

**2021**

# **SIMPOSIO IBEROAMERICANO MULTIDISCIPLINARIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS**

Artículos en Extenso,  
Revista Digital Arbitrada.

  simciupp  
[www.upp.edu.mx/simci](http://www.upp.edu.mx/simci)

ISSN 2007 • 7394





**SIMPOSIO IBEROAMERICANO  
MULTIDISCIPLINARIO DE  
CIENCIAS E INGENIERÍAS**

**30 DE SEPTIEMBRE 2021**

**SIMPOSIO IBEROAMERICANO MULTIDISCIPLINARIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS.-** Año 9, No. 9. SEPTIEMBRE 2021. Es una publicación anual, editada por la Universidad Politécnica de Pachuca, Carretera Pachuca-Cd. Sahagún Km. 20 Ex Hacienda de Santa Bárbara, Municipio de Zempoala, estado de Hidalgo, CP. 43830, Tel: 01-771-5477510, [www.upp.edu.mx](http://www.upp.edu.mx), [marcovera@upp.edu.mx](mailto:marcovera@upp.edu.mx)

Editor responsable UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE PACHUCA, Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2013-102511083900-203 e ISSN 2594-1097. Ambos otorgados por el INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR. Responsable de la última actualización de este número DR. FRANCISCO RAFAEL TREJO MACOTELA, Dirección de Investigación, Innovación y Posgrado de la Universidad Politécnica de Pachuca, Carretera Pachuca-Cd. Sahagún Km. 20 Ex Hacienda de Santa Bárbara, Municipio de Zempoala estado de Hidalgo, CP. 43830, Tel 01-771-5477510. Fecha de última modificación 30 de septiembre de 2021. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Politécnica de Pachuca.

## **Directorio**

### **Directiva**

**LIC. ATILANO RODOLFO RODRÍGUEZ PÉREZ**

Secretario de Educación Pública de Hidalgo

**ING. JUAN BENITO RAMÍREZ ROMERO**

Subsecretario de Educación Superior y Media Superior

**DR. MARCO ANTONIO FLORES GONZÁLEZ**

Rector de la Universidad Politécnica de Pachuca

### **Editor**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE PACHUCA**

### **Comité Editorial**

**DR. FRANCISCO RAFAEL TREJO MACOTELA**

Responsable de la edición

[trejo\\_macotela@upp.edu.mx](mailto:trejo_macotela@upp.edu.mx)

### **Diseñadores**

**LIC. CARLOS CADENA VIZCAYA**

[ccadena@upp.edu.mx](mailto:ccadena@upp.edu.mx)

**LIC. DAVID PEÑA MENDOZA**

[davidpm@upp.edu.mx](mailto:davidpm@upp.edu.mx)

### **Compilador**

**MTRO. MARCO ANTONIO VERA JIMÉNEZ**

[averamarco@prodigy.net.mx](mailto:averamarco@prodigy.net.mx)

## **Comité Organizador**

**Dr. Francisco Rafael Trejo Macotela**

Presidente del Comité Organizador

**Dr. Alejandro Téllez Jurado**

Coordinador del área de Ciencias Biológicas y de la Salud

**Dr. Juan Benito Pascual Francisco**

Coordinador del área de Ciencias de la Ingeniería

**Dr. Daniel Robles Camarillo**

Coordinador del área de Ciencias Computacionales, Comunicaciones y Finanzas

**Dra. Reyna del Carmen Martínez Rodríguez**

Coordinadora del área de Ciencias de la Educación

## **Comité de Árbitros**

Dra. ODP

Dra. GCGF

Dra. RCMG

Dra. LBC

Dra. RMCA

Dra. SKCM

Dra. YMF

Dr. JGBM

Dr. ESA

Dr. JCRC

Dr. VEM

Dr. JBPF

Dr. ATJ

Dr. MAAR

Mtra. MRT

Mtra. AOM

Mtra. LSO

Mtra. VVC

Mtro. JHP

Mtro. MTVA

Mtro. LAZC

*Universidad Politécnica de Pachuca, México.*

Dr. AIMP

Dr. EEVC

*Tecnológico Nacional de México, México.*

Dra. ICC

Dr. RVM

Dr. GSP

Dr. JSA

Dr. LNRO

Dr. EEH

Dr. AAJ

*Instituto Politécnico Nacional, México.*

Mtra. OVCJ

*Escuela Normal Superior Pública del Estado de Hidalgo, México.*

Dra. KMCM

Dr. AAA

Mtra. LMRJ

Mtra. RERV

Mtro. AGDSV

Mtro. HRMB

*Universidad de Guadalajara, México.*

Dra. MGAV

*Sistema Educativo Estatal Regular, San Luis Potosí, México.*

Dra. LNRR

*Escuela de Pedagogía, Aguascalientes, México.*

Dra. VWTP

*Universidad Bernardo O'Higgins, Santiago de Chile.*

Dra. TPBS

*Universidad Autónoma de Nuevo León, México.*

## Presentación

El Simposio Iberoamericano Multidisciplinario de Ciencias e Ingenierías (SIMCI) es un evento bianual organizado por la Universidad Politécnica de Pachuca y anual para la edición de su revista digital arbitrada. En esta novena edición del SIMCI, se incluye la presente revista digital que incluye los artículos científicos y tecnológicos en extenso. Para la edición de los trabajos en extenso se abrió una convocatoria nacional e internacional para el envío y posterior recepción y revisión de artículos de corte científico y tecnológico. Estos trabajos fueron revisados por investigadores nacionales e internacionales de reconocido prestigio haciendo énfasis en cuatro ejes temáticos: Ciencias Biológicas y de la Salud; Ciencias Computacionales, Comunicaciones y Finanzas; Ciencias de la Ingeniería; y Ciencias de la Educación. En este documento final se presentan los trabajos que fueron revisados y aceptados para ser publicados en la presente REVISTA DIGITAL ARBITRADA SIMPOSIO IBEROAMERICANO MULTIDISCIPLINARIO DE CIENCIAS E INGENIERIAS.

