto a la excreta

madura. En cuanto a la interacción (niveles de energía vs procesamiento) la excreta seca de cerdos alimentados con niveles altos ( $3.5 \text{ EMm kg peso vivo}^{-1}$ ) promovieron mayor ( $p \leq 0.05$ ) materia seca en plantas de maíz. Resultados similares ( $p \leq 0.05$ ) se comprobaron con excretas secas de cerdos alimentados con niveles medios y bajos ( $2.5$  y  $1.5 \text{ EMm kg peso vivo}^{-1}$ ) y excretas maduras de cerdos alimentados con niveles bajos ( $1.5 \text{ EMm kg peso vivo}^{-1}$ ).

### Contenido de nitrógeno absorbido (kg N planta<sup>-1</sup>)

Las excretas de cerdos alimentados con niveles bajos (1.5 EMm kg peso vivo<sup>-1</sup>) aumentaron ( $p \leq 0.05$ ) el contenido de N absorbido en planta, siendo superiores 18.2% a las excretas de cerdos alimentados con niveles medios (2.5 EMm kg peso vivo<sup>-1</sup>). Después del procesamiento, las excretas secas mejoraron ( $p \leq 0.05$ ) el contenido de N absorbido en planta, con valores superiores a 11.82%, respecto a las excretas madura. En la interacción (niveles

de energía vs procesamiento), las excretas secas de cerdos alimentados con niveles bajos (1.5 EMm kg peso vivo<sup>-1</sup>) promovieron mayor ( $p \leq 0.05$ ) contenido de N absorbido en planta. Resultados similares ( $p \leq 0.05$ ) se comprobaron con excretas secas de cerdos alimentados con niveles altos y medios (3.5 y 2.5 EMm kg peso vivo<sup>-1</sup>) y excretas maduras de cerdos alimentados con niveles bajos (1.5 EMm kg peso vivo<sup>-1</sup>). Los resultados se observan en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Materia seca y Nitrógeno total en plantas de maíz a los 120 días después del abonado con excretas secas y maduras.**

Tratamiento	Materia seca (Kg MS planta <sup>-1</sup> )	Nitrógeno total (kg N planta <sup>-1</sup> )
<b>Excreta</b>	**	*
Seca	0.111 <sup>a</sup>	0.11 <sup>a</sup>
Madura	0.067 <sup>b</sup>	0.09 <sup>b</sup>
<b>EEM</b>	**	*
Alto	0.118 <sup>a</sup>	0.10a <sup>b</sup>
Medio	0.076 <sup>b</sup>	0.09 <sup>b</sup>
Bajo	0.073 <sup>b</sup>	0.11 <sup>a</sup>
<b>Interacción (N XE)</b>	*	ns

Las medias de una misma fila seguidas por letras diferentes son significativamente diferentes (prueba de Tukey) ns: no significativo, \*  $p \leq 0.05$ , \*\*  $p \leq 0.01$ .

#### IV.DISCUSIÓN

##### Variabes fenotípicas medidas en maíz

Los resultados del presente trabajo utilizando excretas secas y maduras fueron inferiores 20.1 y 33.5% en la altura de plantas de maíz a lo reportado por Figueroa-Viramontes *et al.*, 2010 al aplicar durante 3 años (2001, 2002 y 2003) la cantidad promedio de 74.3 ton ha<sup>-1</sup> (220 kg N ha<sup>-1</sup>) de estiércol seco de bovino a 15,200 plantas ha<sup>-1</sup> en maíz forrajero

(híbrido SB-302) con alturas de 228 cm en planta.

Así mismo, las excretas secas y maduras fueron inferiores 30.6 y 42.3% en la altura de plantas; mientras que, la excreta seca incremento 64.9% el área foliar, en comparación a lo reportado por Salazar-Sosa *et al.*(2010) aplicando 5 y 10 g de N planta de estiércol seco de bovino en maíz forrajero alcanzando alturas promedio en plantas de maíz de 262.5 cm y áreas foliares de 76.02 cm<sup>2</sup>. Las excretas secas y

maduras fueron 15.1 y 29.3% inferiores en altura de plantas; mientras que las excreta secas promovieron resultados similares en área foliar a lo reportado por Bolaños y Jean (2012) al aplicar dosis de 0.7 g N planta<sup>-1</sup> en maíz var Anjou 387, con altura de 214.5 cm y área foliar de 263 m<sup>2</sup>.

Los resultados del presente trabajo contrastan con los de otros investigadores, que demuestran una diferencia en la altura de plantas y el área foliar. Esto se debe a que durante el crecimiento, la planta y sus órganos demandan una adecuada disponibilidad de nutrimentos, siendo la relación C/N un factor clave para que se desarrolle dicha demanda (Morales-Maldonado *et al.*, 2012). En ese sentido, la alimentación de niveles bajos (1.5 EMM kg peso vivo<sup>-1</sup>) aumenta el consumo de forraje en cerdos, lo que promueve un aumento de C y por tanto de la relación C/N en las excretas.

A pesar de que a las excretas maduras, no se le añadió material adicional al inicio del compostaje, para mejorar la relación C/N, esta incrementó 25% (10:1) al final del proceso; sin embargo, fue bajo con relación al óptimo C/N 25-30 señalado por Soto y Muñoz (2002) y aceptable en cuanto a su contenido de N.

Como se observa, los valores óptimos de C/N para la mineralización del N, son variables y mayores a los encontrados por Kumar y Goh (2002) en el trópico debido a un intenso proceso microbiano provocado por temperaturas altas y humedad promoviendo un elevado consumo de C y N asimilable por los microorganismos. La baja relación C/N registrada, en el presente trabajo, presentó un contenido de N similar a lo obtenido por Qian y Schoenan, (2002) con residuos orgánicos presentando relaciones C/N de 20 a 30 y concentraciones de 1.2 a 2.4 % de N, concluyendo que esta relación produce un equilibrio entre el bloqueo del N y su liberación, así mismo se ha

encontrado que la liberación de N asimilable en estiércoles sólidos se presenta con relaciones C/N de 13 a 15, ya que valores inferiores pueden interferir con la liberación de N asimilable hacia la planta.

### **Materia seca (Kg MS planta<sup>-1</sup>)**

Los resultados de biomasa utilizando excretas secas de cerdos alimentados con niveles bajos y medios (1.5 y 2.5 EMM kg peso vivo<sup>-1</sup>) fueron similares a lo encontrado por Parson *et al.*, (2009) quienes en un trabajo de campo en suelo similar al utilizado en el presente trabajo utilizaron excreta de borrego y cabras a razón de 4 t de excreta por ha<sup>-1</sup> correspondiente a 127 kg de N ha<sup>-1</sup>, reportando 0.088 kg de biomasa planta<sup>-1</sup>. Los resultados de MS en planta utilizando excreta seca de cerdos alimentados con niveles altos (3.5 EMM kg de peso vivo<sup>-1</sup>) fueron similares a lo obtenido por Fortis-Hernández *et al.* (2009) utilizando biocompost (0.135 kg MS planta<sup>-1</sup>), por su parte Reta *et al.* (2004) obtuvieron mayores rendimiento con estiércol seco de bovino o vermicompost al igual que Salazar-Sosa *et al.*, (2007) quien obtuvo 0.206 kg MS planta<sup>-1</sup> con 40 t ha<sup>-1</sup> de estiércol seco de bovino.

Otro factor a considerar es la densidad de plantas como responsable en el aumento o reducción de la biomasa como lo mencionan Fallah y Tadayyon (2010) en un experimento con maíz forrajero cv. SC 704 en suelo calcareo con cuatro densidades de siembra (92600, 104200, 119000 y 138900 plantas ha<sup>-1</sup>) y cuatro dosis de nitrógeno (200, 240, 280 y 320 kg ha<sup>-1</sup>), concluyendo que para prevenir la pérdida de nitrógeno hacia el ambiente sin reducir la producción de biomasa, es recomendable el uso de 138 900 plantas ha<sup>-1</sup> para obtener rendimientos promedio de 0.17 kg MS planta<sup>-1</sup>, evitando dosis

mayores a 240 kg N ha<sup>-1</sup> (1.7 g N planta<sup>-1</sup>).

Así mismo se debe tomar en cuenta la disponibilidad de nitrógeno en la excreta durante el crecimiento de la planta tal y como lo demuestra Celaya y Castellanos (2011) señalando que a mayor disponibilidad de nitrógeno en el suelo mayor será la adsorción de este elemento hacia la planta de maíz lo que aumenta su concentración en los órganos vegetales con una mayor producción de biomasa seca en planta.

### **Contenido de nitrógeno absorbido (Kg N planta<sup>-1</sup>)**

Los resultados del trabajo fueron superiores 0.012 kg N absorbido por planta<sup>-1</sup> a lo obtenido por Figueroa-Viramontes *et al.* (2010) al aplicar durante 3 años un promedio 74.3 ton ha<sup>-1</sup> (220 kg N ha<sup>-1</sup>) de estiércol de bovino a 15,200 plantas ha<sup>-1</sup> de maíz (híbrido SB-302) y 0.03 kg de N planta a lo reportado por Civeira y Rodríguez (2011) al utilizar diferentes cantidades de zeolita y fertilizante (200kg N ha<sup>-1</sup>) en maíz.

El bajo contenido de nitrógeno absorbido en plantas de maíz puede explicarse al patrón de mineralización de las excretas maduras, tal y como lo menciona Salazar-Sosa *et al.* (2010); Celaya y Castellanos (2011) y López y Hirzel (2012) ya que al inicio existe una fase de inmovilización y 6 semanas después se presenta la mineralización neta.

El procesamiento de la excreta madura fue de 7 semanas, siendo probable que no haya alcanzado su máxima tasa de mineralización de nitrógeno como lo señaló Del Pino *et al.* (2007) al determinar que a las 6 semanas la excreta de gallina y la cama de pollo (mezcla de estiércol de pollo y cascara de arroz) mineralizaron más nitrógeno que la excreta de vaca, siendo hasta las 10 semanas cuando presentó su máxima mineralización.

Así mismo, las plantas de maíz abonadas con excretas maduras presentaron 7.2% más nitrógeno comparado con las excretas secas; sin embargo, no fue utilizado con eficiencia durante la etapa vegetativa del maíz; lo que concuerda con López y Hirzel (2002) al medir la mineralización del nitrógeno en un bioestabilizado de excreta de cerdo generando menor mineralización y disponibilidad de nitrógeno aplicado hacia la planta. La velocidad de liberación de nutrimentos en excretas maduras, es una medida de la disponibilidad de ellos, en especial del nitrógeno, como lo señala Celaya y Castellanos (2011) durante la transformación de descomposición y mineralización de la materia orgánica (Medina *et al.*, 2010) se promueve mayor disponibilidad del nitrógeno hacia las plantas siempre y cuando se cumpla una adecuada relación C/N al inicio del proceso.

## **VI. CONCLUSIONES**

El abono de excretas secas de cerdos alimentados con niveles altos (3.5 EMM kg peso vivo<sup>-1</sup>) mejoraron el crecimiento del maíz, sobresaliendo en diámetro del tallo, contenido de materia seca y N absorbido por planta, además se comprobó un efecto en suelo al retener mayor volumen de agua y eliminar menor contenido de nitratos por maceta.

## **RECONOCIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al proyecto: Optimización de un sistema rotacional de cerdos para el reciclaje de nutrimentos y el cultivo de maíz (PROMEP 103.5/07/2595).

## **REFERENCIAS**

1. Avendaño, A. C. H., G. Molina, J. D., W. Trejo, L. C., C. López, C., I. Cadena, J. 2008. Respuesta a altos niveles de estrés hídrico en maíz. *Agronomía Mesoamericana* 19(1): 27-37.
2. Bautista, F., Palma-López, D. y Huchin-Malta, W. 2005. Actualización de la clasificación de los suelos del estado de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. 105- 122.
3. Bolaños Aguilar A. y E. D., Jean - Claude E. 2012. Distancia entre surcos en el rendimiento y calidad de la materia seca de maíz. *Rev Mex Cienc Pecu.* 2(3): 299-312.
4. Carter, M., J. Sanderson J., J. Macleod. 2003. Influence of compost on the physical properties and organic matter fractions of a fine sandy loam throughout the cycle of a potato rotation. *Can. J. Soil science.* 84: 211-218.
5. Celaya, M. H. y Castellanos, V. A. E. 2011. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra latinoamericana.* 29: 343-356.
6. Cervantes, F., C. Saldívar, J., J. Yescas, F. 2007. Estrategias para el aprovechamiento de desechos porcinos en la agricultura. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales.* 3: 3-12.
7. Civeira, G. y M. B. Rodríguez. 2011. Nitrógeno residual y lixiviado del fertilizante en el sistema suelo-planta-zeolitas. *CI. Suelo (Argentina)* 29(2): 285-294.
8. Delve, R. J., Cadish, G., Tanner, J. C., Thorpe, W., Thorne, P. J., Giller, K. E. 2001. Implications of livestock feeding managements on soil fertility in the smallholder farming systems of sub-Sahara Africa. *Agricultural Ecosystem Environment* 84: 227-243.
9. Del Pino, A., C. Repetto., C. Mori y Carlos Perdomo. 2007. Patrones de descomposición de estiércoles en el suelo. *Terra latinoamericana.* 26:43-52. Delve R. J, G. Cadish G., J.
10. Dimas, J. L., A. Díaz, E., E. Martínez, R., C. Valdez, R. 2001. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. *Terra latinoamericana.* Vol. (19)4: 293-299.
11. Fallah, S., A. Tadayyon. 2010. Absorción y eficiencia del Nitrógeno en maíz forrajero: Efecto del Nitrógeno y la densidad de población. *Agrociencia.* 44: 549-560.
12. Figueroa-Viramontes, U., J. A. Cueto -Wong, J. A. Delgado, G. Núñez-Hernández, D.G. Reta-Sánchez, H. M. Quiroga-Garza, R. Faz-Contreras y J. L. Márquez-Rojas. 2010. Estiércol de bovino lechero sobre el rendimiento y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero. *Terra latinoamericana.* Vol. 28(4):361-369.
13. Fortis H., M., J. A. Leos R., I. Orona C., J. L. García H., E. Salazar S., P. Preciado R., J. A. Orozco V. y M. A. Segura C. 2009. Uso de estiércol en la Comarca Lagunera: 104-127.
14. Gerard L, Velthof J, Nelemans O, Kuikman P. 2005. Gaseous nitrogen and carbon losses from pig manure derived from different diets. *Waste management. Technical reports . J. Environ. Qual.* 34: 698-706.
15. Kumar, K. y K. Goh. 2002. Management practices of

- antecedent leguminous and non leguminous crop residues in relation to winter wheat yields, nitrogen uptake, soil nitrogen mineralization and simple nitrogen balance. *European Journal of Agronomy*. Vol.(16):295-308.
16. Lemus, C. y Ly, L. 2010. Estudios de sostenibilidad de cerdos mexicanos pelones y cuinos. La iniciativa nayarita. *Revista computarizada de producción porcina*. Vol 17(2): 89-98.
  17. López, R. G. y Hirzel, C. J. 2012. Mineralización del N en enmiendas orgánicas en condiciones de laboratorio. *Revista Agropecuaria y Forestal* (1):15-20.
  18. Ly, J. 2008. Una aproximación a la fisiología de la digestión de cerdos criollos. *Revista computarizada de producción porcina*. 15(1).
  19. Magdub, M. A., S. Larqué A. y G. Nexticapan, A. 2005. Sistema de producción continua de maíz, una alternativa para el desarrollo agropecuario sostenible. Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY): 1-14.
  20. Medina, L. A., Monsalve, O. I., Forero, A.F. 2010. Aspectos prácticos para utilizar materia orgánica en cultivos hortícolas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. Vol. 4 (1):109-125.
  21. Morales-Maldonado. E. R., W. Trejo, L., R. H. Santos R. 2012. Caracterización química de excretas de cerdo secas y maduras provenientes de tres niveles de energía. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15:567 -573.
  22. Organización Mundial de la Salud. 2006. Guías para la calidad del agua potable.Recomendaciones. Ediciones de la OMS, Ginebra. Vol.13:98.
  23. Parson, D., L. Ramírez - Aviles., J. H. Cherney., Q., Ketteringsd., R. W. Blake., Ch. F. Nicholson. 2009. Agriculture, ecosystems and environment. Issues 1–2.Vol (133):123–134.
  24. Quezada, C., I. Vidal, L. Lemus y H. Sánchez. 2007. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre rendimiento y calidad de fruta de frambuesa (*Rubus ideaus* L.) bajo dos programas de fertirrigación. *R.C. Suelo Nutr.Veg.*7: 1-15.
  25. Qian, P. y J. Schoenan. 2002. Availability of nitrogen in solid manure amendments with different C:N ratios. *Canadian Journal of Soil Science*. Vol(82): 219-225.
  26. Reta, S. D. G., J. A. Cueto, W., U. Figueroa, V. 2004. Efecto de la aplicación de estiércol y composta en maíz forrajero en dos sistemas de siembra. Informe de Investigación. INIFAP. Campo experimental la laguna. Torreón, Coahuila. México. 25-30.
  27. Salazar-Sosa, E., J. A. Leos Rodríguez, M. Fortis Hernández y C. Vázquez Vázquez. 2002. Nitrogen recovery and uptake by wheat and sorghum in stubble an no-tillage systems. *Agrociencia* 36: 433-440.
  28. Salazar- Sosa, E., H. I. Trejo Escareño, C. Vázquez -Vázquez., J. D. López - Martínez. 2007. Producción de maíz bajo riego por cintilla, con aplicación de estiércol bovino. *Rev. Int. Bot. Exp.*76: 169-185.
  29. Salazar- Sosa, E., Trejo -Escareño, H. I., López -Martínez, J. D., Vazquez - Vazquez, C., Serrato-Corona, J.S., Orona-Castillo, I.,

- Flores-Marguez, J.P.2010. Efecto residual de estiércol bovino sobre el rendimiento de maíz forrajero y propiedades del suelo. *Terra latinoamericana*. 28(4):381-390.
30. Sierra, V.A. 2000. Conservación y genética del cerdo pelón en Yucatán y su integración a un sistema de producción sostenible: primera aproximación. *Arch. Zootec*. 49:415-421.
  31. Soto, G. 2003. El proceso de compostaje. Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica: 30-57.
  32. Tognetti, C., M.J Mazzarino y F. Laos. 2008 Compost of municipal organic waste: Effects of different management practices on degradability and nutrient release capacity. *Soil Biology and Biochemistry* 40(9): 2290-2296.
  33. Trejo, L. W. 2005. Strategies to Improve the Use of Limited Nutrient Resources in Pig Production in the Tropics, Supplement 85. Unikassel Versitat. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropic*: 37-38.

## Estudio de la variación de constantes en el modelo de fricción de LuGre

Sánchez-Salinas Ubaldo<sup>1</sup>, Quintanar-García Sergio<sup>1</sup>, Olguin-Camacho Juan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> División de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan,  
Domicilio Conocido S/N El Saucillo Huichapan Hidalgo México.  
emmanuel\_516@hotmail.com, squintanar@iteshu.edu.mx, jolguin@iteshu.edu.mx

**Resumen**— El presente trabajo reporta el estudio de la respuesta de un sistema mecánico sometido a fricción mediante el modelo de LuGre, en donde se realizó la variación de las constantes de rigidez, amortiguamiento, fuerzas de fricción cinética y estática presentes en dicho modelo mediante la inclusión de un parámetro de muestreo, en donde se obtienen las relaciones existentes entre el crecimiento de dicho parámetro y las fuerzas de fricción y desplazamientos desarrollados por la respuesta del sistema ante condiciones iniciales cero y una fuerza de excitación, el sistema estudiado constan de elementos masa-fricción, al cual se le es sometido a una fuerza externa.

**Abstract**— This paper reports the study of the response of a mechanical system under friction by LuGre model, where the variation of the constants of stiffness, damping forces static and kinetic friction present in this model was performed by including a parameter sampling, where the relationship between the growth of this parameter and the frictional forces and displacements developed by the response of the system to zero initial conditions and an excitation force is obtained, the system studied consists of mass elements - friction, which it will be subjected to an external force.

**Palabras clave** — Sistema mecánico, amortiguamiento, respuesta, pérdida de energía, caracterización.

### I. INTRODUCCIÓN

En todo sistema físico existen variantes con respecto a su idealización en el modelo matemático, dicha variación es debida a la exclusión de variables o a la no-linealidad de algún componente del sistema que no fue posible capturar por medio del modelo inicial. Un ejemplo de ello son las variaciones que se presentan en los sistemas mecánicos debido al fenómeno de fricción, que se presenta al entrar en contacto dos o más superficies, ya sea de forma puntual o distribuida, dicho fenómeno se ve reflejado en una fuerza contraria al movimiento cuya magnitud es referida a las características del sistema en cuestión y su valor, donde el proceso para su obtención es un tema de discusión para el cual se han propuesto modelos que buscan capturar el comportamiento del fenómeno. Estos modelos se clasifican en estáticos y dinámicos, que pueden ser descritos por ecuaciones diferenciales, ecuaciones diferenciales algebraicas o modelos híbridos que incluyen eventos [1]. Por sus propiedades de disipación de

energía, la fricción es considerada como un elemento de amortiguamiento, propiedad que ha sido estudiada en diversos procesos. Choia *et al.* [2] proponen un modelo de fricción que represente el fenómeno de histéresis en la fase pre-deslizante, el cual se realiza mediante el análisis de experimentos y se propone un modelo de fricción mejorado utilizando el modelo Preisach por medio de una red neuronal, para validar el modelo se realizaron pruebas con un sistema de servo-posicionamiento; Martínez-Rosas *et al.* [3] reportaron un modelo dinámico para describir la fuerza de fricción entre dos cuerpos en contacto, el cual está basado en el modelo de fricción de LuGre, en donde marcan como diferencia principal la descripción del efecto Stribeck, el cual modelan con una ecuación diferencial no lineal de primer orden, que reproduce el mismo comportamiento que en estado pseudo-estacionario que el modelo de LuGre y ofrece propiedades de pasividad equivalentes, sin embargo marcan la relevancia de poder hacer la identificación en tiempo real de parámetros asociados al fenómeno de fricción; Ksentini *et al.* [4] realizaron el análisis y la simulación de un sistema oscilatorio de dos grados de libertad con fricción seca. El modelo de fricción seca se basa en el enfoque Dahl, en donde estudiaron el movimiento libre y forzado y realizan una comparación entre los modelos de Coulomb y Dahl en donde concluyen que el modelo Dahl describe en forma más refinada el fenómeno de fricción, pero este requiere de la caracterización experimental de sus constantes; Jingliang *et al.* [5] presentan un modelo híbrido fricción-neumático/carretera para aplicaciones de vehículos en la simulación de movimiento y control, en el cual utilizan el modelo de fricción dinámica de LuGre combinado con la adhesión/partición del modelo de deslizamiento de la superficie de contacto del neumático/carretera, donde demuestran que el modelo de fricción dinámica LuGre predice la deformación del caucho y el esfuerzo de las distribuciones dependientes de las cargas no lineales y normales en la zona de contacto, dicho modelo es simulado y comparado con respecto a los experimentos realizados por pilotos de carreras profesionales; Shirvani *et al.* [6] presentan el modelado de una rectificadora en donde se implementa el modelo de fricción del



LuGre para lograr el rendimiento estático y dinámico deseado, el modelo de fricción LuGre se utiliza para capturar el efecto estático y dinámico en la unidad de alimentación para el modelo desarrollado, el cual se ha simulado en entorno MATLAB / Simulink. Los resultados reflejan la influencia de la molienda y la fricción fuerzas en el modelo completo; Yadav y Agnihotri [7] reportan la obtención del modelo dinámico de un actuador hidráulico mediante simulación haciendo uso del modelo de fricción LuGre, el sistema mecánico utilizado es un sistema de segundo orden de un grado de libertad, en donde hacen énfasis de la utilidad de su estudio en la comprensión de las discrepancias relativas, que puedan surgir debido al uso de diferentes modelos de fricción, además comparan sus resultados con datos experimentales donde observan variaciones con respecto al modelo propuesto, en donde argumentan que son debidas a la selección del modelo y sus constantes.