La presente edición de la revista digital de SIMCI, en la primera sección se presenta el artículo Producción de Vinos de Altura en el Estado de Hidalgo, México. Un Potencial Derivado del Cambio Climático, por A. Ahumada-Medina, R. M. Chio-Austria, con adscripción en la Universidad Politécnica de Pachuca, Hidalgo, México; en la segunda sección se presenta el artículo Prueba ensayo depurativa de un agua residual industrial con un biorreactor anaerobio, por Ubaldo Baños Rodríguez, Zaira N. Miranda Terán, Ana L. Ramos Camargo Lidia Ortiz López, con adscripción en la Universidad Politécnica de Pachuca, Hidalgo, México y Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Embotelladora “Las Margaritas”, Hidalgo, México; en la tercera sección se presenta el artículo Sistema electrónico para monitoreo de la demanda y corrección del factor de potencia para servicio eléctrico residencial, por R. Arrieta-Pérez, C. Fragoso-Cruz, A. Meneses-Figueroa, D. Robles-Camarillo, con adscripción en la Universidad Politécnica de Pachuca, Hidalgo, México; en la cuarta sección se presenta el artículo Desarrollo de un sistema mecánico para rehabilitación de extremidad inferior, por M. A. Alamilla-Daniel, A. R. Licona-Rodríguez, J. G. Benítez-Morales, J. Hernández-Pérez, con adscripción en la Universidad Politécnica de Pachuca, Hidalgo, México; en la quinta sección se presenta el artículo Un sistema subactuado con una interfaz de control de bajo costo para la educación de la ingeniería, por H. A. Barrón-Pérez, F. J. Torres-Del Carmen, J. P. Ramírez-Paredes, M. S. Arredondo-Martínez, con adscripción en la Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México; en la sexta sección se presenta el artículo Analysis of the vibratory response for a rotor-hybrid short

journal bearing system with orbital movement pivoted with rigid shaft, por D. E. Rivera-Arreola, T. Hernández-Cortés, H. F. Abundis-Fong, con adscripción en la Universidad Politécnica de Pachuca, Hidalgo, México y el Tecnológico Nacional de México/I.T. Pachuca, Hidalgo, México; en la séptima sección se presenta el artículo Algoritmo para la corrección de medición en posición mediante un acelerómetro para tractores autónomos agrícolas, por G. Hernández-Romero, J. Ramos-Fernandez, V. Lopez-Morales, con adscripción en la Universidad Politécnica de Pachuca, Hidalgo, México y la UAEH-ICBI, Hidalgo, México.

# Contenido

Artículo	Página
<b>EJE TEMÁTICO: CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD (CBS)</b>	
Producción de Vinos de Altura en el Estado de Hidalgo, México. Un Potencial Derivado del Cambio Climático	1-7
Prueba ensayo depurativa de un agua residual industrial con un biorreactor anaerobio	8-12
<b>EJE TEMÁTICO: CIENCIAS COMPUTACIONALES, COMUNICACIONES Y FINANZAS (CCCF)</b>	
Sistema electrónico para monitoreo de la demanda y corrección del factor de potencia para servicio eléctrico residencial	13-20
<b>EJE TEMÁTICO: CIENCIAS DE LA INGENIERÍA (CI)</b>	
Desarrollo de un sistema mecánico para rehabilitación de extremidad inferior	21-30
Un sistema subactuado con una interfaz de control de bajo costo para la educación de la ingeniería	31-38
Analysis of the vibratory response for a rotor-hybrid short journal bearing system with orbital movement pivoted with rigid shaft	39-48
Algoritmo para la corrección de medición en posición mediante un acelerómetro para tractores autónomos agrícolas	49-54
<i>Formato para los Artículos del Simposio Iberoamericano Multidisciplinario de Ciencias e Ingenierías 2021</i>	

# Producción de Vinos de Altura en el Estado de Hidalgo, México. Un Potencial Derivado del Cambio Climático

A. Ahumada-Medina<sup>1</sup>, R. M. Chio-Austria<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dirección de Investigación Innovación y Desarrollo Tecnológico/Tecnologías Intermedias. Universidad Politécnica de Pachuca. Carretera Pachuca-Cd. Sahagún, Km 20. Rancho Luna. Ex hacienda de Santa Bárbara. Zempoala, Hidalgo. México. C. P. 43830. Tel. 771547 7510 ext. 2238, e-mail: ahumadadam@upp.edu.mx

<sup>2</sup>Licenciatura en Terapia Física. Universidad Politécnica de Pachuca. Carretera Pachuca-Cd. Sahagún, Km 20. Rancho Luna. Ex hacienda de Santa Bárbara. Zempoala, Hidalgo. México. C. P. 43830.

Recibido: Agosto 31, 2021; Aceptado: Septiembre 22, 2020.

## Resumen (ÁREA TEMÁTICA: CBS)

El cultivo de *Vitis vinifera*, está sujeto a que sus diferentes variedades se adapten a los diferentes factores del clima y sus suelos para determinar que clases de productos son capaces de generar. En las últimas décadas el cambio climático mundial ha venido a transformar la vitivinicultura en los países tradicionalmente dedicados a ello, después que la actividad se localizó en regiones menores a 600 metros sobre el nivel del mar (msnm); ahora se empiezan a explorar en niveles superiores, buscando climas con temperaturas templadas por altura.

En el presente trabajo, se tratará de demostrar los potenciales favorables para la viticultura de altura en los Valles Altos de Hidalgo, mediante la aplicación de índices bioclimáticos que permitan deducir la influencia del clima para la planeación vitivinícola, al combinar las aptitudes de los climas con las necesidades de algunas variedades.

**Palabras clave:** Vinos de altura; índices bioclimáticos, viticultura.

## Abstract (AREA: CBS)

The cultivation of *Vitis vinifera* is subject to its different varieties adapting to the different factors of the climate and its soils to determine what kinds of products they are capable of generating. In recent decades, global climate change has come to transform viticulture in countries traditionally dedicated to it, after the activity was located in regions less than 600 meters above sea level; now they are beginning to be explored at higher levels, looking for climates with temperate temperatures due to altitude.

In the present work, we will try to demonstrate the favorable potentials for high altitude viticulture in the High Valleys of Hidalgo, by applying bioclimatic indices that allow deducing the influence of the climate for wine planning, by combining the aptitudes of the climates with the needs of some varieties.

**Key words:** High altitude wines; viticulture, bioclimatic indices.

## INTRODUCCIÓN

Una cualidad interesante de *Vitis vinifera* es que sus variedades son sensibles a los factores climáticos y edáficos, que actúan como promotores de las diferentes cualidades que conforman a un vino. En las últimas décadas el cambio climático mundial, ha venido a transformar la vitivinicultura en los países tradicionalmente dedicados a ello. Es el caso de algunos lugares donde el cultivo con sus variedades tradicionales y sus productos provienen de tradiciones centenarias y que ahora están incrementos en sus temperaturas, y

cambios en los regímenes de precipitaciones. Esta condición afecta entre otros lugares del mundo al continente europeo.

En contraste, regiones que dejaron de ser productivas, quizás entre otros factores, por la pequeña glaciación ocurrida a finales de la edad media en la producción de vid, como es el sur de la Gran Bretaña, vuelven ahora a ser atractivas debido a cambios de temperaturas favorables que ahora están ocurriendo. Otra novedad ocurre en las últimas décadas, después que la viticultura se localizó casi siempre en regiones menores a 600 metros sobre el nivel del mar

(msnm), se empiezan a explorar en niveles superiores, buscando climas de temperaturas templadas por altura.

Actualmente empiezan a destacar en la producción de vinos de altura, Tarija, en Bolivia; Valles de Calchaquíes, en Argentina; Valle de Leyva, Colombia entre otros. En México, aunque el término vinos de altura, es relativamente reciente, estos se han venido produciendo desde la época de la colonización del norte de México; pero este fenómeno, ha tomado impulso en las últimas décadas en estados como Chihuahua, Coahuila, Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro y Puebla, bajo la interesante combinación pequeñas producciones enológicas, gastronomía y comercialización directa.

Cuando los cultivos de vid se llevan a mayores alturas o montañas en latitudes tropicales y templadas la intensidad de la luz se incrementa por el menor grosor de la atmósfera en un ambiente fresco derivado de la menor densidad del aire, permitiendo que los procesos fotosintéticos sean más eficientes, lográndose un mejor desempeño en variedades poco productivas, pero consideradas de más alta calidad enológica que en niveles cercanos a las costas. En estos ambientes de altura, cuando la vid cumple en los meses invernales con su reposo, y durante su periodo activo se somete a oscilaciones diarias de temperaturas entre el día y la noche, permite que los azúcares formados durante día no se consuman por la noche, derivado de la actividad nocturna mínima por la noche. Otro factor, observado por viticultores y corroborado por investigaciones, es que sus vinos se benefician por la altitud al ser sujetos a exposiciones más intensas de radiaciones solares del espectro visible y ultravioleta, promoviéndose en su hollejo una mayor protección que favorece la formación de fenoles que a su vez durante los procesos enológicos permiten un mejor color y aromas de los vinos.

En el presente trabajo, se tratará de demostrar los potenciales favorables para la viticultura de

altura en territorio hidalguense, mediante la aplicación de índices bioclimáticos que permitan deducir la influencia del clima para la planeación vitivinícola, al combinar las aptitudes de los climas con las necesidades de algunas variedades de *V. vinifera*. Para tratar de reconocer las aptitudes de las regiones templadas del Estado, se aplicarán los siguientes índices bioclimáticos: 1) Temperaturas Efectivas de Winkler (1938); 2) Coeficiente Heliotérmico de Branas y Levadoux (1978); y 3) Coeficiente Hidrotérmico de Zuluaga (1971).