De los trabajos anteriores se observa que en la implementación de los modelos de fricción se hace uso de los valores de las constantes reportadas en trabajos previos [8,9] dejando de lado las propiedades del sistema en el cual se implementan las cuales pueden modificar la respuesta del mismo. En el presente trabajo se reporta el estudio del comportamiento del modelo de LuGre al variar las constantes de rigidez, amortiguamiento, fuerzas de fricción cinética y estática con respecto a su implementación.

**II. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para determinar el grado de influencia de las constantes del modelo de LuGre, se realizó el siguiente método: A) Determinación de las variables susceptibles a cambio, B) Solución del modelo de LuGre, C) Mapeo de constantes.

*A. Determinación de las variables susceptibles a cambio.*

Para determinar las variables que son susceptibles a cambio en la implementación del modelo de LuGre se realizó un análisis de las ecuaciones que lo describen [8]:

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{|v|}{g(v)}z \tag{1}$$

$$F_r = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \tag{2}$$

$$g(v) = \frac{1}{\sigma_0} \left[ F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{v}{v_s}\right)^2} \right] \tag{3}$$

Donde:

$F_r$  = Fuerza de fricción.

$z$  = Deflexión de cerda del modelo.

$v$  = Velocidad del sistema.

$\sigma_0$  = Coeficiente de rigidez.

$\sigma_1$  = Coeficiente de amortiguamiento de fricción seca.

$\sigma_2$  = Coeficiente de amortiguamiento viscoso.

$F_s$  = Fuerza de fricción estática.

$F_c$  = Fuerza de fricción cinética.

$v_s$  = Velocidad Stribeck.

Al analizar las constantes de las ecuaciones anteriores se determinó que  $F_s$  y  $F_c$  son dependientes de cada modelo, puesto que está relacionado con la fuerza normal aplicada a la superficie en contacto, por tanto esta puede variar en función del peso o la influencia de otras variables sobre el sistema a modelar. De los coeficientes  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  se observa que son constantes dependientes de las superficies en contacto y deben ser determinadas de forma experimental puesto que estas varían, dependiendo de la rugosidad, material y sección longitudinal.

Para poder plasmar el efecto de la variación de los parámetros antes mencionados se establecen las siguientes relaciones [8]:

TABLA I  
RELACIÓN ENTRE CONSTANTES

$F_c = a$	$a =$ constante de prueba
$F_c = 1.5F_s$	
$\sigma_0 = 10^5$	
$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_0}$	
$\sigma_2 = a(0.4)$	

*B. Solución del modelo de LuGre*

Para implementar el modelo planteado por [8], se propone realizar el modelo de la fig. 1 (a) en donde  $m = 1$  Kg y  $f(t)$  es una función trapezoidal, fig. 1 (b) [8].

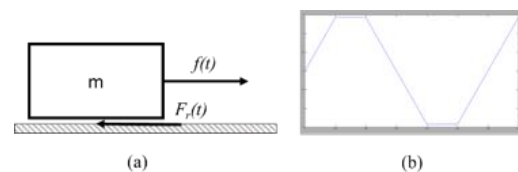


Fig. 1 (a) Sistema masa-fricción, (b) función trapezoidal  $f(t)$ .

Atendiendo al sistema mostrado en la fig. 1 y a las ecuaciones 1,2 y 3, se plantean las siguientes ecuaciones para su solución en Matlab [10].

$$m\ddot{x} + Fr = f(t) \tag{4}$$

$$\dot{X}_1 = X_2 \tag{5}$$

$$\dot{X}_2 = f(t) - \sigma_0 X_3 - \sigma_1 X_2 - \sigma_2 g(\dot{X}_1) \dot{X}_3 \tag{6}$$

$$\dot{X}_3 = \dot{X}_1 - g(\dot{X}_1) \dot{X}_3 \tag{7}$$

En donde:

$x, \dot{x}$  y  $\ddot{x}$  = Posición, velocidad y aceleración del sistema.

$$\dot{X}_1 = \frac{dx}{dt}$$

$$\dot{X}_2 = \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$\dot{X}_3 = \frac{dz}{dt}$$

Al resolver las ecuaciones anteriores y con los coeficientes reportados por [9] se obtiene la solución mostrada en la fig. 2.

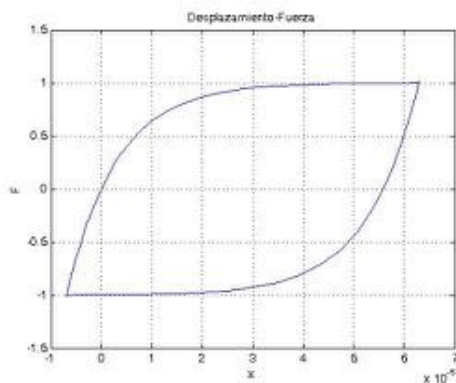


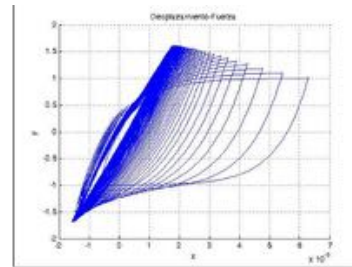
Fig. 2 Respuesta desplazamiento-Fuerza de fricción del sistema planteado.

De la fig. 2, se observa la pérdida de energía en el proceso de retorno del sistema, efecto característico de la fuerza de fricción en sistemas mecánicos.

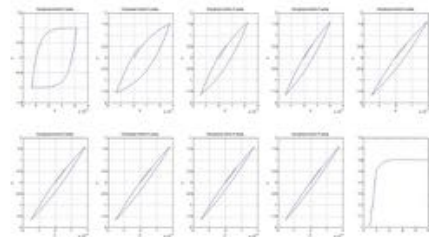
C. Mapeo de constantes.

Una vez obtenidas las ecuaciones del sistema planteado en la fig. 1. y la solución con los parámetros clásicos utilizados en el modelo de Lugre, se procede a hacer un mapeo de estos valores utilizando las relaciones mostradas en la tabla I.

Al variar el valor de  $a$  para la fuerza de fricción estática y cinética en un rango de 0 a 10 se obtienen las respuestas mostradas en la fig. 3.



(a)



(b)

Fig. 3 Respuesta del sistema al variar  $F_s$  y  $F_c$  con valores de  $a$  en el intervalo 1 a 10.

De la fig. 3. Se observa que al variar los valores de  $F_c$  y  $F_s$  la diferencia entre la energía de avance y retroceso se reduce al incrementar dichos valores.

Los valores de  $\sigma_0, \sigma_1$  y  $\sigma_2$  al ser característicos de las superficies en contacto se variaron haciendo uso del parámetro  $a$  en el intervalo 0 a 10 para las tres constantes y las respuestas son mostradas en la fig. 4.

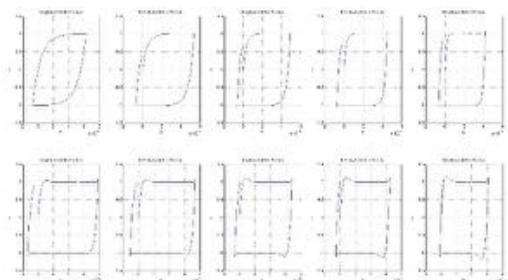


Fig. 4 Respuesta del sistema al variar  $\sigma_0, \sigma_1$  y  $\sigma_2$  con valores de  $a$  en el intervalo 1 a 10.

De la fig. 4 se observa que el recorrido de  $x$  se reduce al incrementar los valores de  $\sigma_0, \sigma_1$  y  $\sigma_2$ .

III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las respuestas del sistema mostradas en la fig. 3 se terminó que existe una relación inversa

entre la diferencia de energía de avance y retroceso y el aumento de  $F_s$  y  $F_c$  así como un aumento en el valor máximo de cada respuesta como se muestra en la fig. 5.

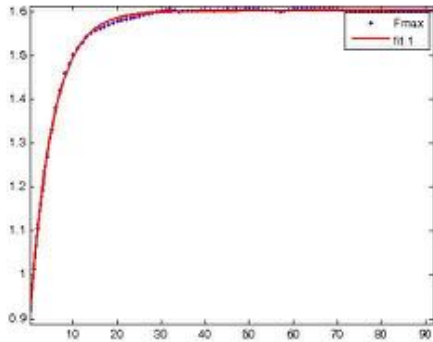


Fig. 5 Valor máximo de  $F_r$  de la respuesta del sistema muestreando el valor de  $a$  en el intervalo de 0 a 10.

El máximo valor de  $F_r$ , en la respuesta de sistema bajo las condiciones descritas, se incrementa hasta su estabilización, lo que marca que si el valor de  $F_s$ , y  $F_c$  está dentro de la fase de crecimiento de la gráfica de la fig. 5 este es significativo con respecto a su valor inicial, dicho comportamiento se caracterizó mediante la siguiente ecuación:

$$f_{max} = 1.599e^{3.699 \times 10^{-5}a} - 0.7179e^{-0.1949a} \quad (7)$$

Donde  $f_{max}$  es la máxima fuerza de fricción de la respuesta del sistema bajo cada valor de  $a$ .

De la ecuación 7 es apreciable que la componente de decrecimiento tiene una velocidad mayor respecto a la componente de crecimiento por lo cual la estabilidad del valor se da antes de la mitad del proceso muestreado.

En la figura 4. Se observa que el máximo valor es conservativo pero no así el recorrido de  $x$ , como se puede observar en la fig.6.

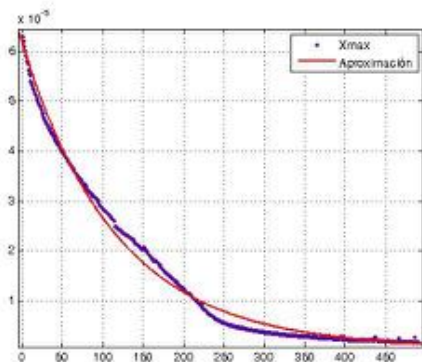


Fig. 5 Valor máximo de la respuesta del sistema muestreando el valor de  $a$  en el intervalo de 0 a 10.

El decrecimiento del desplazamiento se ve reducido en relación con el crecimiento del parámetro  $a$ , el cual es aproximado por la siguiente expresión:

$$x_{max} = 5.86 \times 10^{-5}e^{-0.008824a} - 3.179 \times 10^{-6}e^{-0.003147a} \quad (8)$$

Donde  $x_{max}$  es el máximo desplazamiento de la respuesta del sistema bajo cada valor de  $a$ .

#### IV. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló un análisis del efecto que tienen las constantes  $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_3, F_s$  y  $F_c$  del modelo de fricción de LuGre, en donde se observó que al aumentar las fuerzas de fricción estática y cinética en la respuesta del modelo se reduce la diferencia entre la energía de avance y de retorno además de incrementar la fuerza de fricción máxima de la respuesta, en donde dicho incremento alcanzó hasta el 160% del modelo inicial, bajo el comportamiento descrito por la ecuación 7, así mismo al variar las constantes de rigidez, amortiguamiento seco y viscoso de la ecuación 2, se concluyó que el desplazamiento del sistema se ve afectado de forma considerable, reduciéndose este al aumentar dichos valores, como se describe en la ecuación 8, la reducción del desplazamiento alcanza hasta el 50% del valor inicial.

Del análisis anterior se concluye que la variación de estos parámetros influye de manera considerable en la respuesta del sistema de estudio, por lo cual es recomendable hacer un análisis de las variables estudiadas en el presente trabajo a la hora de implementar el modelo de fricción de LuGre en un sistema físico.

#### REFERENCIAS

- [1] H. Olsson, K.J. Åström, C. Canudas de Wit, M. Gäfvert and P. Lischinsky, "Friction Models and Friction Compensation," *European Journal of Control*, vol. 4, pp. 176–195, 1998.
- [2] J. J. Choa, S. I. Han and J. S. Kim, "Development of a novel dynamic friction model and precise tracking control using adaptive back-stepping sliding mode controller," *Mechatronics*, vol. 16, pp. 97–104, Mar. 2006.
- [3] J. C. Martínez-Rosas, L. Alvarez-Icaza and D. Noriega-Pineda, "Modelo dinámico de fricción: un enfoque para identificación y control," *Congreso Anual 2009 de la Asociación de México de Control Automático 2009*, paper amac2009-17, p. 1.

- [4] O. Ksentini, M. S. Abbas, J. Abdesslem, F. Chaari and M. Haddar, "Study of Mass Spring System Subjected to Dahl Friction," *International Journal of Mechanic Systems Engineering*, vol. 2, pp 34-41, Feb. 2012.
- [5] L. Jingliang ,Z. Yizhai and Y. Jingang, "A Hybrid Physical-Dynamic Tire/Road Friction Model," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 135, pp. 1-11, Oct. 2012.
- [6] H. K. Shirvani V. Järvenpä and L. Yuan, "Dynamic Modeling and Simulation of a Cylindrical Grinder in Presence of Non-linear Friction Effect," *Research Conference In Technical Disciplines 2013*, p. 47.
- [7] J. Yadav1 and G. Agnihotri, "Modeling and simulation of hydraulic actuator with viscous friction," *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, vol. 3, pp 540-547, Mar. 2015.
- [8] C. Canudas de Whit, H. Olsson, K.J. Åström and P. Lischinsky, "A new model for control of systems whit friction," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, pp. 421-425, Mar. 1995.
- [9] B. Armstrong-Hélouvry, *Control of machines whit friction*, Boston, MA: Kluwer, 1991.
- [10] Matlab 2010, Matlab R2010a, versión 7.10.0.499, febrero 5, 2010.

## Estado Físico de la planta, paradigmas de identificación experimento en motor de corriente directa

C.D. Romero-Ortiz, J. M. Hernández-Paredes

Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Domicilio Conocido El Saucillo, Huichapan, Hidalgo, México. a10021035@iteshu.edu.mx

**Resumen**— En la actualidad existen diferentes sistemas Mecatrónicos que por su complejidad no se cuenta con el modelo matemático para poder aplicársele un control que mejore la eficiencia de los procesos de producción u operación, sobre todo en la industria, los cuales dan apertura a sistemas de identificación por lo que este documento describe la metodología para la identificación del modelo de corriente de un motor de corriente directa, que a pesar de no ser un sistema complejo da la apertura a diferentes paradigmas con los que se atraviesa, al realizar la identificación, se encontró que uno de los mayores problemas es el estado físico del sistema para lo que se realizaron cuatro experimentos donde se muestra que la aproximación es más precisa de acuerdo al estado físico ideal para la planta, se presenta el modelo matemático de la planta para una comparación precisa de la respuesta al escalón con cada una de las identificaciones obtenidas.

**Abstract**— At present there are different Mechatronic systems whose complexity has no mathematical model to control disqualifies improve the efficiency of production processes or operation, especially in industry, which give opening identification systems what this document describes the methodology for identification of the current model of a DC motor, which despite not being a complex system gives openness to different paradigms with which it traverses, to make the identification, it was found that one of the biggest problems is the physical state of the system to which four experiments which show that the approach was more accurate as the most ideal physical condition for the plant, the mathematical model of the plant is presented for a precise comparison is performed the step response with each of the obtained IDs.

**Palabras clave** — Identificación de sistemas, modelado, caracterización, modelo matemático, planta.

### I. INTRODUCCIÓN

El proceso de modelado es uno de los procesos que por lo común son obtenidos a partir del método experimental con los parámetros que

tiene el sistema, este proceso genera modelos analíticos que representan el comportamiento del sistema matemáticamente, pero cuando se desconocen estos parámetros existe un medio efectivo para obtener estos modelos que consiste en utilizar técnicas de identificación de sistemas [1].

La identificación de sistemas se lleva a cabo con la ayuda de software especializado que estima modelos analíticos muy similares al comportamiento del sistema y que no necesitan tener la caracterización del sistema. Estos modelos son obtenidos con la finalidad de crear un controlador que se adapte a las necesidades de un proceso específico y que además pueda ser simulado su comportamiento para obtener estabilidad y precisión en la respuesta lo más rápido posible.

### II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder determinar el modelo de algún sistema analíticamente se utiliza la caracterización que tenga la planta, en el caso del modelo de corriente de un motor de corriente directa, el cual está definido por un cero y dos polos, hay que conocer su torque de salida, la corriente a la cual trabaja, su tensión nominal, la resistencia de armadura, inductancia de armadura, constante contra electromotriz, fuerza de fricción que presenta entre el rotor y estator, masa, dimensiones, momento de inercia. Estos parámetros son obtenidos a base de experimentos y formulas ya definidas.

El modelo de corriente en tiempo continuo se expresa como en la ecuación (1).

$$\frac{I(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{Js+B}{(JL_a)s^2+(JR_a+BL_a)s+BR_a+K_aK_b} \quad (1)$$

donde:

- J= momento de inercia del rotor (kg.m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)
- B= coeficiente de amortiguamiento del sistema mecánico (Nms)
- K<sub>a</sub>= constante de armadura de fuerza electromotriz (Nm/Amp)
- K<sub>b</sub>= constante de armadura de fuerza electromotriz (Nm/Amp)

- Ra= resistencia eléctrica (ohm)
- La= inductancia eléctrica (H)
- $\varepsilon(s)$  = Fuente de Tensión (V)
- I(s)= Corriente de salida (A)

Sin embargo hay que tomar en cuenta cuestiones relativas del procedimiento durante la experiencia de identificación. La identificación durante la operación normal del proceso debe ser informativa, lo más corta y menos invasiva posible. Estas consideraciones constituyen la base de las técnicas de identificación del sistema a evaluar y que han sido reconocidas como tales en la literatura de control de procesos [2, 3, 4].

A. Metodología de identificación

Se realizaron cuatro experimentos de identificación del modelo de corriente de un motor de 12 volts en diferentes condiciones físicas, la identificación se realizó durante un lapso de 10 segundos, con un periodo de muestreo de 0.01 y una tensión de entrada a 12 Volts, conectando una resistencia de 1 ohm en serie al motor y mediante ley de ohm y ley de caídas de tensión de Kirchhoff se obtiene la corriente total que pasa por el circuito solo con la lectura de la tensión que hay en la resistencia como se puede visualizar en la ecuación 2 [5].

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_{in}}{1\Omega} = V_{in} \quad (2)$$

Experimento 1.

La primera identificación se realizó cuando el motor tenía grandes cúmulos de óxido férrico en los baleros y el estator estaba con polvo, la planta se puede observar en la Fig. 1.



Fig. 1 Adquisición de datos del experimento 1.

Los datos de adquisición son guardados desde el software Simulink de MATLAB en dos variables del espacio de trabajo nombradas como

voltaje y corriente, estos datos pueden ser visualizados en las gráficas de las Fig. 2 y 3.

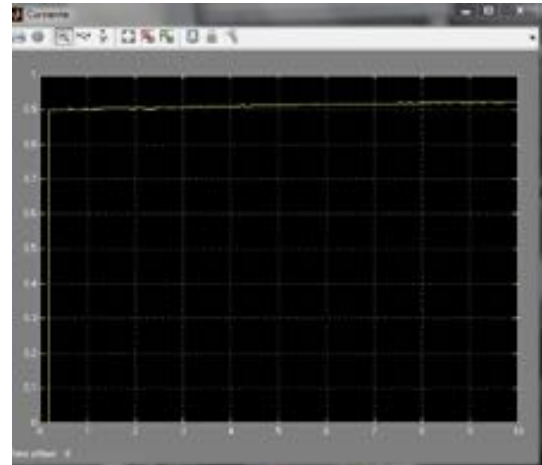


Fig. 2 Gráfica de corriente del motor.

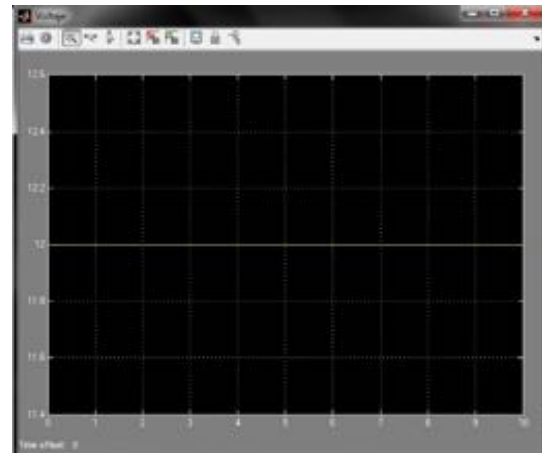


Fig. 3 Gráfica de voltaje de entrada.

Una vez realizada la adquisición de los datos, se utiliza la herramienta IDENT de MatLab en la cual se definen los parámetros bajo los que se llevó a cabo la recopilación de datos, pidiéndole posteriormente al programa una estimación del probable modelo de la planta con un cero y dos polos, el modelo y su porcentaje de estimación se pueden visualizar en la Fig. 4.

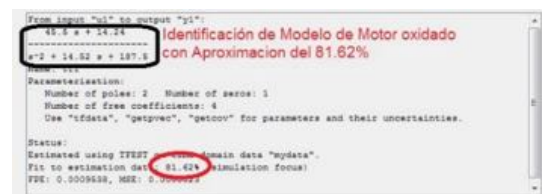


Fig. 4 Estimación del modelo del sistema en IDENT

En la Fig. 5 se puede observar la gráfica del modelo de salida que IDENT estima (color azul) con un 81.62% de aproximación y datos de adquisición (color negro).

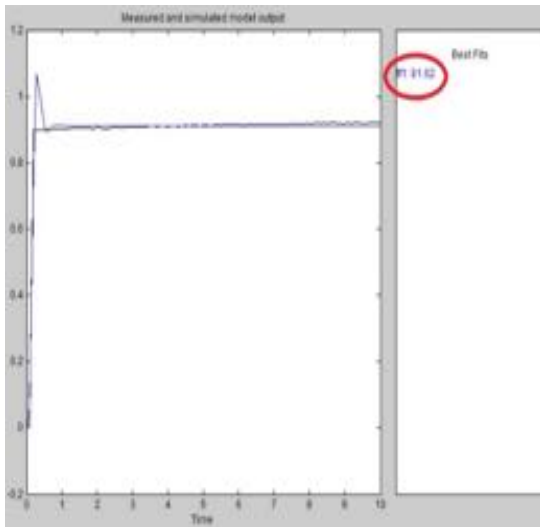


Fig. 5 Gráfica del modelo de salida con IDENT.

Para hacer una comparación del modelo estimado y el modelo del motor se muestran ambos modelos en las ecuaciones 3 y 4.

$$\frac{I(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{12816.97613s+224562.3342}{s^2+487082.2281s+14068965.52} \quad (3)$$

$$\frac{I(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{45.5s+14.24}{s^2+14.52s+187.5} \quad (4)$$

En MatLab a los modelos se les puede visualizar su respuesta al escalón unitario como en las Fig. 6 y 7.

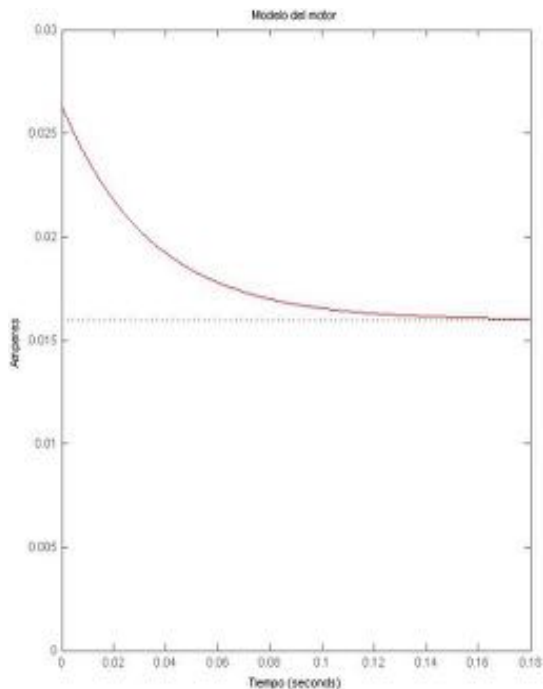


Fig. 6 . Gráfica de la respuesta al escalón unitario del modelo de corriente del motor de la ecuación (3).