## MÉTODO

Se aplican métodos bioclimáticos desarrollados para los cultivos vitícolas en los Valles Altos del Estado de Hidalgo localizados por arriba de 2,000 msnm para tratar de determinar sus posibles vocaciones vitícolas que luego puedan permitir el experimentar y derivado de esto planear desarrollos vitivinícolas.

Temperaturas eficaces. En California, Estados Unidos, estudios realizados por Winkler, A. y M. Amerine (1938), propusieron que en la vid no se observan manifestaciones vegetativas por debajo de temperaturas medias inferiores a 10 °C, por tal motivo, solo tomaron en cuenta aquellas que llegaran a acumularse durante el ciclo vegetativo por arriba de 10 °C, a las que se denominaron "**temperatura eficaces (Te)**". Las temperaturas activas son aquellas (Ta) menores a 10 °C,

$$Te = Ta - 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La aplicación del concepto de temperaturas eficaces es viable para alturas superiores 2,000 msnm en el sureste del estado de Hidalgo debido a que es posible lograr ciclos anuales con temperaturas medias mensuales por arriba de 10 °C (T °C) de marzo a octubre con un reposo invernal limitado entre noviembre y febrero. A partir de los resultados obtenidos de la aplicación de este índice, es posible determinar el tipo de variedades de vid pueden experimentarse y el tipo de productos probables.

Para California, Winkler propone cinco regiones climáticas para la vid, basándose en las temperaturas eficaces. I. Menos de 1,371.8 °C-días; II. 1,371.8 a 1,649 °C-días; III. 1,649.6 a 1,926.8 °C-días; IV. 1,926.8 a 2,204 °C y V. 2,204 o más °C.

**Coeficiente Heliotérmico.** Este concepto lo establecieron Branas, Bernon y Levadoux, (1946) proponen el concepto de "temperatura media verdadera", que se obtiene de la diferencia acumulada durante el ciclo vegetativo entre las temperaturas medias diarias y el T<sub>0</sub>, excluyendo los días con temperaturas inferiores a 10°. Afirman estos autores que el calor (temperatura del aire) y el tiempo (suma de temperaturas) no juegan por sí solos como factores de crecimiento, por lo que debe darse importancia a la duración del día. Con base a estas consideraciones, establece un índice denominado **Producto Helio térmico" (XH).**

$$XH = XH \cdot 10^{-6}$$

En la fórmula anterior X es igual a la suma de temperaturas medias verdaderas y H a la suma de horas sol (intervalo entre la salida y puesta del sol). El empleo del Producto Heliotérmico se ha generalizado internacionalmente al introducir una variable astronómica de indudable efecto fisiológico (fotofase), que influye notablemente en la calidad de los vinos (Ribereau-Gayon, 1972).

Los valores establecidos por los autores originalmente consideran valores mínimos debido a que fueron considerados particularmente para Europa en donde hasta hace poco tiempo, existía desde hace algunos siglos, un límite septentrional para el cultivo de la vid establecido por las bajas temperaturas e insolación. El valor mínimo para XH 10<sup>-6</sup> es de 2 a 2.94. En contraste para determinar los límites máximos que no son posibles en regiones templadas, se determinó como resultado de una serie de observaciones de viñedos localizados en inmediaciones de latitudes tropicales que si este valor sobrepasaba el valor de 9, la fisiología

del viñedo se modificaba no permitiendo que las plantas entraran en reposo invernal y sus yemas mostraban desajustes que no permitían que la productividad del viñedo se manifestara en cuanto a la cantidad de la cosecha y su calidad (Zuluaga, 1974).

Siendo los Valles Alto del sureste de Hidalgo una de las regiones de con temperaturas más templadas del centro del territorio nacional, es posible la aplicación del Coeficiente Heliotérmico para determinar el posible cultivo de viñedos de variedades con capacidad para producir vinos de calidad.

**Índice Hidrotérmico (P).** Fue propuesto por Branas y colaboradores en 1946, en él se relaciona la frecuencia de lluvias con temperaturas medias mensuales, determinando las posibilidades de ataque de *Plasmopara vitícola* (mildiu); para ello se calcula primero el valor de p que resulta de la multiplicación de la temperatura media mensual en grados centígrados por la cantidad de lluvias mensuales expresadas en milímetros para luego obtener el valor de P que se obtiene de la suma de los meses con periodos favorables.

p = Temperatura media mensual multiplicada por los milímetros de lluvia mensual.

P = suma de los valores de p de abril a agosto

El índice Hidrotérmico que resulta adecuado para Europa, ya que es indicativo de ataques de *Peronospora* cuando su valor supera los 5,000 puntos. Un grupo de investigadores argentinos observaron que (Zuluaga y colaboradores, 1971) en latitudes más bajas que las templadas se pueden tener valores por arriba de 5,000 y los ataques de esta criptogámica no son extremos, por ello propone un nuevo parámetro para medir la posibilidad de ataques criptogámicos en latitudes más bajas.