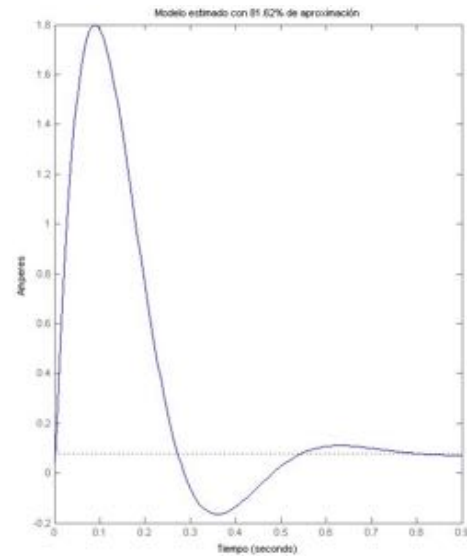


Fig. 7 Gráfica de la respuesta al escalón unitario del modelo estimado de corriente con IDENT de la ecuación (4).

Experimento 2.

En el experimento se llevó a cabo la lubricación de uno de los baleros de que permiten el giro del rotor, como se muestra en la fig. 8.



Fig 8 Lubricación de un balero del motor con un lubricante anticorrosivo.

Al lubricar el balero se hizo una adquisición nuevamente con Simulink, en la figura 9 se observa los datos de adquisición de corriente del motor.

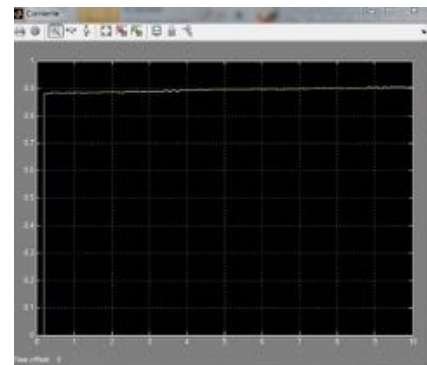


Fig. 9 Gráfica de adquisición de corriente de experimento 2.

Ya con los datos de la adquisición con la ayuda de IDENT de MatLab, se determina el modelo estimado del sistema con su porcentaje de estimación como se muestra en la Fig. 10.

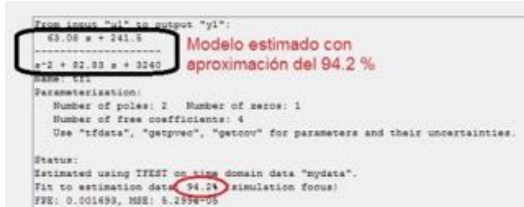


Fig. 10 Estimación del modelo del motor del experimento 2.

En la Fig. 11 se puede observar la gráfica del modelo de salida que IDENT estima (color azul) con un 94.2% de aproximación y datos de adquisición (color negro).

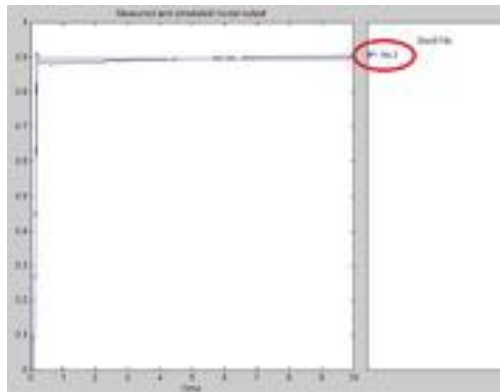


Fig. 11 Gráfica del modelo del sistema estimado del experimento 2 con IDENT.

Como comparación del modelo estimado y el modelo del motor (ecuación (3)) se muestra el modelo estimado en la ecuación (5).

$$\frac{I(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{63.8s+241.5}{s^2+82.83s+3240} \quad (5)$$

En la Fig. 12 se muestra la gráfica en MatLab de la respuesta al escalón unitario del modelo estimado en el experimento 2.

Experimento 3.

En el experimento 3 se llevó a cabo la lubricación de ambos baleros que dan soporte al rotor y nuevamente se adquirieron datos para estimación de un nuevo modelo de corriente del motor de esta práctica, la graficas de Simulink son parecidas a las Fig. 2, 3 y 9, una vez con los datos de adquisición y con ayuda de IDENT nuevamente se realiza una nueva estimación del modelo con una aproximación del 94.42% como se observa en la Fig. 13.

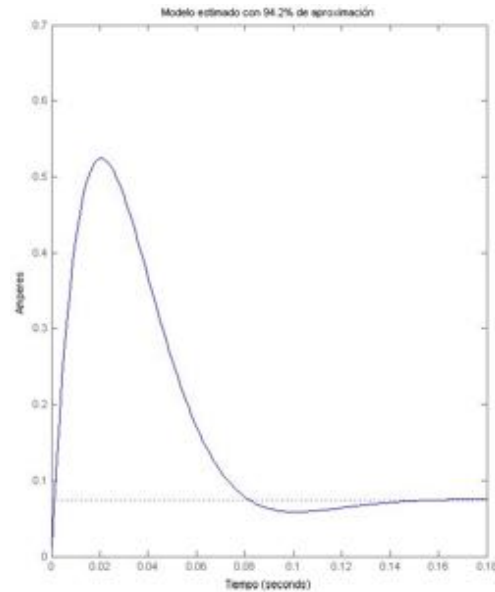


Fig 12 Grafica de la salida del modelo estimado en experimento 2 con un escalón unitario a la entrada.



Fig 13 Estimación del modelo del experimento 3 en IDENT de MatLab

En la Fig. 14 se puede observar la gráfica del modelo de salida que IDENT estima (color azul) con un 94.2% de aproximación y datos de adquisición (color negro).

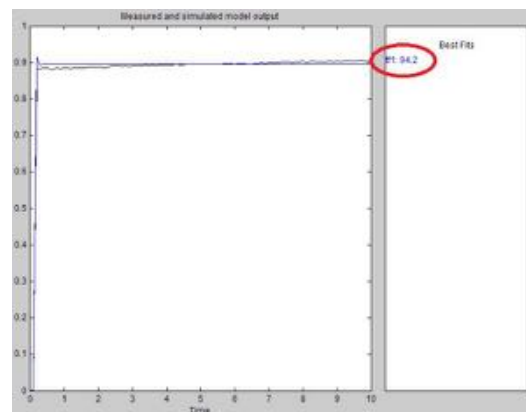


Fig 14 Gráfica del modelo del sistema estimado del experimento 3 con IDENT.

Como comparación del modelo estimado y el modelo del motor (ecuación (5)) se muestra el modelo estimado en la ecuación (6).

$$\frac{I(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{62.69s+222.5}{s^2+886.78s+2936} \quad (6)$$



En la Fig. 15 se muestra la gráfica en MatLab de la respuesta al escalón unitario del modelo estimado en el experimento 3.

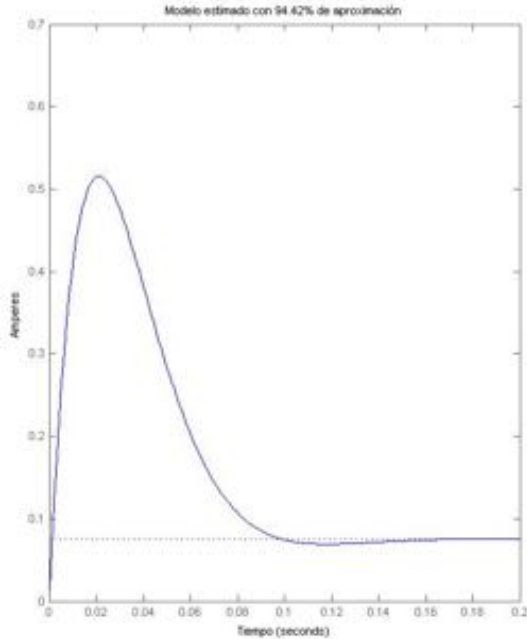


Fig 15. Grafica de la salida del modelo estimado en experimento 3 con un escalón unitario a la entrada.

Experimento 4.

En el experimento 4 se llevó a cabo con la limpieza total del motor y se volvió a lubricar todas las partes móviles y rotatorias del motor, se adquirieron datos para estimación de un nuevo modelo de corriente del motor de esta práctica, la graficas de Simulink son parecidas a las Fig. 2, 3 y 9, una vez con los datos de adquisición y con ayuda de IDENT nuevamente se realiza una nueva estimación del modelo con una aproximación del 94.82% como se observa en la Fig. 16.

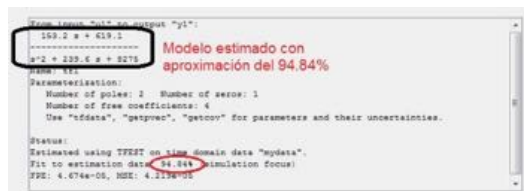


Fig 16 Estimación del modelo del experimento 4 en IDENT de MatLab

En la Fig. 17 se puede observar la gráfica del modelo de salida que IDENT estima (color azul) con un 94.84% de aproximación y datos de adquisición (color negro).

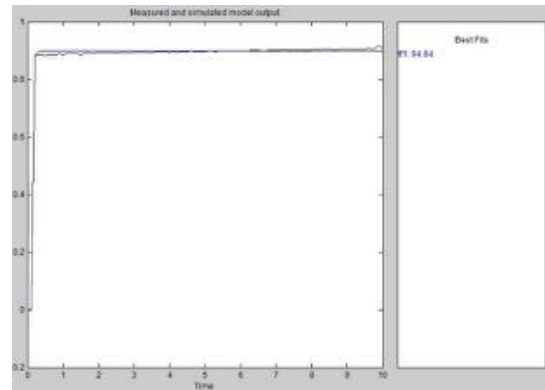


Fig 17 Gráfica del modelo del sistema estimado del experimento 3 con IDENT.

Como comparación del modelo estimado y el modelo del motor (ecuación (6)) se muestra el modelo estimado en la ecuación (7).

$$\frac{I(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{153.2s+619.1}{s^2+239.6s+8275} \quad (7)$$

En la Fig. 18 se muestra la gráfica en MatLab de la respuesta al escalón unitario del modelo estimado en el experimento 4.

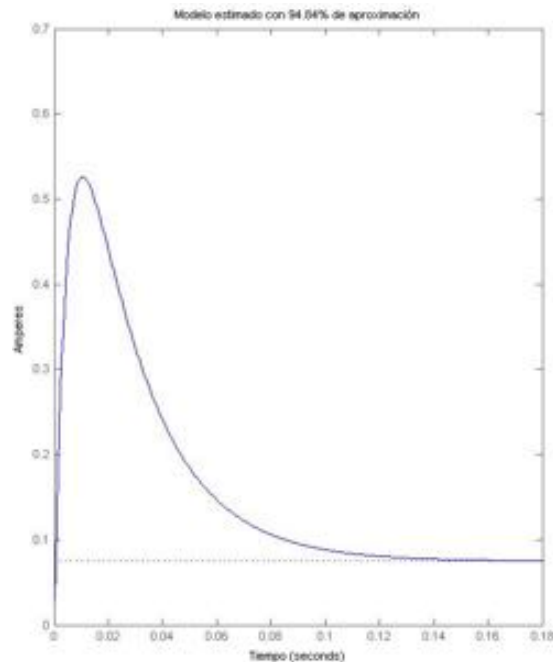


Fig 18. Grafica de la salida del modelo estimado en experimento 4 con un escalón unitario a la entrada.

**III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En esta sección se mostrar una comparativa entre los cuatros experimentos para obtener la aproximación de la función de transferencia que define al motor de CD (ver Tabla 1).

TABLA I  
COMPARATIVA ENTRE LOS EXPERIMENTOS PARA OBTENER  
UNA APROXIMACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA  
MENOR AL 7%.

Exp.	Función de transferencia	% A.
1	$\frac{I(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{45.5s + 14.24}{s^2 + 14.52s + 187.5}$	81.62
2	$\frac{I(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{63.8s + 241.5}{s^2 + 82.83s + 3240}$	94.2
3	$\frac{I(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{62.69s + 222.5}{s^2 + 886.78s + 2936}$	94.2
4	$\frac{I(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{153.2s + 619.1}{s^2 + 239.6s + 8275}$	94.84

#### IV. CONCLUSIONES

La herramienta IDENT de MATLAB es instrumento para poder determinar el modelo de cualquier sistema cuando se desconocen parámetros de la planta siempre y cuando la planta reúna ciertos requisitos como la eliminación de ruidos, además de que genera en ocasiones aproximaciones apegadas al modelo real de algunos sistemas, como en este caso el motor de corriente directa que se utilizó en este trabajo, al ser comparado el modelo matemático con el modelo identificado, no presentan una gran variación, teniendo como margen de error

menor al 6 por ciento, esta identificación es válida y el tiempo de obtención es relativamente corto a comparación de determinar parámetros mediante fórmulas matemáticas y experimentos con equipo especializado.

Al realizar el mantenimiento correctivo a un motor de corriente directa se puede rehabilitar para que se utilice nuevamente con las características de funcionamiento cercanas a un motor nuevo.

#### REFERENCIAS

- [1] Lung, L. *System Identification: Theory for the User*. 2nd edition... Prentice-Hall. New Jersey, (1999).
- [2] Braun, M.W., R. Ortiz-Mojica and D.E. Rivera, *Application of minimum crest factor multisinusoidal signals for "plant friendly" identification of nonlinear process systems*. Control Engineering Practice 10, 301-313, (2002).
- [3] Parker, R.S., D. Heemstra, F.J. Doyle III, R.K. Pearson and B.A. Ogunnaiké. *The identification of nonlinear models for process control using tailored "plant friendly" input sequences*. J. of Process Control 11(2), 237-250, (2001).
- [4] Rivera, D.E., H. Lee, M.W. Braun and H.D. Mittelmann, *Plant friendly system identification: a challenge for the process industries*. In: 13th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2003). Rotterdam, Netherlands. Pp. 917-922, (2003).
- [5] R. L. Boylestad, *Introducción al Análisis de Circuitos*, México: Pearson Educación, 2004

## Modelado matemático de un robot tipo PHANTOM Premium

M. Sabino Caballero, J. M. Hernández-Paredes

*Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Domicilio Conocido El Saucillo, Huichapan, Hidalgo, México. a10021035@iteshu.edu.mx*

**Resumen**— En el presente artículo se describe el modelo matemático de un robot háptico tipo PHANTOM Premium. La interfaz háptica que se presenta corresponde a un robot tipo serie que se diseñó y desarrolló en el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan con una arquitectura de tres grados de libertad, se presenta el modelo cinemático directo de posición, el modelo cinemático inverso de posición y el modelo dinámico, estas representaciones matemáticas describen el comportamiento geométrico y físico del dispositivo háptico, así mismo se presenta como parte de los resultados una simulación en el software de ingeniería MATLAB.

**Abstract**— In this article are described the mathematical model of a Premium PHANTOM haptic robot type. The haptic interface presented corresponding to a series type robot was designed and developed at the Instituto Tecnológico Superior de Huichapan with three degrees of freedom, the direct position kinematics model, the inverse kinematic model of position and presents dynamic model, these mathematical representations describe the geometric and physical behavior of the haptic device, so it comes as part of a simulation results in MATLAB software engineering.

**Palabras clave** —Cinemática, Dinámica, Háptico, Modelado, Robot.

### I. INTRODUCCIÓN

La robótica ocupa un lugar importante en la modernización industrial, la naturaleza multidisciplinaria de la robótica le permite involucrar una gran cantidad de áreas del conocimiento tales como matemáticas, física, computación, electrónica e inteligencia artificial. Un robot es una máquina con varios grados de libertad que se controla automáticamente, reprogramable y capaz de realizar múltiples tareas para producir bienes o servicios. Los robots tienen una gran aceptación en la vida moderna, esto se debe a su eficacia y beneficios que proporcionan un gran desarrollo industrial y por consiguiente al bienestar de la sociedad [2].

La destreza de la mano permite que el ser humano interactúe con su entorno al manipular una amplia variedad de objetos de diferentes formas y tamaños, realizar actividades complejas, y adaptar su posición que responda a los cambios que se requieran por la tarea que realiza.

Las interfaces hápticas son dispositivos que presentan información táctil y de fuerza a un operador humano que interactúa con un objeto real o de simulación a través de un ordenador. La interfaz háptica corresponde a un medio en el cual el humano interactúa con un ambiente de visión virtual, algunos ejemplos de robots de realidad virtual son: PHANTOM Omni y PHANTOM premium.

Entre los principales dispositivos hápticos para aplicaciones médicas se encuentran: PHANTOM de arquitectura serie y MAGISTER-P de arquitectura paralela y estudios representativos en el cual se realiza teleoperación pero a su vez incluye realimentación de fuerzas virtuales desde un simulador que genera fuerzas de repulsión que eviten el contacto con objetos, el dispositivo háptico, que se llama GIRU concebido inicialmente como una herramienta para los cirujanos donde se busca recuperar, en cierta forma, la percepción del tacto que se pierde en los procedimientos médicos teleoperados [4].

La interfaz háptica, MasterFinger realiza tareas de manipulación en las que se requiere el agarre y manejo de objetos con dos o más dedos [5].

La interfaz Feelex-Haptic Screen: Sobre una superficie de actuadores se proporciona un objeto o una mano, los actuadores recogen la interacción con el objeto y se proyecta sobre una pantalla una imagen con la superficie definida [6].

El Sarcos Dextrous master es un dispositivo de 10 grados de libertad y una compleja estructura dinámica. A medida que el usuario actúa sobre una serie de sensores de movimientos situados

sobre su brazo, cada uno de sus actos se ve reflejado en un movimiento del actuador.

La interfaz Force dimension DELTA – OMEGA es un dispositivos hápticos con tres grados de libertad en traslación para suministrar información kinésica y táctil con un gran espacio de trabajo [7].

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Cinemática del robot PHANToM Premium

La cinemática es el estudio del movimiento sin considerar las fuerzas que lo producen. En el modelo cinemático se involucran esencialmente el estudio de las relaciones existentes entre el espacio de las variables articulares, posición y orientación del efector final con relación a la base del robot así como el espacio de trabajo que suele ser un espacio cartesiano [1].

#### Cinemática Directa

La cinemática directa permite obtener el desplazamiento de trayectorias del robot, así como la posición y orientación de la herramienta de trabajo, esto es la relación ente las coordenadas articulares con las coordenadas cartesianas [2].

Cuya ecuación ésta dada por:

$$p = \varphi(q) = {}_n^{n-1} T = {}_n^0 T \quad (1)$$

Para la realización del modelado cinemático directo se acude a las transformaciones homogéneas dichas transformaciones requieren de longitudes y ángulos que se obtienen de los parámetros de Denavit-Hartenberg que permiten establecer de manera concreta la estructura matemática de las transformaciones homogéneas [3].

TABLA I  
PARÁMETROS DH DEL DISPOSITIVO HÁPTICO

Eslabón	$l_i$	$d_i$	$\alpha_i$	$\theta_i$
1	0	0	$-\pi/2$	$\theta_1$
2	$l_1$	0	0	$\theta_2$
3	$l_2$	0	0	$\theta_2+90-\theta_3$

Al aplicar las transformaciones homogéneas con respecto al diagrama de la Figura 1 se obtienen las siguientes matrices.

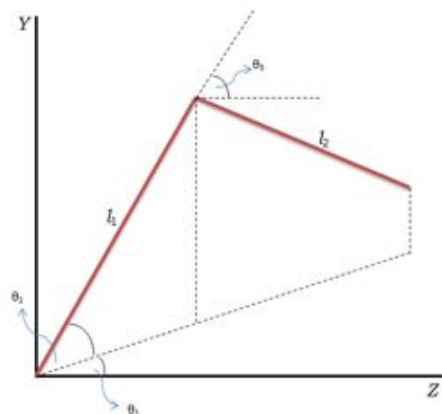


Fig. 1 Cinemática Directa.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(q1) & -\sin(q2) & 0 & 0 \\ \sin(q1) & -\sin(q2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q2) & -\sin(q1) & 0 & l1*\cos(q2) \\ \sin(q2) & \cos(q1) & 0 & l1*\sin(q2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q2 - q3 + 90) & -\sin(q2 - q3 + 90) & 0 & l2*\cos(q2 - q3 + 90) \\ \sin(q2 - q3 + 90) & \cos(q2 - q3 + 90) & 0 & l2*\sin(q2 - q3 + 90) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Al realizar la multiplicación de las matrices de transformación homogéneas se obtiene:

$$A_1^3 = \begin{bmatrix} a11 & a12 & a13 & a24 \\ a21 & a22 & a23 & a24 \\ a31 & a32 & 0 & a34 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$a11 = \cos(q2 - q3 + 90)*\cos(q1)*\cos(q2) + \sin(q2 - q3 + 90)*\cos(q1)*\sin(q2)$$

$$a21 = \cos(q2 - q3 + 90)*\cos(q2)*\sin(q1) + \sin(q2 - q3 + 90)*\sin(q1)*\sin(q2)$$

$$a31 = \sin(q2 - q3 + 90)*\cos(q2) - \cos(q2 - q3 + 90)*\sin(q2)$$

$$a12 = \sin(q2 - q3 + 90)*\cos(q1)*\cos(q2) - \cos(q2 - q3 + 90)*\cos(q1)*\sin(q2)$$

$$a22 = \sin(q2 - q3 + 90)*\cos(q2)*\sin(q1) - \cos(q2 - q3 + 90)*\sin(q1)*\sin(q2)$$

$$a32 = -\cos(q2 - q3 + 90)*\cos(q2) - \sin(q2 - q3 + 90)*\sin(q2)$$

$$a13 = -\sin(q1)$$

$$a23 = \cos(q1)$$

$$a14 = l1 * \cos(q1) * \cos(q2) + l2 * \cos(q2 - q3 + 90)$$

$$* \cos(q1) * \cos(q2) + l2 * \sin(q2 - q3 + 90)$$

$$* \cos(q1) * \sin(q2)$$

$$a24 = l1 * \cos(q2) * \sin(q1) + l2 * \cos(q2 - q3 + 90) *$$

$$\cos(q2) * \sin(q1) + l2 * \sin(q2 - q3 + 90) * \sin(q1) * \sin(q2)$$

$$a34 = l2 * \sin(q2 - q3 + 90) * \cos(q2) -$$

$$l2 * \cos(q2 - q3 + 90) * \sin(q2) - l1 * \sin(q2)$$

Donde la posición del efector final del robot está dada por a14 para X, a24 para Y y a34 para Z.

Al reducir los términos algebraicamente resulta.

$$x = \sin(q1)(l1 * \cos(q2) + l2 * \sin(q3))$$

$$y = l2 * l2 * \cos(q3) + l1 * l1 * \sin(q2)$$

$$z = l1 + \cos(q1) * (l1 * \cos(q2) + l2 * \sin(q3))$$

### Cinemática Inversa

Es la relación entre las coordenadas cartesianas con las coordenadas articulares y permite obtener las variables articulares que hacen que la posición y orientación del efector final sean las deseadas [1].

Cuya ecuación está dada por:

$$q = F \varphi^{-1}(p) \quad (2)$$

En las Fig. 2 y 3 se muestran los trazos geométricos para la obtención del modelado cinemático directo del robot.

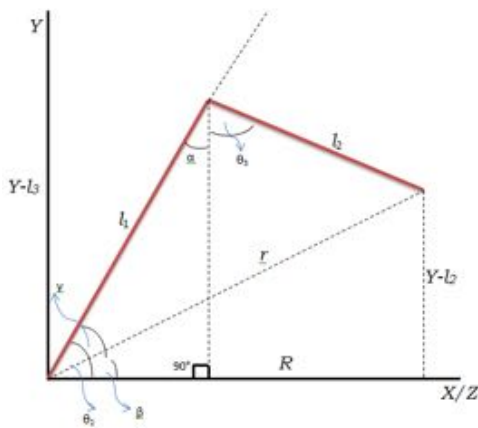


Figura 2 Vista Frontal del robot.

$$\alpha = 90^\circ - \theta2$$

$$\theta2 = \beta + \gamma$$

$$r = \sqrt{x^2 + (z + l1)^2 + (y - l2)^2}$$

$$R = \sqrt{x^2 + (z + l1)^2}$$

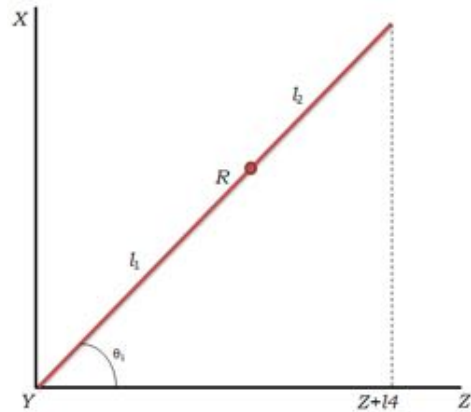


Figura 3 Vista lateral del robot.

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{l1^2 + l2^2 - r^2}{2 * l1 * l2} \right)$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left( \frac{l1^2 + r^2 - l2^2}{2 * l1 * r} \right)$$

$$\theta1 = \tan^{-1} \left( \frac{x}{z + l4} \right)$$

$$\theta3 = \theta2 + \alpha - \frac{\pi}{2}$$

### Dinámica

El modelado dinámico de un robot de n grados de libertad está dado por la ecuación (3)

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + f_f(\dot{q}, f_e) \quad (3)$$

donde:

- $q$  es el vector de coordenadas generadas o posiciones articulares.
- $\dot{q}$  es el vector de velocidades articulares.
- $\ddot{q}$  es el vector de aceleraciones articulares.
- $M(q)$  es la matriz de inercia definida.
- $C(q, \dot{q})$  es la matriz de fuerzas centrífugas.
- $g(q)$  es la matriz de gravedad.
- $f_f(\dot{q}, f_e)$  es la matriz de coreolis.

El modelo dinámico representa la base matemática para llevar a cabo el análisis y estudio de los fenómenos físicos presentes en la estructura mecánica de un robot manipulador de n grados de libertad en cadena cinemática abierta [2].

En la Fig. 4 se ilustran los trazos para la obtención del modelado dinámico del robot

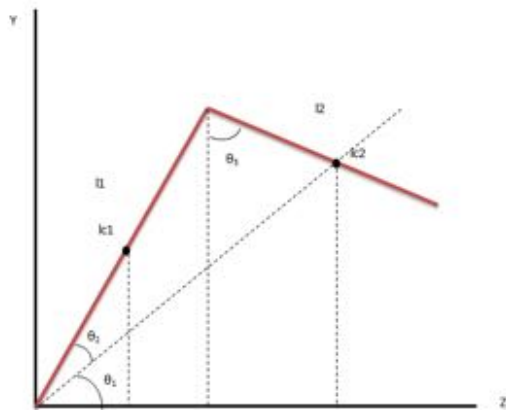


Fig. 4 Vista frontal del robot.

Para la obtención del modelo dinámico se desarrolla la ecuación (4), por el método de Euler-Lagrange, mediante 4 pasos.

$$L = K - U \quad (4)$$

Paso 1: cálculo de la energía cinética; cuya fórmula se describe en la ecuación (5).

$$K = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (5)$$

Paso 2: Calculo de la energía potencial; cuya fórmula está dada por la ecuación (6)

$$U = mgh \quad (6)$$

Paso 3: Calculo Lagrangiano; cuya fórmula está dada por la ecuación (2).

Paso 4: Desarrollo de la ecuación Lagrangiana; cuya fórmula está dada en la ecuación (6).

$$\tau_1 = \left[ \begin{array}{l} m_1lc1^2\ddot{q}_1 + I_1\cos^2(q_1)\ddot{q}_1 + I_1\dot{q}_1 + \\ (m_2l^2\cos^2(q_1)\cos^2(q_2)\ddot{q}_1 + \sin^2(q_2)\cos^2(q_1)\ddot{q}_1) \\ + \sin^2(q_1)\sin^2(q_3)\dot{q}_1 \end{array} \right] + I_2\dot{q}_1$$

$$\left[ \begin{array}{l} m_1lc1^2\dot{q}_1 + I_1\cos^2(q_1)\dot{q}_1 + I_1\dot{q}_1 + \\ (m_2l^2\cos^2(q_1)\cos^2(q_2)\dot{q}_1 + \sin^2(q_2)\cos^2(q_1)\dot{q}_1) \\ + \sin^2(q_1)\sin^2(q_3)\dot{q}_1 \end{array} \right] + I_2\dot{q}_1$$

$$\tau_2 = \left[ \begin{array}{l} \cos^2\ddot{q}_2 + I_1\cos^2\ddot{q}_2 + m_2l^2\cos^2(q_2)\ddot{q}_2 \\ + \sin^2(q_2)\ddot{q}_2 + \cos(q_2)\ddot{q}_2 \end{array} \right] -$$

$$\left[ \begin{array}{l} \cos^2\dot{q}_2 + I_1\cos^2\dot{q}_2 + m_2l^2\cos^2(q_2)\dot{q}_2 + \\ \sin^2(q_2)\dot{q}_2 + \cos(q_2)\dot{q}_2 \end{array} \right]$$

$$\tau_3 = \left[ \begin{array}{l} lc2^2\cos^2(q_2)\ddot{q}_3 - \cos(q_3) + \cos^2(q_1)\ddot{q}_3 \\ + \cos(q_1) + lc2\sin(q_3) \end{array} \right] -$$

$$\left[ \begin{array}{l} lc2^2\cos^2(q_2)\dot{q}_3 - \cos(q_3) + \cos^2(q_1)\dot{q}_3 + \\ \cos(q_1) + lc2\sin(q_3) \end{array} \right]$$

### III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvo el control del robot tipo PHANTOM Premium partiendo del diagrama de cuerpo libre, basándose en los modelos cinemático inverso, cinemático directo, modelo de dinámica mediante el programa Matlab

En la Fig. 5 se muestra la posición y velocidad articular del eslabón 1 y eslabón 2 del robot, en la Fig. 6 me muestra la trayectoria del robot.

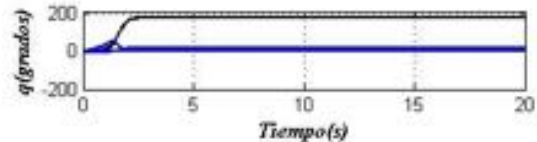


Fig. 5 Posición y velocidad del robot.

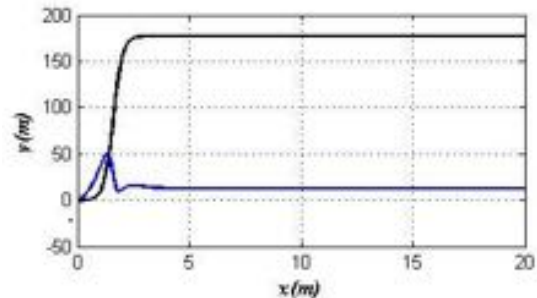


Fig. 6 Trayectoria del robot.

### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se puede apreciar que el campo de la interfaz háptica es muy extenso, hoy en día gracias a los avances en sistemas de comunicaciones se puede ver el uso de técnicas con realidad virtual. Los dispositivos hápticos conforman una nueva área de la robótica dedicada a captar y transmitir información de esfuerzo y tacto, lo que permite nuevas aplicaciones de alto valor tecnológico en diferentes campos de la ciencia. Un robot destacado en el campo de interfaz háptica es el robot PHANTOM en el cual se basó el análisis del modelado matemático para un robot de este tipo con tres GDL. Estas ecuaciones matemáticas se obtuvieron con la finalidad de realizar leyes de control sobre la interfaz háptica que se diseñó y desarrollo en el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan.

REFERENCIAS

- [1] Baturone, A. O. (2010). *ROBOTICA Manipuladores y robots móviles*. Mexico: ALFAOMEGA.
- [2] Cortes, F. R. (2011). *Robotica: Control de robots manipuladores*. MARCOMBO.
- [3] Genoy Muñoz, J. W., Rodríguez Ortiz, L. F., & Salinas, S. A. (2011). Interfaz háptica de cuatro grados de libertad para aplicaciones quirúrgicas. *Ingeniería Biomédica*, 35.
- [4] Genoy Muñoz, J. W., Rodríguez Ortiz, L. F., & Salinas, S. A. (2013). Herramienta de Entrenamiento Virtual en 2-D para Rehabilitación de Motricidad Fina en Miembro Superior con Incorporación de un Dispositivo Háptico. *Ingeniería Biomédica*, 60.
- [5] Gòmes De Gabriel, J. M., Ollero Baturone, A., Garcia Cerezo, A. J., & Galofr, F. (2000). *Robotica Automatica*. Prentice Hall.

## Diseño y Construcción de un brazo Antropomórfico de 3 Grados de libertad (GDL)

Jiménez-Uribe Á<sup>1</sup>, Serna-Hernández L.F<sup>1</sup>, L. Díaz-Gómez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Huichapan Hidalgo México, C.P 42400 treekoe753\_98@hotmail.com

**Resumen**— En el siguiente artículo se presenta el diseño geométrico, el modelo cinemático, el modelo dinámico y la construcción de un brazo robótico de tres grados de libertad, se utilizan encoders de inducción magnética para obtener la referencia de la posición angular, los actuadores utilizan motores de corriente directa (DC) con sistema de reducción de engranes, dos de los motores con una relación de 100:1 y uno con una relación de 34:1. Se desarrolla una interfaz de usuario en la plataforma de LabVIEW®, se utilizan dos tarjetas DAQ para la comunicación entre el brazo y la computadora, una para controlar a los puentes H, los cuales son la etapa de potencia e indican la dirección de giro a los motores y otra para referenciar una posición deseada.

**Abstract**— In this article we present the geometric design, the kinematic model, the dynamic model and the construction of a robotic arm three degrees of freedom, Magnetics encoders are used to reference the angular position, as engine actuators are used direct current (DC) with gear reduction system, two engines with a ratio of 100: 1 and one with a ratio of 34: 1. A user interface is developed on the platform of LabVIEW®, two DAQ for communication between the arm and the PC, one for controlling the H bridges, which are the power stage used and indicate the direction of rotation of the motors and another for referencing a desired position.

**Palabras clave** — modelado, mecánica, interfaz.

### I. INTRODUCCIÓN

El diseño, es un robot antropomórfico, el cual tiene una analogía a un brazo humano, cuenta con una base y tres eslabones (cuerpo, antebrazo y brazo), tres grados de libertad (cintura, hombro y codo), cada articulación es un grado de libertad rotacional, los tres primeros eslabones y las articulaciones nos sirven para posicionar el efector final del robot [1].

El modelo cinemático estudia el movimiento y la geometría del robot sin tomar en cuenta las fuerzas que lo producen, en este modelo se

resuelven dos problemas de posicionamiento (cinemática directa e inversa). En la cinemática directa se resuelve la posición y orientación del robot, mientras que en la cinemática inversa se resuelven los ángulos de cada articulación conociendo la posición definida por la Cinemática Directa [1], [2], [3].

El modelo dinámico muestra los esfuerzos, en él se estudian los fenómenos físicos que se encuentran en la estructura mecánica tales como (efectos inerciales, fuerzas centrípetas de Coriolis, para gravitacional y la fricción), estos fenómenos son propios de la naturaleza dinámica del robot [1], [4], [5].

### II. MATERIALES Y MÉTODOS

#### Cinemática Directa

La cinemática directa es una función vectorial que relaciona las coordenadas articulares con las coordenadas cartesianas, determina la posición y orientación del efector final del robot por medio del algoritmo de Denavit-Hatenberg (D-H) [1], [2], [4]. Los parámetros D-H de la estructura mecánica se muestran en la Tabla 1 y en la Fig. 1 se muestra el diagrama de cuerpo libre (DCL).

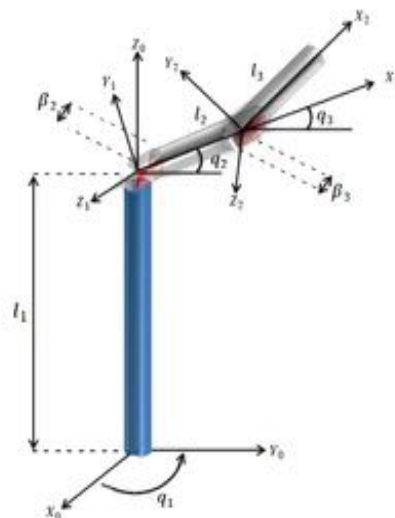


Fig. 1. Robot Antropomórfico de 3 (GDL).



TABLA I. PARÁMETROS D-H DEL ROBOT DE 3 GDL.

ESLABÓN	LI	AI	DI	θI
1	0	π/2	L1	q1
2	L2	0	B2	q2
3	L3	0	B3	q3

Con los parámetros obtenidos de D-H se calculan las matrices de transformación homogénea para determinar la posición y orientación del efector final, aplicándolo a cada uno de los sistemas coordenados siguiendo la siguiente ecuación:

$$H_{i-1}^i = \begin{bmatrix} c_i & -s_i c a_i & s_i s a_i & l_i c_i \\ s_i & c_i c a_i & -c_i s a_i & l_i s_i \\ 0 & s a_i & c a_i & d_i(b_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde las funciones trigonométricas seno y coseno se sustituyen por "S y C".

La matriz de transformación Homogénea que determina la cinemática directa está definida por:

$$H_T = (H_0^1)(H_1^2)(H_2^3) \quad (2)$$

Por lo tanto la matriz resultante es:

$$H_T = \begin{bmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 & [\beta_2 - \beta_3] s_1 l_3 c_1 c_{23} + l_2 c_1 c_2 \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & -c_1 & -[\beta_2 - \beta_3] c_1 l_3 s_1 c_{23} + l_2 s_1 c_2 \\ s_{23} & c_{23} & 0 & l_3 s_{23} + l_2 s_2 + l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

De la matriz de transformación homogénea se obtiene la posición del efector final del robot en las coordenadas x, y, z que son los primeros 3 elementos de la cuarta columna y se muestran en la ecuación (4), la primera segunda y tercera columna que se muestran en la ecuación (3) son la orientación, inclinación y balanceo respectivamente [2].

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\beta_2 - \beta_3] s_1 l_3 c_1 c_{23} + l_2 c_1 c_2 \\ -[\beta_2 - \beta_3] c_1 l_3 s_1 c_{23} + l_2 s_1 c_2 \\ l_3 s_{23} + l_2 s_2 + l_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### Cinemática Inversa

Con la cinemática inversa se buscan los valores de los ángulos que deben tomar las articulaciones para que el robot se posicione y oriente [2], [4]. Las ecuaciones de la cinemática inversa se obtienen por métodos analíticos trigonométricos:

$$q_1 = \gamma - p = a \tan\left(\frac{y_0}{x_0}\right) - a \tan\left(\frac{\beta_2 - \beta_3}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 - (\beta_2 - \beta_3)^2}}\right) \quad (5)$$

$$q_2 = a \tan\left(\frac{(l_2 + l_3 c_3) z_0 - l_3 s_3 \sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2} l_2 + l_3 c_3 + z_0 l_3 s_3}\right) \quad (6)$$

$$q_3 = a \tan\left(\frac{\sqrt{(2l_2 l_3)^2 - (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - l_2^2 - l_3^2)^2}}{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - l_2^2 - l_3^2}\right) \quad (7)$$

En LabVIEW® se implementó la cinemática directa e inversa para comparar las coordenadas cartesianas en función de las coordenadas articulares y viceversa, como se muestra en la Fig. 2.

Coordenadas Cartesianas y Articulares del Robot de 3 (GDL)



Fig. 2. Comparación de las Coordenadas Cartesianas con las Coordenadas Angulares

El modelo dinámico, representa la base matemática para llevar a cabo el análisis y el estudio de los fenómenos físicos presentes en la estructura mecánica del robot, tales como el movimiento de los eslabones y las fuerzas ejercidas en los actuadores de sus articulaciones, se expresa con las ecuaciones de movimiento de la formulación de Euler-Lagrange [3], [5]. En su forma compacta en el área de la robótica la ecuación se describe de la siguiente forma:

$$\tau = H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + f_f(\dot{q}, f_e) \quad (8)$$

Matriz de Inercia  $H(q) \in R^{n \times n}$  Describe el cambio de estado del movimiento del robot en un punto de equilibrio.

Matriz de Fuerzas Centrípetas y de Coriolis  $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$  Es la desviación del movimiento de traslación debido a su componente de rotación.

Vector de pares Gravitacionales  $g(q) \in R^n$   
 Obtiene de la energía potencial que se genera en las posiciones articulares  $q$  del robot.

Vector de fuerzas de Fricción  $f_f(\dot{q}, f_e) \in R^n$   
 Expresa los fenómenos físicos de fricción viscosa y de coulomb, que se oponen al movimiento del robot.

### III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Diseño Geométrico y Construcción

Mediante un diseño CAD se diseñaron las piezas del prototipo tridimensionalmente para hacer el análisis y comprobar el mecanismo.

En la Tabla I se muestran las medidas de cada uno de los eslabones de la estructura mecánica del robot.

Se utilizan 3 motores de corriente directa (DC), cada uno con un sistema de reducción para la transmisión de movimiento a los eslabones, ver Fig. 3. En la Tabla II se muestran los datos de los motores.

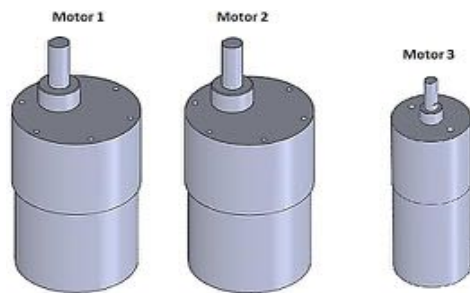


Fig. 3. Motores de DC.

Tabla II. DATOS DE LOS MOTORES.

MOTOR	RELACIÓN	PESO
1	100:1	0.224 kg
2	100:1	0.224 kg
3	34:1	0.100 kg

Se utilizaron 2 puentes (H) L298N para controlar el sentido de giro, dos tarjetas DAQ una NI PCI SCB-68 para la lectura de los encoders y el PWM aplicado a los motores y una NI USB-6210 para el mando de los puentes (H), y como sensores para la posición del robot se utilizaron 3 encoders de inducción magnética a 5V.

En la Fig. 4 se muestran los tres primeros eslabones de la estructura mecánica del robot de manera individual digitalizados en la plataforma

CAD. Finalmente en la Fig. 5, 6, 7 se muestra la estructura y ensamble en CAD del robot.

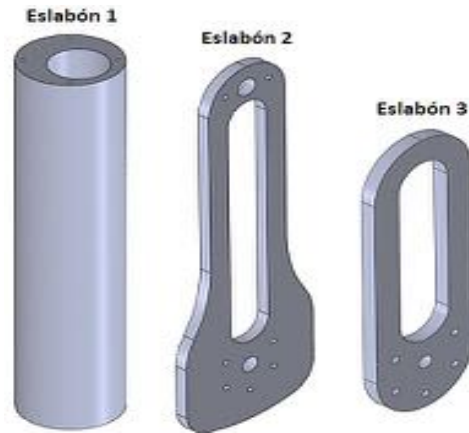


Fig. 4. Eslabones 1,2 y 3 de la Estructura Mecánica.

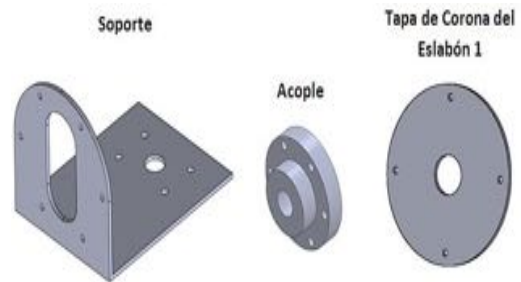


Fig. 5. Piezas para la Sujeción de Motores y de los Eslabones.

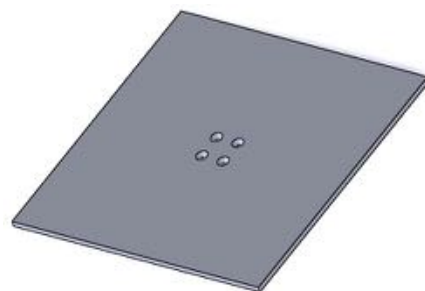


Fig. 6. Base de la estructura del Robot.



Fig. 7. Estructura Robótica Digitalizada en CAD

Se utilizó aluminio para la construcción de los eslabones de la estructura mecánica, en la Fig. 8 se muestra el robot construido.



Fig. 8. Robot Antropomórfico de 3 (GDL).

### Interfaz

El algoritmo de control se desarrolló en la plataforma de LabVIEW® para el control de posición de las articulaciones. En la Fig. 9 se aprecia el esquema de interfaz de la comunicación entre la estructura robótica y la PC.

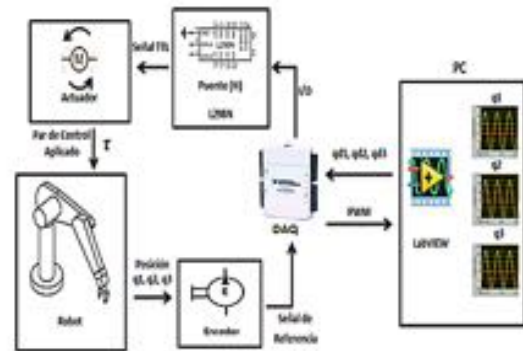


Fig. 9. Esquema de Interfaz de la Comunicación del Robot y la PC utilizando DAQ's.

En las gráficas de las Fig. 10, 11 y 12 se muestran los resultados de las posiciones obtenidas en LabVIEW®, comparadas con las posiciones obtenidas en las simulaciones en MATLAB® con referencias de 180° cada una bajo la ley de control PID, la línea blanca representa la referencia introducida desde la interfaz y la línea roja la posición de la articulación.



Fig. 10. Gráfica de (q1).



Fig. 11. Gráfica de (q2).



Fig. 12. Gráfica de (q3).

En la Fig. 12 se muestran las referencias deseadas, las referencias leídas por los encoders, y el error de posición en el espacio estacionario de cada una de las articulaciones de la estructura mecánica del robot.

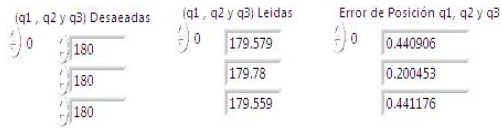


Fig. 12. Referencias Deseadas, Leídas y Error de Posición de cada una de las Articulaciones.

### CONCLUSIONES

El control PID resulta efectivo para la estabilidad de la posición del robot, ya que el error de posición de cada articulación tiende a ser cero, de esta manera determinamos que el comportamiento dinámico del robot bajo las acciones de control aplicado es aceptable.

El software de LabVIEW® permite controlar y monitoriza los movimientos del manipulador desde la PC. El sistema manipulador puede ser utilizado para realizar prácticas de programación de robots manipuladores, análisis de mecanismos, uso de sensores y actuadores.

Con el modelo CAD y la construcción se cuenta con un sistema versátil para la implementación y validación de diferentes leyes de control.

### REFERENCIAS

- [1] Andueza L. y Aguirre I. (2010). Diseño de un Manipulador Robótico con Tres Grados de Libertad para fines educativos. Revista Ciencia e Ingeniería.
- [2] Angulo J. y Angulo I. (2011). Microcontroladores PIC. Tercera Edición. McGraw, Madrid.
- [3] Martínez E. (2009). Control de un Robot tipo PUMA utilizando Celdas Neuronales Analógicas.
- [4] Andueza L. (2011). Diseño de un Manipulador Robótico con Tres Grados de Libertad para fines educativos. Tesis de maestría. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- [5] Astrom K.J. and Hagglund T. (2009). PID Controllers: Theory, Design and Tuning, International Society and for Measurement and Control.