**Coeficiente Hidrotérmico (CH).** Este coeficiente fue desarrollado por los autores argentinos en función de la inoperancia observada para P en

regiones con temperaturas más altas y sobre todo con períodos favorables más largos para la vid que los observados en los países europeos. Los valores propuestos se consideran aproximados:

$$CH = \frac{P}{\text{Duración del período favorable en días}}$$

Mediante el uso del coeficiente hidrotérmico se estimó que el valor equivalente a P es igual a 5000. Este valor de CH equivale a 30. Las delimitaciones regionales de las aptitudes vitícolas en relación con la humedad y temperatura como susceptibles al ataque de hongos se han propuesto de la siguiente forma:

Valor de CH	Menos de 30	Zona apta
"	30 a 40	Zona marginal
"	Más de 40	Zona limitada

Zona vitícola apta: muestra pocas localidades con meses críticos. No significa que esté libre de enfermedades criptogámicas ya que la variación estacional de las lluvias puede provocar ataques ocasionales fácilmente controlables

Zona vitícola marginal se encuentra con valores de se ha entre 30 y 40. El Control de enfermedades producidas porcriptogámicas requiere de repetidas pulverizaciones, disminuyendo la calidad y cantidad de la producción. Las posibilidades económicas del cultivo de la vid sólo serían factibles mediante el uso de híbridos directos.

Zona vitícola limitada: cuando el valor de CH es superior a 40, el cultivo de *V. vinifera* se observa prácticamente limitado y sólo es posible el uso de otras especies de vid como productoras directas.

## RESULTADOS

Se investigaron diez localidades del sureste del estado de Hidalgo localizadas entre 2,110 y 2,611 msnm en donde se observan climas templado semiseco y templado subhúmedo.

Como resultados de la aplicación de los índices bioclimáticos se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas, localización, altura sobre el nivel del mar y clima de cada una de ellas

Estación Meteorológica	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altura SNM	Clima
Presa Tezoyo	19°51'15"	98°18'30"	2,611	Templado Subhúmedo
Cuatepec. El Aserradero	19°57'14"	98°19'33"	2,610	Templado Subhúmedo
Tepeapulco. S. Jerónimo	19°48'55"	98°29'03"	2,535	Templado Subhúmedo
Apan	19°42'26"	98°26'57"	2,496	Templado subhúmedo
Zempoala.S.P. Tlalquipan	19°56'39"	98°45'14"	2,490	Templado Semiseco
Pachuca	20°05'15"	98°44'59"	2,368	Templado Semiseco
Tulancingo, La Esperanza	20°03'22"	98°20'04"	2,218	Templado Semiseco
Tulancingo.S.M. Asunción	20°09'17"	98°16'26"	2,190	Templado semiseco
Acatlán. Alcholoya	20°13'38"	98°26'55"	2,132	Templado semiseco
Huasca	20°13'10"	98°34'43"	2,110	Templado Subhúmedo

Región A. Almoloya, Presa Tesoyo; Cuautepetec, El Aserradero; Tepeapulco; Apan. Comprende las partes más elevadas del sureste del estado, colindando con los estados de Tlaxcala y Puebla, aquí, las temperaturas eficaces de marzo a octubre ( $X_{m-o}$ ), se puede observar que van de 732 a 1,1146 °C (Tabla 2), lo que permite clasificarlas de acuerdo con Winkler, como regiones I, es decir que son potencialmente aptas para la producción de vid de vigor débil o moderado, propios para la vinificación de vinos secos de calidad. Cabe mencionarse que estas características son difíciles de localizar en el centro de la república mexicana. Estos terrenos pueden ser apropiados para los cultivos frutícolas en general mediante una adecuada

tecnicificación debido a que están expuestos a climas extremos de montaña. Una de las mejores características que puede mencionarse, es que, a pesar de su localización tropical, es posible detectar que los meses invernales indican temperaturas medias por debajo de 10 °C ( $T^{\circ} C$ ), factor de importancia que permite considerar un favorable descanso invernal de los frutales que repercute en un adecuado reposo de las plantas con los consecuentes efectos en la calidad de frutos y fisiología de las plantaciones. Los resultados del coeficiente heliotérmico ( $XH$ ), es también razonablemente acorde con regiones de buena calidad vitivinícola (Tabla 2).

Tabla 2. Hidalgo. Temperaturas eficaces ( $X$ ), marzo-octubre; Regionalización Winkler ( $W$ ), marzo-octubre; Coeficiente Heliotérmico, marzo-octubre ( $XH_{m-o}$ ); Temperaturas Eficaces ( $X_{e-d}$ ) enero-diciembre y Coeficiente Heliotérmico, enero-diciembre ( $XH_{e-d}$ ).

Estación Meteorológica	Altura SNM	TMA	$X_{m-o}$	$W_{m-o}$	$XH_{m-o}$	$X_{e-d}$	$XH_{e-d}$
Presa Tezoyo	2,611	11.9	732	I	2.2		
Cuautepetec. El Aserradero	2,610	12.6	854	I	2.6		
Tepeapulco. S. Jerónimo	2,535	12.8	1,000	I	3.0		
Apan	2,496	14.1	1,146	I	3.5		
Zempoala.S.P. Tlalquipan	2,490	15.3	1,586	II	4.8	1,934	8.4
Pachuca	2,368	14.2	1,293	II	3.9	1,533	6.7
Tulancingo, La Esperanza	2,218	15.3	1,537	II	4.7	1,934	8.4
Tulancingo.S.M. Asunción	2,190	14.7	1,342	II	4.1	1,715	7.5
Acatlán. Alcholoya	2,132	15.3	1,512	II	4.6	1,934	8.4
Huasca	2,110	15.2	1,537	II	4.7	1,898	8.3

#### Reposo invernal

#### Reposo invernal limitado por exceso de $XH$ (e-d)

Región B. Zempoala, San Pedro Tlalquipan; Pachuca; Tulancingo, Presa la Esperanza y Santa María Asunción; Acatlán, Alcholoya y Huasca. Comprende temperaturas eficaces de marzo a octubre ( $X_{m-o}$ ) de 1,586 a 1537 °C, que las integra dentro los criterios de Winkler como regiones II, propias para viñedos de vigor mediano, productores de vid enológicamente propicias para buenos vinos blancos y de color. En semejanza con la región A, estas condiciones climáticas son difíciles de localizar en México. Son localidades expuestas a heladas que se

manifiestan de septiembre a octubre, por lo que deben siempre protegerse en contra de estos fenómenos. El índice heliotérmico también es favorable al mantenerse por debajo de 9 que es el límite de un exceso de exposiciones a las horas luz combinadas con la temperatura.

A diferencia de la región A, los resultados indican que si bien las temperaturas eficaces y exposición solar no son excedidos de marzo a octubre, de enero a diciembre indican que las medias mensuales por abajo de 10° C, no

ocurren, situación que indica que los viñedos no alcanzan un completo reposo invernal y sus consecuencias fisiológicas, aunque no graves, con los años afectaran la evolución del plantío.

Tabla 3. Resultados de la Aplicación del Coeficiente Hidrotérmico.

Estación Meteorológica	Precipitación anual	P	CH
Presa Tezoyo	657	8,019	32
Cuauhtepetl. El Aserradero	755	9,401	38
Tepeapulco. S. Jerónimo	655	8,658	35
Apan	618	8,027	32
Zempoala.S.P. Tlalquipan	574	8,655	35
Pachuca	412	5,789	23
Tulancingo, La Esperanza	550	8,193	33
Tulancingo.S.M. Asunción	621	8,615	35
Acatlán. Alcholoya	521	7,811	32
Huasca	799	12,141	49

Todas las localidades se observan con CH superior a 30, lo que indica que se deben de tomar precauciones durante los meses de mayor precipitación pluvial.

Para el Coeficiente Hidrotérmico (Tabla 3), se observa que las lluvias de verano si representan ciertos problemas para mantener alejados los problemas de ataques de enfermedades criptogámicas al encontrarse todas las localidades marginales al superarse todas ellas con valores superiores a 30, lo que obligará al uso de fungicidas para el control de enfermedades. Huasca, por su parte es la localidad con mayores probabilidades de ser atacada por mildium (*Peronospora viticola*) al mostrar un valor de 49, un valor alto que la limitará al manejo de variedades americanas o híbridos productores directo.

## CONCLUSIONES

El cambio climático afecta al planeta en forma variable, en el caso de la industria vitivinícola ya se observan las consecuencias a través del calentamiento de regiones que durante siglos han sido aptas para producciones vitivinícolas de alta calidad.

La viticultura de altura, así como su variante, la de montaña, están promoviendo que áreas del mundo que fueron ignoradas en esta lucrativa

actividad, estén siendo ahora exploradas con cierto éxito. En México, este tipo de agroindustrias se ha venido explotando desde hace algunos siglos en estados del altiplano en el centro norte y norte del país. Para el estado de Hidalgo, aun cuando se ha experimentado aisladamente, los resultados no han sido del todo satisfactorios al no usarse las variedades o especies de vid con mejores potenciales para sus climas.

Los resultados de la aplicación de índices bioclimáticos aquí reportados, indican que es posible intentar cultivos con variedades apropiadas en los Valles Altos del Estado, considerando que, en su mayor proporción, los viñedos cumplirán con su ciclo anual en forma adecuada sobre todo en las localidades de mayor altura. Los requerimientos más indispensables para intentar este cultivo será la disponibilidad de ciertos volúmenes de agua para riego tecnificado durante la primavera, además de la capacidad para adoptarse tecnologías apropiadas para prevenir las heladas muy tempranas o demasiado tardías.

Es importante observar como entidades cercanas, como Puebla, Querétaro, Guanajuato, están experimentando con éxito las actividades vitivinícolas asociadas con su gastronomía, mientras que el estado de Hidalgo que cuenta con uno de los factores más importantes para la vid, su necesidad de frío invernal, para cumplir adecuadamente con su ciclo anual, lo que le permitiría una buena adaptación fisiológica del viñedo y probablemente buenos productos tecnológicos.

## AGRADECIMIENTOS

Universidad Politécnica de Pachuca.  
Universidad Nacional Autónoma de México.  
Financiamiento.  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.  
Financiamiento.  
Dr. Marco Antonio Flores González. Rector de la  
UPP.  
Dr. Francisco Rafael Trejo Macotela. DIIP. UPP.