## Comunicación Serial Maestro - Esclavo entre Microcontroladores para el Control Articular de Una Estructura Robótica de 3 Grados de Libertad

V. Chávez-Villegas<sup>1</sup>, J.C Cruz-Tenjhay.<sup>1</sup>, J. M. Hernández-Paredes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Departamento de Ing. Mecatrónica, El Saucillo, Huichapan Hgo, 42411, victor7chavez@hotmail.com.

**Resumen**— El siguiente artículo muestra el desarrollo de la comunicación serial entre un microcontrolador maestro y tres esclavos de la familia Microchip, con el objetivo de lograr la transmisión de datos a través de un mismo Bus de comunicación para el control de cada articulación de una estructura robótica de tres grados de libertad. El envío de datos se rige bajo el formato 8N1 (8 bits- No paridad-1 bit de parada) a través de la interfaz RS-232 del dispositivo maestro a los tres microcontroladores esclavos, el interfaz de comunicación consta de la activación de interrupciones para lectura y escritura de datos en cada uno de los microcontroladores, así como la asignación de una dirección para los esclavos la cual permitirá la implementación de un controlador tipo PID discreto sobre cada una de las articulaciones de la planta.

**Abstract**— The following article shows the development of serial communication between a master and three slaves Microchip microcontroller family, with the goal of data transmission through a single communication bus for controlling each joint of a robotic structure three degrees of freedom. Sending data is controlled by the format 8N1 (8 bits-no parity stop-1 bit) via the RS-232 interface of the master device to the three slave microcontrollers, the communications interface consists of the activation of interruptions for reading and writing data to each of the microcontrollers, and assigning an address to the slaves which allow the implementation of a discrete PID controller on each of the joints of the plant.

**Palabras clave** — Articulación, Control, Interfaz, Motores, PID, RS-232.

### I. INTRODUCCIÓN

Micro-PIC, microprocesadores que desarrolla la compañía Microchip, que alguna vez se llamaron controladores de interfaz de periféricos, son cada vez más populares para el desarrollo de sistemas mecatrónicos esto por la confiabilidad y el bajo costo que estos ofrecen. Los trabajos de diseño y desarrollo con microcontroladores

utilizan un conjunto común de características de hardware, como la comunicación en serie, la conversión analógico-digital y señales de Modulación por Ancho de Pulso (PWM), las cuales se encuentran en los productos de PIC [1].

Una ventaja que ofrece PIC en comparación con algunos otros dispositivos digitales de control como las FPGA o Arduino, es que se tienen costos bajos como se menciona [2] y [3] en su aplicación y comparación al utilizar PLC's y Microcontroladores para la automatización de una casa inteligente y el desarrollo de una máquina de corte de material automática respectivamente, también afirman que se facilita el uso de los microcontroladores en comparación con otros dispositivos, lo que los hace rentable en el mercado.

Este artículo detalla la aplicación y funcionamiento de 4 microcontroladores, 3 esclavos y un maestro, los cuales se encargan por medio de los pines de comunicación RX y TX transmitir datos por puerto serie para realizar el control PID discreto sobre cada una de las articulaciones de una estructura robótica de 3 grados de libertad, se realiza una modificación física del bus RS323 que permite la conexión multipunto ya que ésta es una comunicación punto a punto. Para observar los datos de referencia y reales del robot cada microcontrolador PIC cuenta con una pantalla LCD que al mismo tiempo evita el uso de computadoras y permite agilizar el proceso de depuración.

### II. MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema que se presenta en este documento se compone de 4 PIC's, 3 esclavos y un maestro de la familia Microchip, una estructura robótica hecha de aluminio de tres GLD, que ocupa motores de corriente directa (CD) como actuadores, los PIC esclavos se encargan de controlar de manera independiente cada articulación y por medio de interfaz de comunicación serial RS-232, el maestro envía la

referencia deseada (posición deseada) a cada uno de los esclavos, como sensores se utilizan resistencias variables en cada una de las articulaciones de la estructura.

En la Fig. 1 se muestra la tarjeta de desarrollo que se utilizó para la comunicación entre los microcontroladores PIC16F887, esta tarjeta es la misma versión para el dispositivo maestro y los tres esclavos.

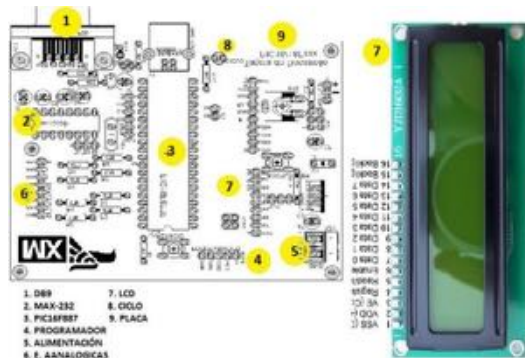


Fig. 1 Tarjeta de desarrollo para comunicación serial entre los microcontroladores 16F887.

Con el objetivo de lograr la comunicación entre los Pic's y el maestro de manera exitosa, se propuso una modificación al protocolo de la norma RS-232, pasando de ser una comunicación serie punto a punto a una comunicación serie multipunto como lo es la norma RS-485, con la cual se pueden controlar hasta 32 dispositivos a distancia, como el caso de [4] que presentan una unidad terminal de aire acondicionado a distancia.

*A. Interfaz de comunicación RS232*

RS-232 puede transmitir los datos en grupos de 5, 6, 7 u 8 bits, a unas velocidades determinadas (normalmente, 9600 bits por segundo).

Después de la transmisión de los datos, le sigue un bit opcional de paridad (indica si el número de bits transmitidos es par o impar, para detectar fallos), y después 1 o 2 bits de stop. Normalmente, el protocolo utilizado es 8N1 (8 bits de datos, sin paridad y con 1 bit de parada) en la Fig. 2 se muestra el diagrama de tiempos de la interfaz [1].

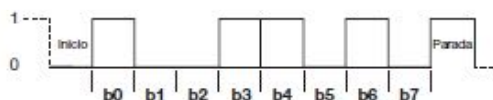


Fig. 2 Diagrama de tiempos de RS-232 para un dato de 8 bits sin paridad.

Una vez la transmisión se inicia, los bits que forman al dato tienen que llegar uno detrás de otro a una velocidad constante y en determinados instantes de tiempo, por eso se dice que el RS-232 es asíncrono. Los pines que portan los datos son RXD y TXD, Fig. 3. Los restantes se encargan de otros trabajos, tanto el emisor como el receptor tienen que usar el mismo protocolo de comunicación para transmitir y recibir información binaria entre sí [5].

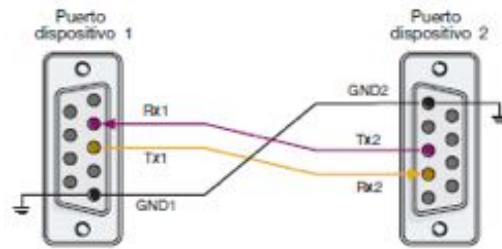


Fig. 3 Conexión física RS-232 entre dos dispositivos.

La Fig. 4 muestra la conexión de los Pic's a las líneas de transmisión y recepción del maestro.

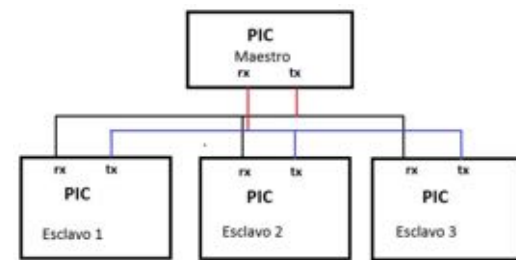


Fig. 4 Conexión RS-232 Maestro-Esclavo.

Esta conexión es bastante similar a la conexión de la norma RS-485 ya que los dispositivos se conectan en paralelo a un único bus de comunicación.

Después de realizar la conexión y observar que los datos llegan al destino predeterminado se demostró que es posible comunicar varios dispositivos por medio de la interfaz RS-232 y realizar una acción de control sobre una estructura robótica de 3 grados de libertad.

*B. Controlador PID discreto*

Se aplicó un control PID discreto a la estructura que se presenta en la Fig. 9, mediante la ecuación en diferencias del controlador con ganancias  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  conocidas. En la Fig. 5 se muestra el diagrama de bloques un controlador PID que se aplica a un sistema o planta.

Para el correcto funcionamiento de un controlador PID que regule un proceso o sistema se necesita, al menos:

- Un sensor, que determine el estado del sistema (termómetro, caudalímetro, manómetro).
- Un controlador, que genere la señal que gobierna al actuador.
- Un actuador, que modifique al sistema de manera controlada (resistencia eléctrica, motor, válvula, bomba, etc) [6].

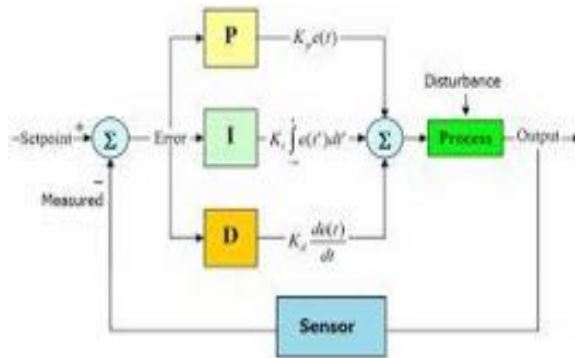


Fig. 5 Diagrama a bloques de una planta controlada a través de una técnica de control tipo PID.

La función de transferencia (2) en tiempo continuo y la ecuación en diferencias del controlador (4) se muestra a continuación.

$$Kp * e(t) + Ki * \int e(t) + Kd * \frac{d e(t)}{dt} \quad (1)$$

$$U(s) = E(s) \left( Kp + \frac{Ki}{s} + Kd * s \right) \quad (2)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \left( Kp + \frac{Ki}{s} + Kd * s \right)$$

Aplicando la transformada z inversa a (2):

$$\frac{U(z)}{E(z)} = Kp + Ki * \frac{T(1+z^{-1})}{1-z^{-1}} + Kd * \frac{1-z^{-1}}{T} \quad (3)$$

Despejando términos, la ecuación en diferencias, el controlador es:

$$U(k) = a0 * E(k) + a1 * E(k - 1) + a * E(k) + U(k - 1) \quad (4)$$

donde:

$$a0 = Kp + \frac{Ki * T}{2} + \frac{Kd}{T}$$

$$a1 = -Kp + \frac{Ki * T}{2} - \frac{2 * Kd}{T}$$

$$a2 = \frac{Kd}{T}$$

La ecuación (4) es la que se implementó en cada microcontrolador esclavo para la realización del control de cada articulación de la estructura robótica, donde:

$a0, a1, a2$ = ganancias del controlador.

$E(k)$ = es el error.

$E(k-1)$ = error anterior,

$E(k-2)$ = error 2 veces anterior.

$U(k-1)$ = respuesta anterior.

$U(k)$ = respuesta actual.

Las lecturas de los sensores de referencia se adquieren a través del convertidor analógico-digital del microcontrolador y son las que se envían por RS-232 a cada microcontrolador esclavo para el cálculo del error respecto de la referencia y  $U(k)$  es la respuesta del controlador al sistema la cual se convierte en una salida de PWM hacia cada actuador de las articulaciones.

Como se muestra en la Fig. 6, el microcontrolador maestro envía una dirección a los esclavos y solo responderá con una acción PWM hacia el actuador que pertenezca tal dirección, mientras el resto se mantendrán en su última posición.

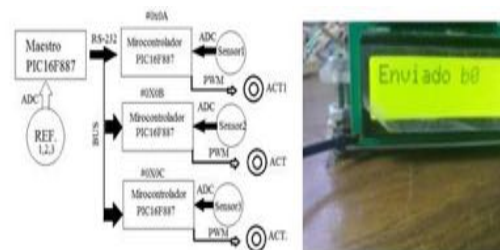


Fig. 6 Envío de dirección de maestro al esclavo.

### III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comunicación entre el microcontrolador maestro y los tres esclavos resulto posible después de varias pruebas y corrección de errores ya que sin las interrupciones en el maestro y los esclavos los datos se desfazan o atrasan, así como la implementación de una bandera que permite la sincronización de los datos transmitidos.

Con la activación de una bandera y de una condición en los esclavos para la realización del control, la comunicación se mostró segura y sin pérdida de datos, con lo que se demostró que es posible realizar una comunicación multipunto por RS-232, para el control de un robot.

Se observó que al momento de comunicar el dispositivo maestro con los esclavos y al aplicar la técnica de control sobre la planta se tornaba relativamente lenta por momentos y la respuesta

del sistema se veía afectada en algunos lapsos de tiempo como se muestra en la Fig. 7. Este detalle se controló por medio de cambios en la programación, como el condicional en los esclavos y las interrupciones así como la variación en las ganancias del PID discreto, entonces disminuyeron las oscilaciones en el sistema permitiendo una mejor estabilidad en cada articulación de la estructura.

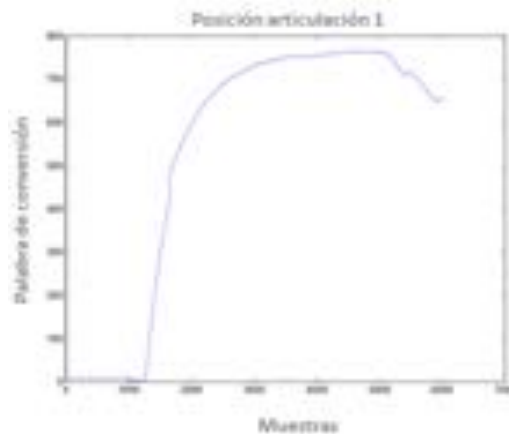


Fig. 7 Respuesta de la planta ante el control PID discreto en la articulación 1.

La figura 8 a) muestra el diagrama de flujo de la comunicación entre los dispositivos digitales de control.

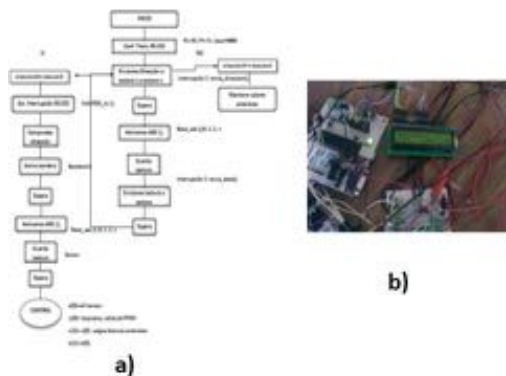


Fig. 8 a) Diagrama de flujo para la programación, b) Comunicación Maestro- esclavo.

**Algoritmo de control**

1. Leer la variable de salida mediante un sensor y conversor analógico digital
2. Calcular el error  $e(k)$
3. Calcular  $u(k)$  con la ley de control y enviarlo al sistema mediante un conversor digital analógico
4. Esperar a que  $t=(k+1)*T$
5. Hacer  $k=k+1$
6. Ir al punto 1.

Una manera de comprobar y ejecutar la comunicación antes de aplicarla al sistema fue a través de las simulaciones en el software Proteus profesional, las cuales permitieron corregir errores y observar con mayor detalle el comportamiento de la transmisión y recepción de datos así como la posible respuesta del sistema.

En la Fig. 9 se presenta el sistema robótico de tres grados de libertad en donde se realizaron las pruebas de comunicación y control digital.



Fig. 9 Planta de tres grados de libertad para el desarrollo de este trabajo de investigación y desarrollo.

**IV. CONCLUSIONES**

Se puede concluir que a pesar de no ser el modo habitual de envío de datos por RS-232, la conexión multipunto en RS-232 también es efectiva en algunas de las aplicaciones dentro del campo de las comunicaciones y el control por lo que puede utilizar como herramienta de envío de datos entre distintos dispositivos y hacer de lado la limitante de ser solo una conexión punto a punto, de igual manera la respuesta del controlador PID discreto aplicado sobre cada articulación de la estructura robótica fue lo suficientemente preciso para estabilizar el sistema.

También se observó que la ecuación en diferencias del controlador nos permitió estabilizar el sistema a través de las ganancias, dando una respuesta eficiente y confiable para el actuador en cada una de las articulaciones.

Las oscilaciones ocasionadas durante instantes en que el maestro tardaba en enviar las referencias no eran considerables para el sistema ya que el rango de error variaba entre 3 y 4 grados, lo que en un futuro se podría disminuir al encontrar valores específicos y exactos para las ganancias del controlador.

**RECONOCIMIENTOS**



Gracias al apoyo y asesoría de los profesores José Miguel Hernández Paredes y Luis Felipe Serna Hernández de ITESHU, en las áreas de interfaces y redes y control digital respectivamente, para el desarrollo y ejecución del proyecto así como la motivación para culminar este trabajo de investigación y desarrollo.

#### REFERENCIAS

- [1] Brandon Kuczynski; Philip R. LeDuc; and William C. Messner. "A Platform for Building PIC Applications for Control and Instrumentation". Department of Mechanical Engineering, Carnegie Mellon University, junio 2015.
- [2] Pawlenka M.; Jaromir Skuta, Ph.D. "Use of PLC and PIC for Realization of Intelligent Family House". Department of Control Systems and Instrumentation, VSB-TU Ostrava, Ostrava Czech Republic, 2015.
- [3] Hujdur M., Kaknjo A. "Construction and control implementation of material cutting machine". MIPRO 2011, May 23-27, 2011, Opatija, Croatia.
- [4] Khomkrit S.; Vansan S.; Veera T.; Apirak S. "Remote Terminal Air-conditioner Unit for Power Management". Department of Electrical Power, Rajamangala University of Technology Isan, Sakonnakhon, Thailand. SICE-ICASE International Joint Conference 2006, Oct. 18-21, 2006 in Bexco, Busan, Korea.
- [5] Asea Brown Boveri S.A. Comunicación Digital. En: Comunicación via bus con interruptores ABB. Torrent de l' Olla. ABB. Barcelona España. Pag. 4-9, 2012.
- [6] Katsuhiko O. *La transformada z. En: Sistemas de control en tiempo discreto*. Plascencia L G. PRENTICE HALL, segunda edición. México. Pag. 52-54, 1996.

## Diseño de Un Robot Háptico Mediante Manufactura Concurrente

J. M. Hernández-Paredes <sup>1</sup>, L. Díaz-Gómez <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan,  
El Saucillo Huichapan Hidalgo México, jmhernandez@iteshu.edu.mx*

**Resumen**— La manufactura convencional busca desarrollar el producto final después de realizar el diseño del producto. En este tipo de manufactura se sigue una secuencia lineal desde que la materia prima se adquiere hasta que el producto se finaliza, esto conlleva a una problemática en el desarrollo ya que cada área solo se preocupa de su proceso y también implica que existen errores en el sistema de retroalimentación en caso de fallar alguna etapa del proceso de manufactura. Una solución a este problema es el uso de la ingeniería de manufactura concurrente la cual cambia el enfoque lineal y hace énfasis en la integración interfuncional de los procesos. En el presente artículo se muestra la manufactura de un robot de tres grados de libertad a través de la ingeniería concurrente.

**Abstract**— Conventional manufacturing seeks to develop the final product after performing design. In this type of manufacturing a linear sequence is followed since the raw material is purchased until the product is finished, it leads to problems in the development because each area only cares about its process and also means that there are errors in the feedback system in case of failure any stage of the manufacturing process. One solution to this problem is the use of concurrent engineering manufacturing which changes the linear approach and emphasizes the functional integration of processes. In this article the manufacture of a robot of three degrees of freedom through concurrent engineering is shown.

**Palabras clave** — Construcción, diseño, robot.

### I. INTRODUCCIÓN

Actualmente las condiciones de mercado, diversificación cultural, globalización, y consideraciones ambientales cada vez más complejas y significativas obligan a áreas de diseño y desarrollo de nuevos productos enfrentar nuevos retos y requerimientos tales como los tiempos, materiales y tipos de manufactura.

La ingeniería concurrente reemplaza a la secuencia tradicional para el desarrollo de nuevos procesos y productos, en donde las tareas de manufactura se realizan de forma paralela y reducen los tiempos de producción y los costos de manufactura. El primer paso en la

manufactura concurrente implica un cambio en la estructura y cooperación en las áreas del proceso [1].

La ingeniería concurrente o CE (por sus siglas del inglés, Concurrent Engineering) es un término que se acuñó en 1986 en el Instituto para el Análisis de la Defensa de los Estados Unidos [2], con el uso de esta ingeniería se mejoran tres elementos de los principales del enfoque convencional [3]:

- Arquitectura computacional que permite la sincronización, la programación óptima de tareas y el manejo de flujos de información.
- Representación de toda la información de diseño y manufactura, de forma que pueda visualizarse e interpretarse desde diversas perspectivas.
- Conjunto de herramientas computacionales que permiten desarrollar prototipos a bajo costo.

Sin embargo en la ingeniería recurrente se deriva una metodología de manufactura llamada *Diseño para el Control* DFC (por las siglas del inglés Design For Control) que se presentó formalmente para el diseño de sistemas mecatrónicos, DFC hace hincapié en la obtención de un modelo matemático *dinámico simple* de la estructura mecánica y una cuidadosa selección de parámetros mecánicos, una vez que el modelo dinámico “Simple” se obtiene a pesar de la complejidad de la estructura mecánica, el diseño de un controlador se puede facilitar y mejorar el rendimiento del control [4].

En la Fig. 1 se muestran las ventajas del ciclo de vida del producto (CVP) de la ingeniería secuencial sobre la ingeniería concurrente al contrastar tiempos y costos en cuatro partes importantes del proceso de manufactura de productos: 1) Concepción y estructuración, 2) Ejecución, 3) Cierre y 4) Producción [5].

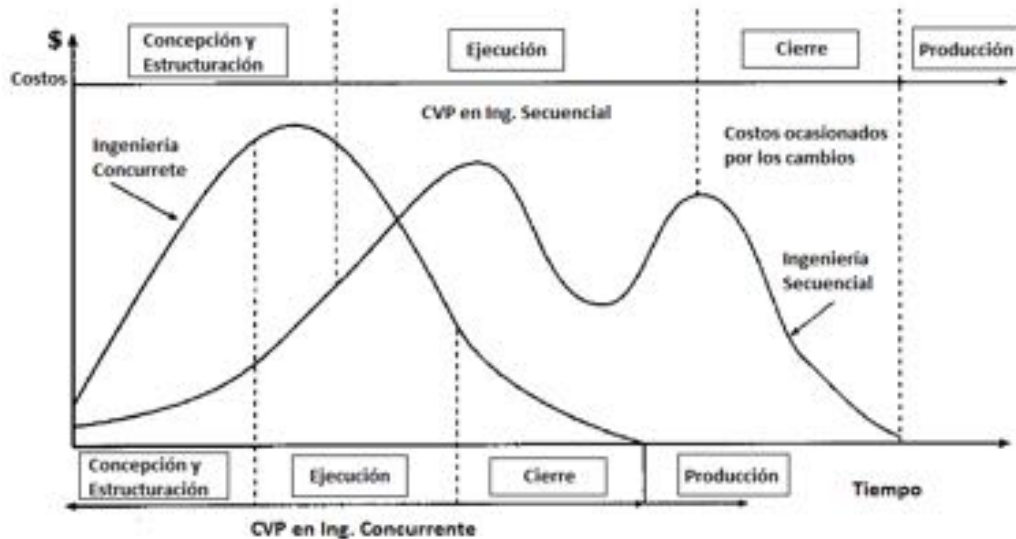


Fig. 1. Ing. Secuencial vs Ing. Concurrente [5].

En el presente artículo se muestra la manufactura concurrente de un robot de tres grados de libertad que se basa a partir del diseño dinámico de la estructura mecánica.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de diseño se basa en un análisis de ciclo de vida por lo cual fue necesario tomar en cuenta seis dimensiones para determinar los requisitos necesarios para la manufactura del robot (ver Fig. 2).



Fig. 2. Análisis de Ciclo de Vida.