## REFERENCIAS

- Alcaraz, F. (2013) Creative Commons. Stanford, California.
- Branas , J. Bernon, G., Levadoux, L. (1946). Eléments de Viticulture Générale. Montpellier, Francia.
- Branas, J. , (1978). Les relations entre la vigne et le système. Constanza, Rumania.
- Conceição, M. et al.( 2018) Índices hídricos climáticos para a viticultura. Pesquisa Agropecuária. v.53 No. 6.
- Del Barrio, R. et al. (2016). Aspectos bio y agroclimáticos del cultivo de vid para vinificar en el Valle Inferior del Río Negro RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias, vol. 42, núm. 3, pp. 283- 290 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Buenos Aires, Argentina
- Constantinescu, G. H. et.al.(1945): Determination de la valeur de l' indice bioclimatique de la vigne pour les principaux vignobles de la République Socialiste Roumaine. Revue Roumaine de Biologie, Série Botanique; Bucarest , (9) núm. 1. Bucarest.
- Fernández, F. (1997). Bioclimatología. McGraw-Hill. Madrid, pp; 607-682.
- García, E. (1973). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía. U.N.A.M. México.
- Gallina, M. et al. (2016) Índices bioclimáticos para la vid en Clmte. Guerrico, Río Negro Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle. Boletín de Divulgación Técnica Nº 51
- Hidalgo, L. (1980). Caracterización Macrofísica del Ecosistema Medio-Planta en los Viñedos Españoles. I. N. I. A. Serie: Producción Vegetal, núm. 29. Madrid.
- Hidalgo, L. (2002). Tratado de Viticultura. Ed. Mundiprensa.
- Normales Climatológicas por Estado. (2021).Servicio Meteorológico Nacional. Internet.
- O. I. V. (2019) Aspectos de la coyuntura mundial. Situación del sector en 2018
- Pinto, M. et al. (2008). Fisiología de la latencia de las yemas de vid : hipótesis actuales. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Casilla1004, Santiago, Chile
- Reglamento (CEE) nº 1442/88 del Consejo de 24 de mayo de 1988 sobre la concesión, para las campañas vitivinícolas de 1988/89 a 1995/96, de primas por abandono definitivo de superficies vitícolas.
- Wagner, P., (1938). Thre effect of climatic regions. Wine Review, 6: 14-16, 32.
- Winkler, A. (1980). Viticultura. CECSA. México.
- Zuluaga, P. et al. (1971). Ecología de la vid en la República Argentina. Univ. Nac. del Cuyo. Fac. de Ciencias Agrarias. Boletín de especial. Instituto de Viticultura. 149 pp. Mendoza, República Argentina.

# Prueba ensayo depurativa de un agua residual industrial con un biorreactor anaerobio

Ubaldo Baños Rodríguez<sup>1</sup>, Zaira N. Miranda Terán<sup>1</sup>, Ana L. Ramos Camargo<sup>1</sup>, Lidia Ortiz López<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingeniería en Biotecnología, Universidad Politécnica de Pachuca. Carretera Pachuca – Cd. Sahagún km 20, Ex Hacienda de Santa Bárbara, Zempoala, Hidalgo, México. CP. 43830. Tel. 01 (771) 54 77 510, e-mail: ubaldo@upp.edu.mx.

<sup>2</sup>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Embotelladora “Las Margaritas” – Camino a Pozos-Téllez, km 1.5, Pachuca, Hidalgo, México. CP. 42186. Tel. 01 (771) 7171430.

Recibido: Septiembre 01, 2021; Aceptado: Septiembre 22, 2020.

## Resumen (ÁREA TEMÁTICA: CBS)

La PTAR de la empresa Embotelladora Las Margaritas S.A.P.I. de C.V. cuenta con un tren de tratamiento biológico anaerobio-aerobio de lodos activados. Se realizó una prueba de biodegradación anaerobia instalando en el laboratorio un biorreactor anaerobio ensayo de 5 L de operación emulando el reactor industrial (capacidad: 587 m<sup>3</sup>) utilizando como sustrato agua residual de la empresa refresquera y como biomasa lodos activados anaerobios adquiridos del reactor de flujo ascendente anaerobio (RAFA) de la PTAR. La eficiencia depurativa se evaluó con la determinación de los parámetros cinéticos: velocidad máxima de crecimiento de biomasa ( $\text{máx}$ ), constante de afinidad por el sustrato ( $K_s$ ), constante de inhibición por el sustrato ( $K_i$ ) y rendimiento biomasa/sustrato ( $Y_{X/S}$ ); mediante el uso de modelos cinéticos tales como: Monod, Contois y Haldane-Andrews, para los modelos de Monod y Contois se realizó una regresión lineal usando Excel (v1.5, 2013) para la determinación de los parámetros:  $\text{máx}$  y  $K_s$ , en tanto que para el modelo de Haldane-Andrews, se utilizó un programa con el método numérico de Runge-Kutta ode45 alterno a un método de mutación de parámetros Hill Climbing con el software Matlab (v8.5, 2015); con el cual mediante simulación correspondiente fue posible determinar los parámetros cinéticos:  $\text{máx}$ ,  $K_s$ ,  $Y_{X/S}$  y  $K_i$ . La biomasa fue estabilizada manteniéndola en condiciones estables de 27 a 30 °C, pH de 8, con ciclos de operación de 48 h; monitoreando el proceso y el funcionamiento del biorreactor. Se realizaron 2 cinéticas microbianas: la cinética 1 inicio con condiciones de  $[X_0 = 470.00 \text{ mg X/L}]$  y  $[S_0 = 573.948 \text{ mg S/L}]$  y la cinética 2 de condiciones:  $[X_0 = 516.000 \text{ mg X/L}]$  y  $[S_0 = 206.514 \text{ mg S/L}]$ , al finalizar el ensayo se concluyó que la cinética 2, reproduce mejor las condiciones del biorreactor industrial al referir los parámetros cinéticos obtenidos y una eficiencia depurativa de carga orgánica del 64%.