El modelo dinámico de un robot manipulador de  $n$  grados de libertad se define por la siguiente ecuación [6]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

donde  $M(q)$  es una matriz simétrica definida positiva de  $n \times n$  y se denomina matriz de inercias,  $C(q, \dot{q})$  es un vector de  $n \times 1$  llamado vector de fuerzas centrífugas y de Coriolis,  $g(q)$  es un vector de  $n \times 1$  de fuerzas externas o pares gravitacionales.

Dado un conjunto de vectores acotados  $q_d, \dot{q}_d$  y  $\ddot{q}_d$  referidos como posiciones, velocidades y aceleraciones articulares deseadas, se trata de determinar una función vectorial  $\tau$ , de tal forma que las posiciones  $q$  que se asocian a las coordenadas articulares del robot sigan con precisión a  $q_d$ , es decir; el objetivo del DFC en robótica es el seguimiento de trayectorias que consiste en determinar  $\tau$ , de tal forma que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q}(t) = 0$$

donde:

$$\tilde{q}(t) = q_d(t) - q(t) \quad (2)$$

De la ecuación (1) se parte para realizar el diseño (ver Fig. 3):

- Mecánico
- Eléctrico
- Electrónico
- Control
- Selección de materiales

Para el diseño de este robot de tres grados de libertad las etapas se deben desarrollar de manera paralela y así poder reducir tiempos y costos en el diseño y manufactura.

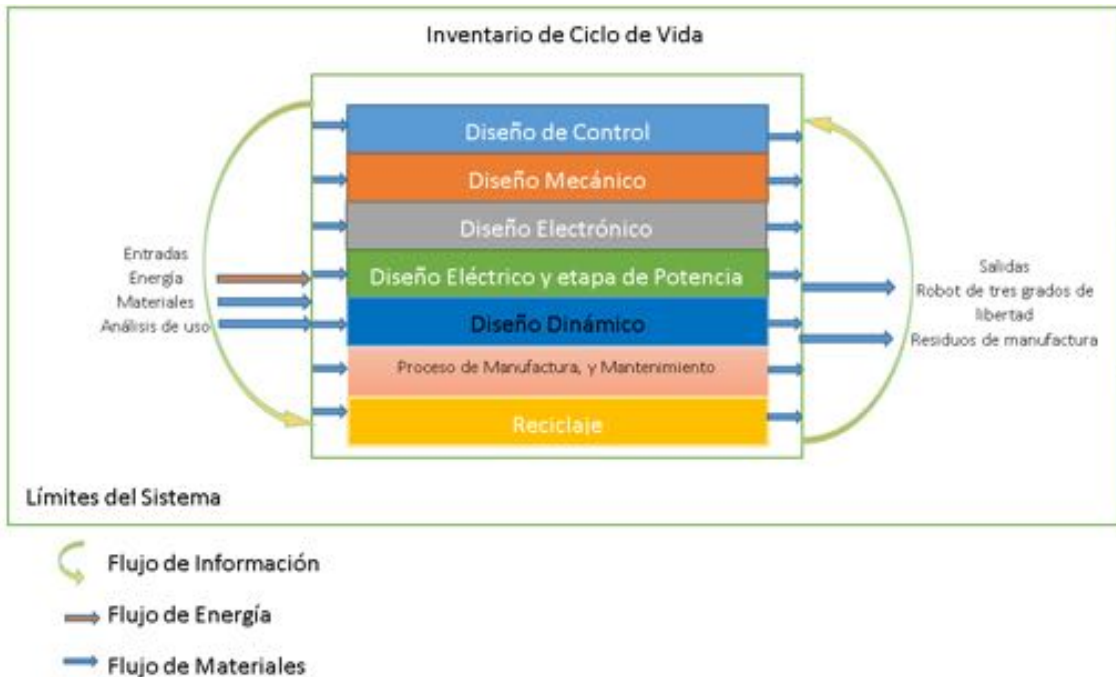


Fig. 3. Visión general del análisis de Ciclo de Vida e Identificación de Flujos del Sistema.

En la Fig. 3 se realiza un análisis de los flujos del sistema con el fin de determinar la relación de cada uno de los procesos necesarios para el diseño y desarrollo del robot háptico. Las necesidades para la manufactura obligan a cada una de la etapas se encuentren de manera simultánea, esto no podría realizarse mediante relaciones tradicionales.

Cada uno de los procesos inicia de manera simultánea, siendo la base el sistema del modelado dinámico que permite al sistema de retroalimentación determinar el tiempo de realización del proyecto.

Posteriormente se encuentran los límites del sistema para determinar los procesos que se llevaran a cabo mediante la aplicación de una manufactura concurrente y se realiza la identificación de flujos los cuales sirven para determinar como el sistema va a tener una retroalimentación de la información durante el proceso de manufactura, finalmente se identifican los flujos de materiales y los flujos de energía que ayudaran al proceso de retroalimentación de energía.

### III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una visión de las actividades inciden en el concepto de ciclo de vida, se consideran de manera global todas las etapas que recorren el proceso, desde que es creado hasta a la terminación de la vida útil de proyecto.

A partir de la obtención del modelo matemático que define al dispositivo se realiza el diseño CAD (ver Fig. 4) el cual permite comenzar con las áreas de Diseño de del control, Diseño Mecánico, Diseño electrónico y etapa de potencia para después procesar el dispositivo en centros de manufactura CNC.



Fig. 4. Diseño en computadora.

La etapa de control y diseño mecánico permiten manipular el dispositivo de acuerdo a las necesidades del usuario final, la etapa de diseño electrónico y de potencia trabajan en conjunto para ser el medio por el cual interactúa el usuario con el robot y una computadora.

Al final del ciclo de vida del dispositivo robótico se encuentra la etapa de reciclaje en donde se ven aspectos de cómo y cuándo se debe realizar el manejo adecuado de los materiales a

reciclar, esto permite reducir el impacto ambiental que el diseño y desarrollo de este dispositivo acarrea.

Del cien por ciento del dispositivo el noventa y cinco por ciento se puede reciclar ya que la estructura se basa en aluminio, cobre, acero y plásticos, por lo cual el tiempo estimado de vida es de cinco a seis años.

En las Fig. 5 y 6 se muestran las partes principales del robot ya manufacturadas en un centro de maquinado CNC, como se puede apreciar en la Fig. 5 el mecanismo cuenta con los actuadores que permiten el movimiento del robot y que al final serán los responsables de interactuar con el usuario final.



Fig. 4. Base de robot.



Fig. 5. Mecanismo principal.



Fig. 6. Robot acoplado.

Al final del proceso se obtuvo como resultado un robot con una estructura de 3 grados de libertad como se muestra en la Fig. 7 y en la Fig. 8 se presenta el diseño en computadora.



Fig. 7. Robot terminado.

#### IV. CONCLUSIONES

El robot de tres grados de libertad se diseñó y se construyó al utilizar la ingeniería concurrente, la metodología del diseño DFC, el diseño asistido por computadora y a la implementación de sistemas de manufactura CNC, se logró que la construcción resultará en la mínima utilización de recursos humanos, energéticos y económicos debido a que la estructura mecánica no es compleja de manufacturar y esta reduce las cargas en los actuadores lo cual permite que la energía que se utiliza para controlar el robot sea menor en comparación a otras arquitecturas robóticas.

#### REFERENCIAS

- [1] Alvin S. L., Crefeld P. J., Getting started: Concurrent Engineering for a medium-sized manufacturer, Journal of manufacturing system, vol. 13, No. 1, pp. 48-54, 1994.
- [2] R. Mills, B. Beckert y L. Carrabine, The future of product development, Computer-Aided Engineering, 10: 38-46, 1991.
- [3] R. García-Flores, Ingeniería Concurrente y Tecnologías de la Información, Ingenierías, Vol. VII, No. 22, Enero-Marzo 2004.
- [4] Q. Li, W. J. Zhang, and L. Chen, Design for Control—A Concurrent Engineering Approach for Mechatronic Systems Design, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 6, NO. 2, June 2001.
- [5] A. T. Calderón-Salazar, Fundamentos de la Ingeniería concurrente, Tecnologías de Manufactura Avanzada, CIATEQ, 2010.
- [6] Barrientos, A, Peñin L, Balaguer C, Aracil R. Fundamentos de Robótica, Mc Graw Hill, España, 3ra. Edición, 1997.

## Control de posición PD con acción acotada arco tangente para un robot de 3GDL.

L. F. Serna-Hernández<sup>1</sup> F. Lopez-Camacho<sup>1</sup> Á. Jiménez-Uribe<sup>1</sup> L. Díaz-Gómez<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan,  
 Dom. Conocido s/n, El Saucillo, Huichapan, Hgo. México, a10021120@iteshu.edu.mx

**Resumen**— En el siguiente artículo se presentan los resultados del control de una estructura robótica de 3 grados de libertad (GLD) se agregan los modelos matemáticos con el fin de evaluar correctamente la estructura, se muestran simulaciones de posición en MATLAB®, valores que se comparan con los resultados experimentales del controlador de posición PD atan que se desarrolla en el software LabVIEW® mismo donde se implementó la ley de control. Se utilizan dos DAQ para la comunicación entre el brazo y la PC. La construcción de la estructura se compone de un sistema de motores de corriente directa (CD), eslabones de aluminio y encoders de inducción magnética.

**Abstract**— The following article presents the results of a robotic control structure of 3 degrees of freedom (GLD) mathematical models in order to properly assess the present structure is added, simulations position shown in MATLAB®, values being compared with the experimental results of the position controller PD tie that develops in the same LabVIEW software where the control law was implemented. Two DAQ for communication between the arm and the PC are used. The building structure consists of a system of motors direct current (DC), aluminum links and encoders of magnetic induction.

**Palabras clave** — PD atan, control, posición, controlador.

### I. INTRODUCCIÓN

El modelo cinemático estudia el movimiento y la geometría del robot sin tomar en cuenta las fuerzas que lo producen, en este modelo se resuelven dos problemas de posicionamiento (Cinemática Directa e Inversa). En la cinemática directa resuelve la posición y orientación del robot, mientras que la cinemática inversa resuelve los ángulos de cada articulación conociendo la posición definida por la Cinemática Directa [1], [3], [6].

El modelo dinámico es un modelo con esfuerzos, en él se estudian los fenómenos físicos que se encuentran en la estructura mecánica tales como (efectos inerciales, fuerzas centrípetas, de coriolis, para gravitacional y la fricción), estos fenómenos son propios de la naturaleza dinámica del robot [1], [2], [4] en este trabajo se utiliza dicho modelo con fines de simulación.

El control proporcional derivativo arco tangente (PD atan) tiene estabilidad asintótica local, subsana la diferencia del error en régimen estacionario, tiene tres matrices definidas positivas, de ganancia proporcional  $K_p$ , de ganancia derivativa  $K_v$ , de ganancia diagonal para eliminar la pendiente del error ( $\Lambda \tilde{q}$ ) y de ganancia diagonal para amortiguar a la velocidad ( $\Gamma \dot{q}$ ) [4], [5], [7].

### II- MODELO CINEMÁTICO

#### Cinemática Directa

La cinemática directa es una función vectorial que relaciona las coordenadas articulares con las coordenadas cartesianas, determina la posición y orientación del efector final del robot por medio del algoritmo de Denavit-Hatenberg (D-H) [1], [2], [3]. Los parámetros D-H de la estructura mecánica se muestran en la Tabla 1 y en la Fig. 1 se muestra el diagrama de cuerpo libre (DCL), en donde se implementó la ley de control.

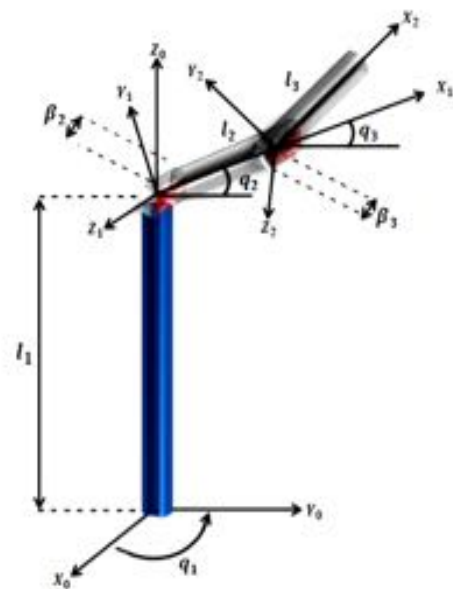


Fig. 1: Robot Antropomórfico de 3 (GDL).

El estudio de los parámetros D-H del robot se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1: PARAMETROS D-H DEL ROBOT DE 3 GDL

Eslabón	Li	αi	Di	Θi
1	0	π/2	L1	q1
2	L2	0	B2	q2
3	L3	0	B3	q3

Con los parámetros obtenidos de D-H se calculan las matrices de transformación homogénea para determinar la posición y orientación del efector final, aplicándolo a cada uno de los sistemas coordenados siguiendo la siguiente ecuación:

$$H_{i-1}^i = \begin{pmatrix} \hat{e}^{c_i} & -s_i c_{\alpha_i} & s_i s_{\alpha_i} & l_i c_i & \hat{u}_i \\ \hat{e}^{s_i} & c_i c_{\alpha_i} & -c_i s_{\alpha_i} & l_i s_i & \hat{u}_i \\ \hat{e}^0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i (b_i) & \hat{u}_i \\ \hat{e}^0 & 0 & 0 & 1 & \hat{u}_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

Donde las funciones trigonométricas seno y coseno se sustituyen por "S y C".

La matriz de transformación Homogénea que determina la cinemática directa está definida por:

$$H_T = (H_0^1)(H_1^2)(H_2^3) \quad (2)$$

Por lo tanto la matriz resultante es:

$$H_T = \begin{pmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 & [\beta_2 - \beta_3] s_1 l_3 c_1 c_{23} + l_2 c_1 c_2 \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & -c_1 & -[\beta_2 - \beta_3] c_1 l_3 s_1 c_{23} + l_2 s_1 c_2 \\ s_{23} & c_{23} & 0 & l_3 s_{23} + l_2 s_2 + l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

De la matriz de transformación homogénea se obtiene la posición del efector final del robot en las coordenadas x, y, z que son los primeros 3 elementos de la cuarta columna y se muestran en la ecuación (4), la primera segunda y tercera columna que se muestran en la ecuación (3) son la orientación, inclinación y balanceo respectivamente [3], [5].

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\beta_2 - \beta_3] s_1 l_3 c_1 c_{23} + l_2 c_1 c_2 \\ -[\beta_2 - \beta_3] c_1 l_3 s_1 c_{23} + l_2 s_1 c_2 \\ l_3 s_{23} + l_2 s_2 + l_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Cinemática Inversa

Con la cinemática inversa se buscan los valores de los ángulos que deben tomar las articulaciones para que el robot se posicione y oriente, en sí convierte las coordenadas cartesianas en coordenadas articulares [2], [3]. Las ecuaciones de la cinemática inversa se obtienen por métodos analíticos trigonométricos:

$$q_1 = \gamma - p = a \tan \left( \frac{y_0}{x_0} \right) - a \tan \left( \frac{\beta_2 - \beta_3}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 - (\beta_2 - \beta_3)^2}} \right) \quad (5)$$

$$q_2 = a \tan \left( \frac{(l_2 + l_3 c_3) z_0 - l_3 s_3 \sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2} l_2 + l_3 c_3 + z_0 l_3 s_3} \right) \quad (6)$$

$$q_3 = a \tan \left( \frac{\sqrt{(2l_3)^2 - (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - l_2^2 - l_3^2)^2}}{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - l_2^2 - l_3^2} \right) \quad (7)$$

### III- MODELO DINÁMICO

El modelo dinámico, representa la base matemática para llevar a cabo el análisis y el estudio de los fenómenos físicos presentes en la estructura mecánica del robot, tales como el movimiento de los eslabones y las fuerzas ejercidas en los actuadores de sus articulaciones, se expresa con las ecuaciones de movimiento de la formulación de Euler-Lagrange [4], [6]. En su forma compacta en el área de la robótica la ecuación se describe de la siguiente forma:

$$\tau = H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + f_f(\dot{q}, f_e) \quad (8)$$

Matriz de Inercia  $H(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ : Describe el cambio de estado del movimiento del robot en un punto de equilibrio.

Matriz de Fuerzas Centrípetas y de Coriolis  $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ : Es la desviación del movimiento de traslación debido a su componente de rotación.

Vector de pares Gravitacionales  $g(q) \in \mathbb{R}^n$ : Obtiene de la energía potencial que se genera en las posiciones articulares  $q$  del robot.

Vector de fuerzas de Fricción  $f_f(\dot{q}, f_e) \in \mathbb{R}^n$ : Expresa los fenómenos físicos de fricción

viscosa y de coulomb, que se oponen al movimiento del robot.

**IV- SIMULACION EN MATLAB**

Las simulaciones en MATLAB® incluyen las propiedades del modelo dinámico del robot algoritmos de control PD atan, tiene en su estructura una matriz de ganancia proporcional ( $K_p \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ), una matriz de ganancia derivativa ( $K_v \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ), una matriz de ganancia diagonal para eliminar el impulso del error ( $\Lambda \tilde{q} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ) y una matriz de ganancia diagonal para amortiguar a la velocidad ( $\Gamma \dot{q} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ) son matrices definidas positivas. La ecuación en lazo cerrado en variables de estado que define el problema de control implementado es [2] [5]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M(q)^{-1} [K_p \text{atan}(\Lambda \tilde{q}) - K_v \text{atan}(\Gamma \dot{\tilde{q}}) - C(q, \dot{q}) \dot{\tilde{q}} - B \dot{\tilde{q}}] \end{bmatrix} \quad (9)$$

La estabilidad para el control PD atan se describe por la siguiente función candidata de Lyapunov.

$$V(\dot{q}, \tilde{q}) = \frac{1}{2} \dot{\tilde{q}}^T M(q) \dot{\tilde{q}} + \frac{1}{2} \tilde{q}^T K_p \text{atan}(\Lambda \tilde{q}) \quad (10)$$

La función candidata del control PD atan en sentido de Lyapunov es definida negativa para demostrar estabilidad debido a que la posición deseada es una constante y se describe en la Ecuación 11.

$$\dot{V}(\dot{q}, \tilde{q}) = \dot{q}^T K_v \text{atan}(\Gamma \dot{\tilde{q}}) + \dot{\tilde{q}}^T B \dot{\tilde{q}} \geq 0 \quad (11)$$

La función trigonométrica (atan) opera en el primer y tercer cuadrante (I, III) atenuando al sistema con un valor asintóticamente a 0  $\tilde{q} \geq 0$  y  $\tilde{q} \leq 0$  eliminando la saturación de los motores de modo que no operen en sus límites físicos cuando se les demanden grandes señales de control.[4]

En la figura 2 se aprecian las gráficas de estabilidad de la función arco tangente (atan).

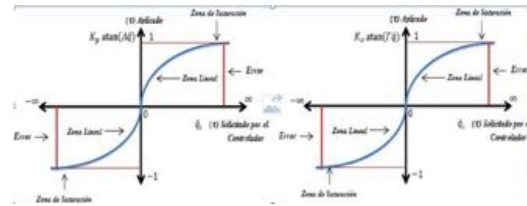


Fig. 2: Estabilidad (Kp atan) del Error y (Kv atan) de la Velocidad.

En la Fig. 3 se muestra el diagrama de bloques del control PD atan.

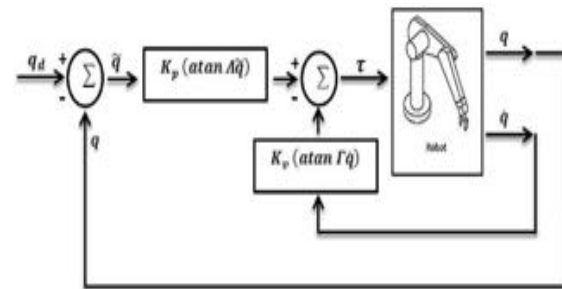


Fig. 3: Diagrama de bloques del Control PD atan.

La simulación para analizar su comportamiento del robot se realizó en MATLAB®, permite resolver el problema dinámico utilizando leyes del control PD atan.

Los parámetros estructurales que utiliza la dinámica del robot para llevar a cabo la simulación son: la longitud (l) de los eslabones, la masa (m) de cada uno incluyendo el peso de los motores, la inercia (I) de cada eslabón y el centro de gravedad (lcg) de cada uno. La Tabla 2 muestra los datos utilizados en la simulación y en la construcción de la estructura.

TABLA 2: PARAMETROS DE LA ESTRUCTURA DEL ROBOT

Eslabón	l	m	I	Lc
1	0.30 m	0.237 kg	0.3 kg.m <sup>2</sup>	0.019 m
2	0.14 m	0.145 kg	0.2 kg.m <sup>2</sup>	0.559 m
3	0.09 m	0.02 kg	0.1 kg.m <sup>2</sup>	0.038 m

De la Tabla 2 se calculan y se obtienen los modelos en base a las ecuaciones descritas en los apartados II y III, los valores de (Kp), (Kv), ( $\Lambda \tilde{q}$ ) y ( $\Gamma \dot{\tilde{q}}$ ) para el controlador se establecen en:



$$K_p = \begin{bmatrix} 0.09 & 0 & 0 \\ 0 & 0.09 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 0.12 & 0 & 0 \\ 0 & 0.18 & 0 \\ 0 & 0 & 0.58 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\Lambda \tilde{q} = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\Gamma \dot{q} = \begin{bmatrix} 0.015 & 0 & 0 \\ 0 & 0.018 & 0 \\ 0 & 0 & 0.018 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Para los resultados de la simulación se fijan las referencias en:  $q_1=90^\circ$ ,  $q_2=180^\circ$  y  $q_3=270^\circ$ , las Fig. 4, 5 y 6 muestran los resultados de la posición de las articulaciones 1, 2 y 3 respectivamente.

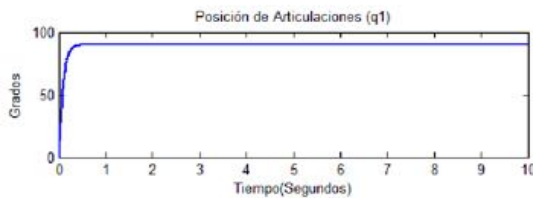


Fig. 4: Posición de Articulación (q1) a 90°.

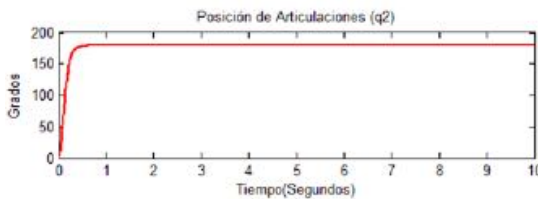


Fig. 5: Posición de Articulación (q2) a 180°.

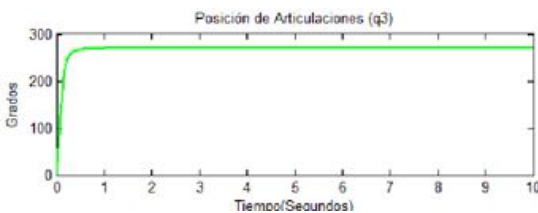


Fig. 6: Posición de Articulación (q3) 270°.

## V – CONSTRUCCIÓN

La construcción de la estructura mecánica, se realiza a partir del esquema de la Fig. 1 los eslabones fueron maquinados de aluminio de 3 mm de espesor. En la Fig. 7 se muestra la construcción de la estructura mecánica.



Fig. 7: Robot Antropomórfico de 3 (GDL).

Se utilizan 3 motores de corriente directa (DC), cada uno con un sistema de reducción para la transmisión de movimiento a los eslabones. En la Tabla 3 se muestran los datos de los motores.

TABLA 3: DATOS DE LOS MOTORES

Motor	Relación	Peso
1	100:1	0.224 kg
2	100:1	0.224 kg
3	34:1	0.100 kg

Se utilizaron 2 puentes (H) L298N para controlar el sentido de giro, dos tarjetas DAQ una NI PCI SCB-68 para la lectura de los encoders y el PWM aplicado a los motores y una NI USB-6210 para el mando de los puentes (H), y como sensores para la posición del robot se utilizaron 3 encoders de inducción magnética a 5V.

## VI – INTERFAZ

Las leyes de control permiten que el robot pueda alcanzar de una posición deseada para analizar su comportamiento dinámico, de tal manera que el robot dependerá básicamente de la eficiencia de los controladores para su estabilidad, permitiendo que el error de posición tienda asintóticamente a cero [4].

El algoritmo de control PD atan se desarrolló en la plataforma de LabVIEW® para el control de posición de las articulaciones. En la Fig. 8 se aprecia el esquema de interfaz de la comunicación entre la estructura robótica y la PC.

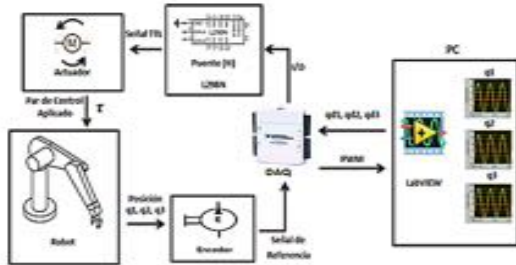


Fig. 8: Esquema de Interfaz de la Comunicación del Robot y la PC utilizando DAQ s.

En las gráficas de las Fig. 9, 10 y 11 se muestran los resultados de las posiciones obtenidas en LabVIEW®, comparadas con las posiciones obtenidas en las simulaciones en MATLAB® con referencias de 180° cada una bajo la ley de control PD atan, la línea blanca representa la referencia introducida desde la interfaz y la línea azul la posición de la articulación.



Fig. 9: Grafica de (q1) a 90°.



Fig. 10: Grafica de (q2) a 180°.



Fig. 11: Grafica de (q3) a 270).

En la Fig. 12 se muestran las referencias deseadas, las referencias leídas por los encoders, y el error de posición en el espacio estacionario de cada una de las articulaciones de la estructura mecánica del robot.

Controlador PD atan			
Error	(q) Deseada	(q) Leída	Control PD atan
0.235	90	89.765	0.176363
0.199	180	179.801	1.53766
0.221	270	269.779	0.0882353

Fig. 12: Referencias Deseadas, Leídas y Error de Posición de cada una de las Articulaciones.

## VII- CONCLUSIONES

La ley de control PD Atan en función candidata de Lyapunov demuestra propiedades de estabilidad. La estabilidad se demuestra debido a que los puntos de equilibrio se caracterizan en el sentido de esta función candidata en donde todas las soluciones del sistema tienden a la cercanía de un punto de equilibrio en función de un modelo de energía denotado por La Salle.

De modo que el controlador PD atan para el control de posición es aceptable, los resultados experimentales obtenidos en LabVIEW® se observa que puedes observar el problema de saturación de los actuadores, los experimentos fueron validados con las simulaciones realizadas en MATLAB®.

## REFERENCIAS.

- [1] Andueza L. y Aguirre I. (2010). Diseño de un Manipulador Robótico con Tres Grados de Libertad para fines educativos. Revista Ciencia e Ingeniería.
- [2] Andueza L. (2011). Diseño de un Manipulador Robótico con Tres Grados de Libertad para fines educativos. Tesis de maestría. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- [3] Angulo J. y Angulo I. (2011). Microcontroladores PIC. Tercera Edición. McGraw, Madrid.
- [4] Astrom K.J. and Hagglund T. (2009). PID Controllers: Theory, Design and Tuning, International Society and for Measurement and Control.
- [5] González A., Pineda M. y Soberanes M. (2010). Seguimiento Adaptativo de Trayectorias con Convergencia en Tiempo Finito de un Robot Antropomórfico Virtual de Tres Grados de Libertad.
- [6] Martínez E. (2009). Control de un Robot tipo PUMA utilizando Celdas Neuronales Analógicas.
- [7] Abdala S. y Ñeco R. (2012). Caracterización de un Robot Manipulador Articulado.

## Turismo virtual como herramienta de rehabilitación motriz

Espinoza Galicia Carlos Arturo <sup>1</sup>, Chavero Callejas Rogelio Alan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *División de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan. Huichapan, Hgo., México, cespinoza@iteshu.edu.mx, rachavero@iteshu.edu.mx*

**Resumen**— Este documento muestra un ejemplo del uso de las tecnologías para la virtualización de los lugares turísticos como una nueva alternativa tecnológica para la rehabilitación de personas con discapacidad y así cumplir con el objetivo de crear un vínculo entre las personas con discapacidad, sus familiares y la comunidad, a través de una rehabilitación integral que respete y salvaguarde su dignidad y promueva una verdadera pertenencia e inclusión a la sociedad impactando en el proceso de desarrollo económico, social y cultural.

**Abstract**— This document shows an example of the use of technologies for virtualization of the tourist spots as a new technological alternative for the rehabilitation of people with disabilities and so comply with the goal of creating a link between people with disabilities, their families and the community, through a comprehensive rehabilitation that respects and safeguards their dignity and promote a true belonging and inclusion into society impacting on the process of economic development social and culture.

**Palabras clave** — Kinect, Modelado 3D, Huichapan, El Saucillo, Discapacidad, Rehabilitación.

### I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo, muestra el desarrollo de un proyecto que mediante el uso de modelado 3D de un entorno real, Los Arcos El Saucillo, ubicado en municipio de Huichapan, Hgo. La idea principal es representar sitios turísticos de difícil acceso, como es el caso de Los Arcos El Saucillo, generando un entorno virtual donde un usuario con ayuda de Microsoft Kinect® permita recorrer el entorno tal como si se encontrara realmente ahí, como tal se impacta en dos grandes objetivos, apoyar a rehabilitación motriz de una persona estimulada por el entorno y ofrecer un medio de difusión turística para el sitio modelado, el proyecto generado ha sido acreedor a varios reconocimientos estatales y nacionales por su grado de innovación tecnológica.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### II.I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El turismo en México es la cuarta actividad más importante del país [1] y prioridad del gobierno federal y por su parte las personas con discapacidad requieren infraestructura especial para recorrer su localidad o un sitio turístico, desde una simple rampa hasta letreros en braille o transporte especializado, lo cual representa un gasto considerable tanto para los gobiernos municipales como el federal, desafortunadamente no todos los sitios turísticos cuentan con dicha infraestructura, lo que dificulta que esta persona puede recorrer el sitio visitado y por consecuencia la familia opta por otro lugar o bien otra actividad que pueda desempeñar toda la familia, esto genera que se pierda esa derrama económica en el sitio turístico.

### II.II. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

Como objetivo general se tiene el presentar una herramienta que permita realizar ejercicios de rehabilitación, diseñados por un terapeuta experto; y que al mismo tiempo el paciente conozca un lugar que en un entorno real le sería muy difícil o incluso imposible recorrer.

Como objetivos específicos, se tienen:

- Seleccionar una discapacidad a la cual enfrentar.
- Seleccionar un atractivo turístico de difícil acceso para virtualizar.
- Seleccionar una interface que permita reconocer los movimientos del cuerpo y los transforme en movimientos del avatar en el entorno virtual.
- Desarrollar un primer prototipo del modelo 3D.
- Seleccionar un grupo de personas para realizar pruebas.

### II.III. METODOLOGIA

Para el desarrollo de este proyecto de innovación tecnológica, como lo mencionan los objetivos específicos, primero se seleccionó el tipo de discapacidad a enfrentar y según la información proporcionada por el INEGI, donde menciona que el 58.3% de personas con discapacidad sufren de un problema para caminar o moverse [2], por tal, se decidió por este tipo de discapacidad, la discapacidad motriz.

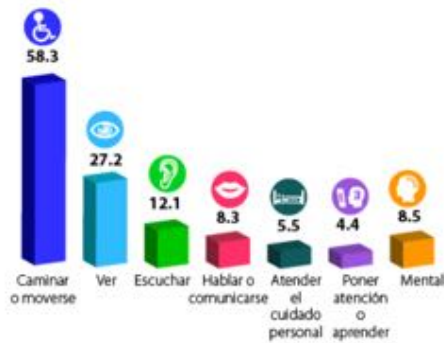


Fig. 1 Porcentaje de la población con discapacidad según dificultad en la actividad (año 2010) [2]

Posteriormente se seleccionó el lugar turístico a virtualizar, el cual tenía que cumplir con el aspecto de que fuera de difícil acceso para las personas con discapacidad motriz, por lo cual, uno de los lugares más representativos de Huichapan son los arcos del “Parque Eco turístico El Saucillo”, los cuales tienen las características de ser los más altos del mundo, tomando en cuenta la altura que representa el arco central desde el fondo de la cañada, este Parque Eco turístico se mostró como ideal, ya que no cuenta con infraestructura para recibir a personas con discapacidad motriz, careciendo totalmente de rampas y adecuaciones para este tipo de discapacidad; otro punto que favoreció la elección de este paraje, fue la cercanía al Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, y que está localizado solo a 5 minutos de distancia en automóvil.



Fig. 2 Parque Eco Turístico Arcos del Saucillo (Tomada el 11 de mayo de 2013)

Posteriormente se tomaron múltiples fotografías del lugar así como de las texturas como las de los arcos y las rocas que conformaban la cañada, utilizando la tecnología de VRML® (Lenguaje de Modelado de Realidad Virtual, por sus siglas en inglés) se realizó el primer modelo 3D.



Fig. 3 Primer prototipo de los modelado en 3D utilizando la tecnología VRML®

Kinect® de Microsoft®, fue seleccionado como medio de interfaz natural de usuario ya que sus prestaciones para el seguimiento de los movimientos del cuerpo humano fueron los ideales para el proyecto, usando FFAST® (Flexible Action And Articulated Skeleton Toolkit) fue como se logró la interacción con el mundo virtual usando movimientos de las manos para desplazarse por el entorno.

Posteriormente y viendo las limitaciones de VRML, se optó por una tecnología que a pesar de que requiere mucho más poder de procesamiento gráfico, ofrecía mejores resultados, seleccionando a Blender® para modelar los elementos 3D y UDK® (Unreal Developer Kit) para la generación del entorno completo, dando como resultado el modelo que actualmente se tiene.

Una vez teniendo el modelo, se le agregó sonidos de ambientación como pájaros y viento.

A pesar de que el modelo era muy realista, aun se deseaba una mejor experiencia de usuario, por lo cual las pantallas con lentes 3D fueron las que dieron el toque final al modelo.



Fig. 4. Uso combinado de Kinect y FAAST para el seguimiento de cuerpo humano



Fig. 5 Captura del 2do modelo de virtualización utilizando Blender y UDK

También se reconfiguro el script de FAAST para que el movimiento fuera con el tronco del cuerpo y no con las manos, obteniendo así una experiencia más natural.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proyecto hasta el momento se encuentra como fianlizado en la primera etapa de investigación que comprende la parte de la investigación de las tecnologías a usar así como la virtualización del lugar que cumpliera con las especificaciones del proyecto. La segunda etapa que comprende la implementación de rutinas de rehabilitación aun se encuentra en desarrollo. Se sigue buscando instancias que financien el proyecto para llevarlo a cabo en otros lugares y con instituciones de salud por el cual se

encuentra en proceso de incubación en el CIIE (Cetro de Incubación e Innovación Empresarial) de ITESHU, al igual en el programa de incubación en línea del INADEM (Instituto Nacional del Emprendedor), en este último encontrándose en la fase de evaluación.

El proyecto se ha presentado en varios foros obteniendo reconocimientos a nivel nacional como en Expociencias y Emprendedores Mazatlan 2013, en el Primer Foro de Jóvenes Investigadores CITNOVA Hidalgo, E-Bussines Weekend del AMIPCI, Maratón de Negocios de Campus Party 2013, Aldea Telcel 2014, de la misma forma en la Semana Nacional de Ciencia y Tecnología en el ITESHU donde contamos con la asistencia de alumnos del CAM (Centro de atención múltiple No. 25) los cuales probaron el proyecto y por la aceptación del mismo se están llevando a cabo platicas con la directora de esta misma institución para la implementación del mismo.



Fig. 6. Alumnos de CAM 25 de Huichapan Hgo probando el proyecto en el marco de la SNCyT 2013

### III.I EL PROBLEMA DEL ESPECIALISTA EN REHABILITACIÓN

La realidad virtual tiene múltiples aplicaciones en el área de la salud ya que está cambiando los paradigmas basándose en la práctica de destrezas en un ambiente seguro, antes de refinarlas en el mundo real. Un ejemplo de esto es la aplicación e niños con lesión neurológica central específicamente en los que presentan parálisis cerebral ya que su objetivo es mejorar las competencias individuales y el desempeño motor de los niños. [3] En el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan no existe un especialista en rehabilitación motriz, motivo por el cual no se ha llevado esto como tal a este campo, se siguen buscando instancias con las cuales colaborar para hacer este proyecto parte de la salud, una parte de esto, es porque al no ser personas capacitadas para asignar ciertos movimientos a un paciente, se puede lastimar y causar un daño en lugar de un beneficio a la persona.

#### IV. CONCLUSIONES

Como se pudo observar, con este proyecto se impacta directamente en los dos objetivos principales, el ofrecer un medio de difusión para zonas turísticas de difícil acceso y apoyar con rehabilitación, esto mediante la incorporación de tecnologías como el uso de modelos 3D, virtualización de elementos reales, uso de Microsoft® Kinect® y un software de apoyo como FAAAST agregando a esto pantallas 3D y sonidos reales, se tiene un importante escenario que puede ser usado para estos y para otros fines.

Un punto importante a tomar en cuenta es la parte de contar con un aliado en la parte de rehabilitación motriz, el cual pueda complementar este proyecto, ya que con el apoyo de este realmente se podría realizar una rehabilitación, combinando ejecuciones a realizar mediante acciones previamente diseñadas por el especialista.

#### Referencias

- (1) World Tourism Organization, «World Tourism Organization UNWTO,» 2012. [En línea]. Available: <http://dtxq4w60xqpw.cloudfront.net/sit>. [Último acceso: 01 2015].
- (2) Instituto Nacional de Estadística y Geografía, «Discapacidad en México,» 2012. [En línea]. Available: <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/discapacidad.aspx?tema=P>.
- (3) S. M. C. Valencia Valencia Doris, «Realidad Virtual para reeducación motora de niños,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Cundinamarca - Colombia .

## Cálculo del polinomio de independencia de familias de grafos utilizando matrices de transferencia y sumas de Zykov.

Williams Gómez López<sup>1</sup>, Germán Cuaya Simbro<sup>2</sup>, Erick Hernández Najera<sup>3</sup>

*Departamento de Ingeniería en Sistemas Computacionales*

*Instituto Tecnológico Superior de Huichapan*

*El Saucillo, Huichapan Hidalgo, México*

*wgomez@iteshu.edu.mx<sup>1</sup>*

*gcuaya@iteshu.edu.mx<sup>2</sup>*

*ehernandez@iteshu.edu.mx<sup>3</sup>*

**Resumen**— En la literatura se presentan resultados del cálculo del número de independencia de grafos sencillos o bien cotas inferiores o superiores para familias de grafos (tal es el caso de algunas familias de grafos de Petersen Generalizado), así como formulas para la obtención del polinomios de independencia para familias de grafos sencillos. En este trabajo se propone una nueva forma de obtener el número de independencia de un grafo, mas aún, se obtiene el polinomio de independencia de una familia de grafo el cual, la familia se caracteriza mediante la operación de sumas de Zykov (poligrafos) en donde, a partir de las relaciones entre los vértices de cada grafo sumando (monografo), se obtendrán matrices (matrices de transferencia) cuyas entradas son polinomios y utilizando operaciones básicas de matrices obtener una función generatriz que permita obtener el polinomio de independencia de cualquier elementos de la familia de grafo.

**Abstract**— In the literature results of calculating the number of independent or search Simple graphs below or above graph Dimensions paragraph Families are present ( as in the case of some families of graphs Generalized Petersen) and formulas for obtaining independence polynomials Families Singles para graphs. This paper proposes a new way to get the number one graph independence, moreover, the independence polynomial graph of a family of which it is obtained, the family was characterized by operating sums of Zykov (polygraph) This is where, after relations between the vertices of each graph by adding (monograph), will be obtained matrices (Matrices Transfer ) polynomials son whose inputs and using basic matrix operations get a generating function that allows to obtain the polynomial independently of any family members graph.

**Palabras clave** —Grafos, Matriz de Transferencia, Polinomio de Independencia, Suma de Zykov.

### I. INTRODUCCIÓN

Gran parte de la Teoría de Grafos consiste en el estudio de los invariantes de grafos, como por ejemplo el número cromático, el número de independencia y el número de dominación. Por

desgracia el cálculo de cada uno de estos es NP-difícil (NP-hard). Existen algoritmos de aproximación y funciones de heurísticas para obtener soluciones casi óptimas en tiempos relativamente razonables; sin embargo, estos algoritmos únicamente proporcionan cotas inferiores o superiores. [1]

El número de independencia de un grafo es el máximo número de vértices independientes que pueda tener un grafo. Como se mencionó anteriormente, el cálculo de este número es NP-difícil; luego para formar el polinomio de independencia, donde los coeficientes corresponden al número de conjuntos independientes de cardinalidad igual al exponente de la variable que le precede, es también un problema NP-difícil.

Para el caso del cálculo del polinomio de independencia de un grafo, existen fórmulas cerradas o recurrentes para grafos sencillos [2] o cotas superiores e inferiores para familias de grafos, tal es el caso de los grafos de Petersen Generalizados [3], [4] y [5]. En cada uno de estos trabajos se presentan únicamente los número de independencia y no el polinomio como tal.

El objetivo principal de este trabajo es presentar una nueva forma para obtener el polinomio de independencia de familia de grafos, el cual haciendo uso de matrices de transferencia y definiendo patrones de construcción de los elementos de la familia de grafos, se obtendrá una función generatriz a partir del cual, expresando la función en serie de Taylor, se obtiene el correspondiente polinomio de independencia de cada grafo de la familia.

#### A. Definiciones Preliminares

El número de independencia  $\alpha$  de un grafo  $G$  se define como el máximo cardinal de un conjunto de vértices no incidentes entre sí, más aún, el polinomio de independencia de un grafo

$G$  en variable  $x$ , se denota y se define como  $P(G; x) = \sum_{\kappa \in \mathcal{L}} x^{|\kappa|}$  donde el conjunto  $\mathcal{L}$  es la colección de conjuntos de vértices independientes de cualquier cardinalidad. Cabe mencionar que el término  $k$ -ésimo resume el número de vértices independientes de cardinalidad  $k + 1$ .

Un algoritmo sencillo para obtener el polinomio de independencia es la de, en primer lugar, generar toda la combinación de conjuntos de vértices independientes de cardinalidad  $1, 2, \dots, n$  con  $n$  el número total de vértices del grafo  $G$ . A partir de esto, se cuentan todos los conjuntos de cardinalidad  $1, 2, \dots, \alpha$ . Finalmente, con cada una de estas cantidades se forma el polinomio general de grado  $\alpha$ .

De lo anterior, el primer problema que surge es la obtención de todas las combinaciones posibles de conjuntos de vértices independientes ya que se debe de formar  $2^n - 1$  conjuntos de vértices independientes y los cuales debe ser verificado si para cualesquier par de vértices  $(x, y)$  del conjunto  $\kappa$  no exista una arista que los conecte.

I.A.1 Suma de Zykov

En la Teoría de Grafos pueden encontrarse operaciones entre dos grafos  $G, H$  tales como la unión, la intersección y la diferencia [6]. Por otra parte, una operación que permite construir nuevos grafos a partir de relaciones entre los vértices de los grafos es el llamado suma de Zykov [7] o también llamada polígrafos [8].

La suma de Zykov consta en definir relaciones  $R$  entre las aristas de los grafos  $G, H$  el cual son nuevas aristas que conecta a cada grafo sin intervenir en la incidencia de los vértices de cada uno. Las relaciones  $R$  pueden ser las mismas o pueden cambiar conforme se vayan agregando nuevos grafos (llamados monografos) así como tener sumas de Zykov abiertas o cerradas. La primera se refiere a que, el último monografo se le añade nuevas aristas que conectan al primer monografo de la serie, mientras que el segundo no tiene esta relación.

La suma de Zykov abierta recibe también el nombre fasciagrafos, mientras que la suma de Zykov cerrada el nombre de rotografo [8]. En la fig. 1 se muestra algunos ejemplos de fasciagrafos y rotografos.

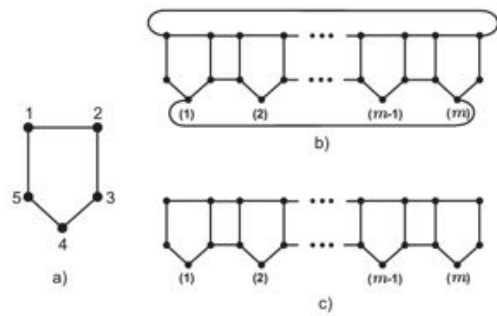


Fig. 1 Ejemplo de sumas de Zykov. a) Monografo b) Se ilustra un rotografo y en c) se ilustra un fasciagrafo

I.A.2 Matrices de Transferencia

La matriz de transferencia es una herramienta computacional el cual provee la cantidad de funciones definidas entre grafos pesados. De aquí que, definiendo homomorfismos de grafos y pesos en los vértices y aristas del grafo se puede obtener el número cromático de un grafo o el número de independencia de un grafo o ser usado como función de partición en física estadística [9]. Para el caso del número de independencia, los homomorfismos de grafos se definen a partir del grafo  $H_0$  cuyos pesos se ilustra en la Fig. 2

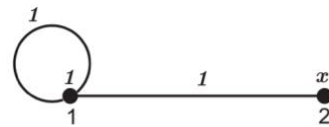


Fig. 2 Grafo  $H_0$

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de la familia de grafos que se desee obtener el número de independencia, se debe de definir el monografo y las relaciones de cada uno de estos. Cabe mencionar que la estructura del monografo debe de ser simple así como las relaciones. Por ejemplo, en el caso de la familia de grafos de Petersen Generalizado  $P(k, 2)$  se define el monografo y las relaciones como se ilustra en la Fig. 3 y Fig. 4.

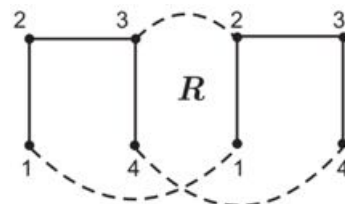


Fig. 3 Definición de la relación  $R$  sobre los grafos  $P_4$  (La relación es mostrada en líneas punteadas).



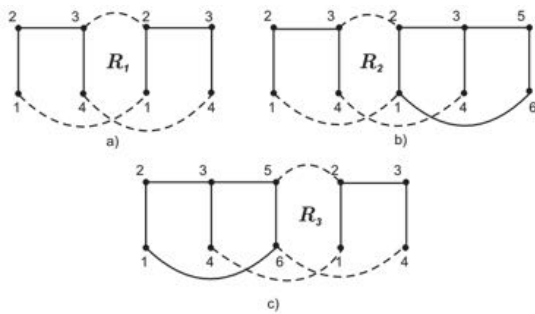


Fig. 4 Definición de la relación  $R_1, R_2$  y  $R_3$  sobre los grafos  $P_4$  y  $M$ .

Así, la suma de Zykov definido en la familia de grafos de Petersen Generalizado queda de la siguiente manera [10]:

$$P(2i, 2) = P_4 \oplus_R P_4 \oplus_R \dots \oplus_R P_4$$

$$P(2i + 1, 2) = \bigoplus_{R_1}^{i-1} P_4 \oplus_{R_2} M \oplus_{R_3} P_4$$

Cada elemento de la familia de grafos de Petersen Generalizado puede hacer uso de alguno de las sumas de Zykov definidos anteriormente.

Por otra parte, para construir las matrices de transferencia con entradas  $x, y$ , hace uso del siguiente resultado [11]

$$T(G +_R H; x, y) = ((I_1 \blacksquare_R I_2) * x^{|I_1|} y^{|I_2|})_{I_1 \in \mathcal{L}_G, I_2 \in \mathcal{L}_H}$$

donde el operador  $\blacksquare_R$  es el producto punto entre los conjuntos estables de los monografos bajo la relación  $R$  y el operador  $*$  recibe el nombre de función signo negada el cual está definido por

$$z^* = \begin{cases} 1 & \text{si } z = 0 \\ 0 & \text{si } z \neq 0 \end{cases}$$

y además las colecciones  $\mathcal{L}_G$  y  $\mathcal{L}_H$  contiene a todos los conjuntos independientes del grafo  $G$  y  $H$  respectivamente.

La matriz de transferencia aquí mostrada, es una particularización de la matriz de transferencia mostrada en [9] que lo define como

$$Z(G, H) = \sum_{\phi \in \text{Hom}(G, H)} w(\phi)$$

donde  $\text{Hom}(G, H)$  es la colección de todos los homomorfismos de grafos definidos sobre los

grafos  $G$  y  $H$ , además la función  $w(\phi)$  es el correspondiente peso del morfismo.

Para la obtención de la función generatriz, es importante definir una nueva serie infinita cuyos coeficientes sean los polinomios de independencia de cada uno de los grafos pertenecientes a la familia por estudiar, la serie de independencia de una familia de grafos  $G_0, G_1, \dots$  se define y se denota por:

$$\mathbb{I}(G_*; z) = \sum_{n=0}^{\infty} I(G_n; x) z^n$$

De la definición anterior, se construye las funciones generatrices para la obtención del polinomio de independencia haciendo uso de alguno de los resultados siguientes [11]

**FASCIAGRAFO**

Sea  $G$  un grafo,  $R: V(G) \rightarrow V(G)$  relación. Se define la siguiente sucesión de grafos

$$G_0 = G; G_{n+1} = G_n +_R G, \text{ con } n \geq 0$$

Entonces

$$\mathbb{I}(G_*; z) = I(G; x) + 1(zT(x, x) + M)1^t$$

donde

$$M = T(x, x^p) \frac{z^2}{Id - zT(x^q, x^p)} T(x^q, x)$$

$T(x, y) = T(G +_R H; x, y)$ ,  $Id$  es la matriz identidad de tamaño igual a  $T(x, x)$  y además  $p + q = 1$ , con  $p, q \in \mathbb{R}$

**ROTOGRAFO**

Sea  $G$  un grafo,  $R$  relación sobre  $V(G)$ . Sea  $S_0 = G; S_2 = G \oplus_R G; \dots$ , una sucesión de sumas cerradas de Zykov. Entonces

$$\mathbb{I}(G_*; z) = I(G; x) - z \frac{\partial}{\partial z} \log_{10} Q(x, z)$$

donde

$$Q(x, z) = \det(Id - zT(G +_R G; x^p, x^q))$$

con  $p + q = 1$

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se aplicará los resultado anteriores con algunas familias de grafos los cuales serán comparados con los que se hayan en la literatura.

#### A. Ciempies

Sea el monografo  $P_2$ , el grafo ruta de dos vértices, y sea  $R$  la relación definida en los vértices del monografo  $P_2$  con una copia del mismo dado por  $R = \{(2,2)\}$ . Luego a partir de los monografos, el grafo  $W_n$  es el fasciagrafo representado por

$$W_n = P_2 +_R P_2 +_R \dots +_R P_2$$

donde el monografo  $P_2$  aparece  $n$ -veces (Fig. 5)

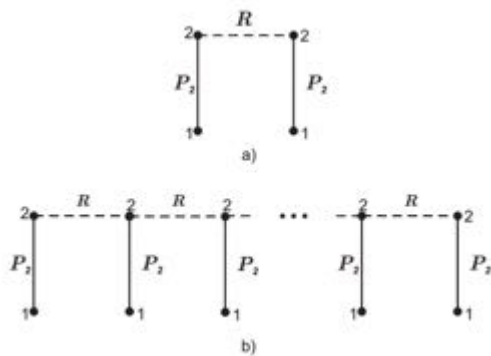


Fig. 5 Grafo  $W_n$  definido a partir del monografo  $P_2$ .

Para aplicar el resultado de serie de independencia para fasciagrafos, se necesitan obtener las matrices  $T(x, x)$ ,  $T(x, x^p)$ ,  $T(x^q, x)$  y  $T(x^q, x^p)$ , los cuales se muestran a continuación:

$$T(x, x) = \begin{pmatrix} 1 & x & x \\ x & x^2 & x^2 \\ x & x^2 & 0 \end{pmatrix}, \quad T(x, x^p) = \begin{pmatrix} 1 & x^p & x^p \\ x & x^{p+1} & x^{p+1} \\ x & x^{p+1} & 0 \end{pmatrix},$$

$$T(x^q, x^p) = \begin{pmatrix} 1 & x^p & x^p \\ x^q & x & x \\ x^q & x & 0 \end{pmatrix}, \quad T(x^q, x) = \begin{pmatrix} 1 & x & x \\ x^q & x^{q+1} & x^{q+1} \\ x^q & x^{q+1} & 0 \end{pmatrix}$$

Aplicando el resultado, se obtiene la función generatriz de la serie de independencia dado por:

$$\mathbb{I}(G_*; x) = -\frac{x^2z + x(z + 2) + 1}{x(x + 1)z^2 + (x + 1)z - 1}$$

De la ecuación anterior, se obtiene la siguiente relación de recurrencia

$$I(W_n; x) = (x + 1)I(W_{n-1}; x) + x(x + 1)I(W_{n-2}; x)$$

con  $I(W_1; x) = 1 + 2x$  y  $I(W_2; x) = 1 + 4x + 3x^2$ .

En [2] se presenta la siguiente ecuación de recurrencia para la familia de grafos  $W_n$

$$I(W_n; x) = (x + 1)I(W_{n-1}; x) + xI(W_{n-2}; x)$$

con  $I(W_0; x) = 1$  y  $I(W_1; x) = 1 + 2x$ . Observe que las ecuaciones de recurrencias son diferentes debido a que las condiciones iniciales son diferentes, es decir que existe un corrimiento de subíndices.

#### B. Ciclos

Sea el monografo  $P_0$  y la relación  $R$  la relación identidad. Entonces, todo ciclo de  $n$  vértices se puede expresar haciendo uso de sumas de Zykov cerrada como

$$C_n = P_0 \oplus_R P_0 \oplus_R \dots \oplus_R P_0$$

con  $n + 1$  sumandos.

Tomando la matriz de transferencia  $T(P_0 +_R P_0; x^p, x^q) = \begin{pmatrix} 1 & x^q \\ x^p & 0 \end{pmatrix}$  y aplicando el resultado de serie de independencia para el caso de rotografo, se obtiene

$$\mathbb{I}(S_*; z) = \frac{z - 2}{xz^2 + z - 1} + x - 1$$

cuya función de recurrencia para el polinomio de independencia de la familia de grafos es

$$I(C_n; x) = I(C_{n-1}; x) + xI(C_{n-2}; x)$$

con condiciones iniciales  $I(C_0; x) = 1 + x$  y  $I(C_1; x) = 1 + 2x$ .

En [7] se deduce que el polinomio de independencia puede obtenerse de forma recursiva empleando la siguiente ecuación

$$I(C_n; x) = I(C_{n-1}; x) + xI(C_{n-3}; x)$$

el cual, empleando procedimientos algebraicos e identidades, resulta ser la misma que la obtenida por las matrices de transferencia.

### IV. CONCLUSIONES

La demostración de cada uno de las funciones de recurrencias obtenida a partir de las matrices de transferencia son mucho mas sencillas que

empleando casos de estudio como los mostrados en [7] y [2].

Cabe hacer mención además que estos cálculos pueden ser implementados de manera muy fácil, sin embargo, es importante resaltar que las matrices de transferencia tienen entrada en un anillo de polinomio, de aquí que las operaciones de obtener la inversa, así como las multiplicaciones de matrices se vuelven algo tardado debido a la complejidad que se haya definido los monografos y las relaciones entre estos.

Un punto interesante que puede servir como trabajo futuro, es lo que se plantea en [9], donde existe la posibilidad de hacer compresiones a las matrices de transferencias para que, pueda disminuir el alto costo computacional que se tiene al estar estudiando familias de grafos más complejos, tales como el grafo de Petersen Generalizado, el grafo de Golberg y más aún, grafos cuya generación es de forma exponencial (caso del grafo Hipercubo). De lo anterior, se buscará las condiciones necesarias y suficientes para realizar la compresión de matrices de transferencia para el caso de fasciografo o rotografo.

Además de lo anterior, se buscará también la forma de obtener demostraciones más fáciles para la conjetura de unimodalidad de los coeficientes del polinomio de independencia para los grafos árbol [2]

#### REFERENCIAS

- [1] S. K. a. A. Vesel, «Computing graph invariants on rotographs using dynamic algorithm approach: the case of (2,1)-coloring and independence numbers,» *Discrete Applied Mathematics*, vol. 129, pp. 449-460, 2003.
- [2] E. L. V. a. E. Mandrescu, «The independence polynomial of a graph - a survey,» de *1st International Conference on Algebraic Informatic*, 2005.
- [3] R. G. a. P. S. J. Fox, «The independence number for the generalized Petersen graphs,» *Ars Comb*, vol. CIII, pp. 439-451, 2012.
- [4] X. Y. S. Y. Z. Q. X. a. J. X. T. L. C, «On the independence number of the generalized Petersen graph  $P(n,k)$ ,» pp. 40-45, 2009.
- [5] B. J. E. a. A. A. N. Besharati, «Independence number of generalized Petersen graphs,» *ArXiv e-prints*, 2011.
- [6] R. Diestel, «Graph Theory,» *Graduate Text in Mathematics*, vol. 173, 2012.
- [7] J. L. Arocha, «Propiedades del polinomio independiente de un grafo,» *Ciencias Matemáticas*, pp. 103-110, 1984.
- [8] D. B. a. A. Graovac, «The matching polynomial of a polygraph,» *Discrete Applied Mathematics*, pp. 11-24, 1986.
- [9] P. H. L. a. K. Markstrom, «Homomorphisms, Exact and Approximate Compression of Transfer Matrices for Graph,» 2006.
- [10] C. B. R. a. C. G. Galván, «Fibonacci numbers of generalized Zykov sums,» *Journal of Integer Sequences*, 2012.
- [11] W. Gómez-López, «Polinomios de Independencia de Grafos de Zykov generalizados,» *BUAP*, pp. --, 2014.

## Bootstrap: Una herramienta de software libre para el diseño Responsivo.

Erick Hernández Nájera<sup>1</sup>, Saulo Gregorio Cristales Bonilla<sup>2</sup>, Williams Gómez López<sup>3</sup>

*División de Ingeniería en Sistemas Computacionales,*

*Instituto Tecnológico Superior de Huichapan,*

*Domicilio conocido, El Saucillo, Huichapan, Hidalgo, C.P. 42411, México*

*ehernandez@iteshu.edu.mx*

*sgcristales@iteshu.edu.mx*

*wgomez@iteshu.edu.mx*

**Resumen**— En este artículo se presenta como es que, de acuerdo al uso de los dispositivos móviles y aplicaciones web o sitios web, se ha impulsado buscar mecanismos que sean adaptativos contribuyendo a que el contenido se ajuste al medio donde es visualizado. A su vez, ésta tendencia ha forzado la búsqueda de herramientas que contribuyan a la mejora visual que en términos del mundo del desarrollo web se denomina *Responsive Web Design*, por lo cual se pretende mostrar como a través de la herramienta conocida como *Bootstrap* se transforma una aplicación con diseño convencional a una que permita al contenido ajustarse al tamaño de la pantalla del dispositivo donde sea visualizado.

**Abstract**— This article is presented as is, according to the use of mobile devices and web applications or websites, it has driven adaptive search mechanisms that are contributing content to fit the environment in which it is displayed. In turn, this trend has forced the search for tools that contribute to the visual improvement in terms of the world of web development is called *Responsive Web Design*, making it even pretend to show how, through the so-called *bootstrap* tool becomes one application with a conventional design that allows the content adjust the screen size of the device where displayed.

**Palabras clave** — Responsive Web Design, Diseño Adaptativo, diseño responsivo, Bootstrap.

### I. INTRODUCCIÓN

Uno de los crecientes desarrollos que se están viviendo día con día, es el gran aumento en el uso de dispositivos móviles o equipos que muestren contenido o se conecten a alguna aplicación web, o simplemente página web, considerando que dichos dispositivos no están inicialmente diseñados para la visualización adecuada de estos contenidos.

Si recordamos cuando comenzó la era de los navegadores web, todo era sólo texto, pero a medida que ha evolucionado la tecnología, tanto los ordenadores como las redes de telecomunicaciones, se ha generado nuevas

formas de desarrollar la web. La inclusión de imágenes fue la más significativa, pero también el vídeo, la animación, o los espacios 3D, lo que aporta valores estilísticos, de diseño y de interactividad jamás imaginados antes. Los contenidos que se mostraban no requerían ajustarse o modificarse dependiendo del dispositivo, ya que solo eran consultados desde un ordenador que contara con un navegador web. Fig. 1.



Fig. 1 Primera página gráfica del motor de búsqueda yahoo!, en el navegador MOSAIC.

A medida que la tecnología ha solventado estas dificultades, ya no nos encontramos con problemas de forma sino de contenido [1].

Buscando diferentes alternativas, se han encontrado algunos mecanismos para realizar ajustes a los contenidos de las páginas web, estos basados en HTML simple y en algunos casos con una gran mejora que son las hojas de estilo.

Mostar la posibilidad de crear una página web responsiva [2] de manera simple, es algo que se puede lograr haciendo uso de herramientas como Bootstrap.

#### A. Responsive Web Design

Definir que es el Responsive Web Design, podría pensarse que se refiere a un método aplicado a las páginas el cual pudiera ser muy complicado de entender. En este caso para lograr entender de manera muy simple podríamos decir que se refiere a lograr que el contenido de una

página web se ajuste de manera dinámica al tamaño de la pantalla del dispositivo en el que es visualizado. Fig. 2.



Fig. 2 Responsive Web Design.

El diseño web adaptable o adaptativo, conocido por las siglas RWD del inglés Responsive Web Design, es una filosofía de diseño y desarrollo cuyo objetivo es adaptar la apariencia de las páginas web al dispositivo que se esté utilizando para visualizarla [2].

Hoy día las páginas web se visualizan en multitud de tipos de dispositivos como tabletas, teléfonos inteligentes, libros electrónicos, portátiles, y aunque cada dispositivo tiene sus características concretas: tamaño de pantalla, resolución, potencia de CPU, capacidad de memoria, entre otras.

Esta tecnología pretende que con un solo diseño web, se tenga una visualización adecuada en cualquier dispositivo. Fig. 3.



Fig. 3 Tamaño de pantalla de diferentes dispositivos.

Ahora bien una aplicación web de manera básica se diseña y programa bajo el esquema conocido como modelo de 3 capas, Fig. 4, que comprende de manera lógica como se va e estar relacionando la aplicación de manera interna. El modelo por capas define en primer lugar la parte con la que el usuario estará interactuando, la segunda que es quien se encargara de lo relacionado al lenguaje como tal, y la de datos que es la comunicación con una base de datos como tal [3].

Bajo el modelo de 3 capas, el diseño responsivo se aplica en la capa de Lógica de presentación ya que esta está destinada al contenido a mostrar en

el navegador del dispositivo, por lo que el ajuste a realizar modifica el contenido de esta capa.



Fig 4 Modelo 3 capas.

### B. Cascading Style Sheet (CSS)

Según el W3C Fig. 5., lo define como “Cascading Style Sheets (Hoja de Estilo en Cascada), mecanismo simple que describe cómo se va a mostrar un documento en la pantalla.” [4].



Fig. 5 Logotipo de la World Wide Web Consortium.

CSS se utiliza para dar estilo a documentos HTML y XML, separando el contenido de la presentación. Los Estilos definen la forma de mostrar los elementos HTML y XML. CSS permite a los desarrolladores Web controlar el estilo y el formato de múltiples páginas Web al mismo tiempo. Cualquier cambio en el estilo marcado para un elemento en la CSS afectará a todas las páginas vinculadas a esa CSS en las que aparezca ese elemento.

CSS funciona a base de reglas, es decir, declaraciones sobre el estilo de uno o más elementos. Las hojas de estilo están compuestas por una o más de esas reglas aplicadas a un documento HTML o XML. La regla tiene dos partes: un selector y la declaración. A su vez la declaración está compuesta por una propiedad y el valor que se le asigne, como se muestra a continuación:

```
h1 {color: red}

/* Donde:
h1 = es el selector
{color: red} = es la declaración */
```

### C. Bootstrap

Según la página oficial, [getbootstrap.com](http://getbootstrap.com), “Bootstrap es el framework HTML, CSS y JS, más popular para iniciarse en el desarrollo de proyectos web responsivos [5]”, Es el más popular para el desarrollo adaptativo, móvil que integra HTML, Hojas de Estilo y JavaScript.

Es un conjunto de herramientas de software libre para diseño de sitios y aplicaciones web. Contiene plantillas de diseño con tipografía, formularios, botones, cuadros, menús de navegación y otros elementos de diseño basado en HTML y CSS, así como, extensiones de JavaScript opcionales adicionales.

El objetivo principal del trabajo es mostrar como con ayuda de la herramienta Bootstrap, se puede migrar a un modelo responsivo, un proyecto ya realizado o por desarrollar, de manera simple aun sin tener mucho conocimiento al respecto.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Hojas de estilo

Las hojas de estilo nos permiten dar la presentación final de nuestro sitio, definiendo las reglas que deberán aplicarse a un determinado elemento o conjunto de etiquetas HTML.

La hoja de estilo nos permite distribuir de forma más entendible el contenido, y con mejoras que añade la versión 3 de CSS, es posible detectar el tamaño de la pantalla del dispositivo con el que es visualizado.

### B. Estructura de Carpetas

Bootstrap incorpora una distribución de carpetas que permite localizar los archivos necesarios para que se pueda llevar a cabo la integración a un proyecto web. Fig. 6.

Esta distribución permite tener todos los archivos que correspondan a hojas de estilo en una carpeta llamada CSS, así también una llamada JS que almacena todos los archivos JavaScript que se integren a nuestro proyecto. La carpeta FONTS, se añade a partir de la versión 3, y esta contiene un tipo de fuentes que permiten añadir a los diseños iconos gráficos que permiten mejorar la vista final de la página.



Fig. 6 Estructura de carpetas que integra Bootstrap.

### C. Aplicando Bootstrap

La integración de Bootstrap a un proyecto web es muy simple solo basta con seguir lo siguiente:

- 1) *Descarga*: Página oficial de Bootstrap.
- 2) *Integración*: Incluir en el proyecto las tres carpetas que vienen por default.
- 3) *Inicio*: Crear un archivo llamado index para la estructura de la página web. Fig 7.

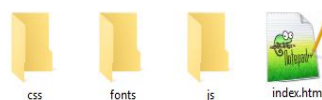


Fig. 7 Archivo Index.html creado.

- 4) *Link*: En el archivo de texto crear la estructura principal y añadir la inclusión de hoja de estilo que contiene las reglas predefinidas y el meta para definir la resolución, como se muestra:

```
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1, maximum-scale=1, user-scalable=no">
```

```
<link rel="stylesheet" type="text/css" href="css/bootstrap/bootstrap.min.css" />
```

- 5) *Responsive*: Agregar el contenido a mostrar de forma adaptativa y visualizarlo en el navegador. Fig. 8.



Fig. 8 Resultado visualizado en el navegador web.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó la actualización del sistema desarrollado para la plataforma del CONAMTI® 2014 la cual se encontraba desarrollada bajo un diseño clásico basado únicamente con HTML y CSS. Fig. 9.



Fig. 9 Pantalla de inicio CONAMTI 2014.

Al redimensionar la pantalla del navegador simulando que este sea visualizado en algún dispositivo con un tamaño de pantalla distinto al navegador. Fig. 10. Como se puede observar el contenido se mantiene estático sin ningún cambio, por lo que ya no es visible todo el contenido.



Fig. 10 Pantalla inicio CONAMTI 2015 redimensionada.

Trabajando realizado la adecuación del sitio utilizando Bootstrap, se observa la mejora inmediatamente sin haber invertido mucho tiempo en la parte del diseño. Fig. 11.



Fig. 11 Tamaño de pantalla de diferentes dispositivos.

Aplicando el diseño responsive, en diferentes módulos del sistema se observa como Bootstrap se encarga de realizar el acomodo del contenido de forma dinámica, ajustándolo a la nueva resolución de pantalla. Fig. 12.



Fig. 12 (Arriba) Pantalla con texto como contenido y (Abajo) Redimensionamiento del navegador.

Como se visualiza el contenido de la página es ajustado de manera dinámica y en todo momento el texto puede ser leído sin problemas, además se puede observar que el menú correspondiente se pliega para una mejor visualización y despliegue del mismo aun en esta resolución. Fig. 13.



Fig. 13 Menú desplegado en resolución de un Smartphone.

Otra de las aplicaciones que se le dio a la herramienta Bootstrap fue la mejora del Sistema Estimulo al Desempeño Docente de los Institutos tecnológicos Descentralizados 2014. Fig. 14. A la versión actual 2015. Fig. 15.



Fig. 14 Pantalla de inicio SEDD 2014.



Fig. 15 Pantalla de inicio SEDD 2015.

Como se puede observar realizando las mismas pruebas en el módulo de registro los campos que lo forman se mantienen fijos. Fig. 16. Ahora bien si observamos la mejora mediante Bootstrap observaremos que la estructura mejora considerablemente, es decir, la distribución del contenido se adapta a los diferentes tamaños de pantalla del navegador o cualquier otro dispositivo. Fig. 17.



Fig. 16 Pruebas redimensionamiento SEDD 2014.



Fig. 17 Pantalla modulo registro bajo Responsive Web Design.

Realizando la prueba de redimensionamiento para simular la pantalla de un dispositivo como un Smartphone, podemos ver que el contenido a pesar de contener diferentes campos, la distribución del acomodo de los campos se realiza de forma dinámica y organizada en función a la pantalla. Fig. 18.



Fig. 18 Pantalla registro con pantalla redimensionada.

#### IV. CONCLUSIONES

Como se mostró en los resultados obtenidos, Bootstrap es una herramienta que añade gran cantidad de opciones funcionales y estas permiten mejorar notablemente un sitio o aplicación web, utilizarla es bastante simple gracias a la estructura en la que está desarrollada, y esto ayuda a la integración de cualquier proyecto de este tipo, además no se necesita tener experiencia con esta nueva forma de desarrollar responsivamente.

Como ya se ha mencionado, muchas de las ventajas que nos brinda Bootstrap son: no necesitamos adquirir licencia alguna para utilizarlo, ya que es software libre, por lo que también lo podemos configurar a nuestras necesidades (esto solo para usuarios con un poco más de experiencia), es muy fácil de implementar en el desarrollo front-end en aplicaciones o sitios web ya que solo es necesario contar con el framework correspondiente para que nuestro documento web tome las reglas css ya definidas por bootstrap.

#### REFERENCIAS

- [1] (2015) Wikipedia [Online]. Recuperado el 04 de Agosto de 2015: <https://es.wikipedia.org>
- [2] Cotchan, David, *Twitter Bootstrap Web Development How-To*, 1st ed., Ed. [PACKT] Publishing, UK, 2012.
- [3] H. Erick, E., Carlos A., and Guillen, Ricardo F., "Aplicación Web para el Control de Citas Bajo Herramientas y Librerías Open Source" *CONGRESO NACIONAL DE MECATRÓNICA, TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN, ENERGÍAS RENOVABLES E INNOVACIÓN AGRÍCOLA.*, vol. 1, pp. 80–83, Nov. 2014.
- [4] (2015) W3C [Online]. Recuperado el 04 de Agosto de 2015: <http://www.w3c.es/Divulgacion/GuiasBreves/HojasEstilo>.
- [5] (2015) Bootstrap [Online]. Recuperado el 04 de Agosto de 2015: <http://www.getbootstrap.com>.