Palabras clave: Biodegradabilidad, biorreactor anaerobio, lodo activado.

## Abstract (AREA: CBS)

The PTAR of bottler Las Margaritas S.A.P.I. de C.V. company, has a treatment train anaerobic biologic-aerobic of sludge activated. A test was performed anaerobic biodegradation installing in the lab an anaerobic bioreactor eassy of 5 L operation emulating the industrial reactor (capacity: 587 m<sup>3</sup>) using wastewater as substrate of the refreshment company and as biomass anaerobic activated sludge acquired from the reactor Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), of the PTAR. Purification efficiency was evaluated with the determination of kinetic parameters: maximum biomass growth rate ( $\text{máx}$ ), affinity constant for substrate ( $K_s$ ), inhibition constant by the substrate ( $K_i$ ), and yield biomass/substrate ( $Y_{X/S}$ ); by using kinetic models such as: Monod, Contois and Haldane-Andrews, for the Monod and Contois models, a lineal regression was performed using excel (v1.5, 2013) for the determination of the parameters :  $\text{máx}$  and  $K_s$ , while for the model Haldane-Andrews a program with numerical method of Runge-Kutta ode 45 was used alternate to a parameter mutation method Hill Climbing with the Matlab (v8.5, 2015) software; with which by means of corresponding simulation it was possible to determine the kinetic parameters:  $\text{máx}$ ,  $K_s$ ,  $Y_{X/S}$  y  $K_i$ . Biomass was stabilized keeping it in stable conditions of 27 to 30 °C, pH of 8, with 48 h operation cycles, monitoring the process and operation of the bioreactor. Two microbial kinetics were performed: the first kinetics started with conditions:  $[X_0 = 470.00 \text{ mg X/L}]$  and  $[S_0 = 573.948 \text{ mg S/L}]$ , and the second kinetics started with conditions:  $[X_0 = 516.000 \text{ mg X/L}]$  y  $[S_0 = 206.514 \text{ mg S/L}]$ . At the end of the test it is concluded that the second kinetics, betters reproduces the conditions of the industrial bioreactor by referring to the kinetics parameters obtained and a purifying efficiency of organic load of 64%. Key words: Biodegradability, anaerobic bioreactor, activated sludge.

## INTRODUCCIÓN

La industria refresquera consume un aproximado de 390 millones L H<sub>2</sub>O/año (Ubal. S., 2009). Debido a los procesos en esta industria, el agua se descarga con elevadas concentraciones de contaminantes orgánicos, inorgánicos y biológicos (Cáceres E.V., 2011). Para la remoción de estos contaminantes es utilizado un proceso biológico integrado: un biorreactor anaerobio en el cual los microorganismos inician los procesos de degradación, y posterior un biorreactor aerobio para lograr una mayor remoción de contaminantes. Al utilizar un biorreactor en escala industrial lo relevante de éste es lo eficiente que resulta para el proceso, una manera de evaluar esta eficiencia es con un ensayo en laboratorio. Para la Planta de Tratamiento de aguas Residuales (PTAR) de la empresa Embotelladora Las Margaritas, S.A.P.I. de C.V., es de vital importancia conocer la eficiencia depurativa del biorreactor anaerobio que utilizan en su planta de esta manera se puede evaluar si está en su máxima capacidad para cumplir con el objetivo depurativo del proceso. La biodegradación es la descomposición o la degradación de compuestos orgánicos complejos para formar compuestos más simples; esto realizado por microorganismos, se habla de una biodegradación anaerobia cuando los microorganismos (con una composición mixta) realizan sus procesos ya sea en serie o en paralelo; es decir que trabajan en conjunto y los productos generados por un microorganismo pueden ser utilizados por otro, todos estos procesos realizados son en la ausencia de oxígeno (Huertas, R.A., 2015). En el presente trabajo, se evaluó la operación de un biorreactor industrial anaerobio mediante un ensayo en laboratorio para evaluar su eficiencia depurativa del Agua Residual Industrial (ARI) en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de una empresa refresquera.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En la figura 1, se muestra un reactor de flujo ascendente anaerobio (RAFA) con un volumen de 10L, el cual se mantuvo operando con 5 L de agua residual industrial, como un ensayo de biodegradabilidad anaerobia para evaluar la biodegradación del sustrato y el crecimiento de

la biomasa presente mediante la determinación e interpretación de los parámetros cinéticos:  $\text{máx}$ ,  $K_s$ ,  $Y_{X/S}$  y  $K_i$ . Estos parámetros se determinaron utilizando los modelos cinéticos de: Monod, Contois y Haldane; estos dependen de la concentración y susceptibilidad de biodegradación de sustrato presente en el agua residual industrial.

Para determinar la cinética microbiana que sigue el biorreactor se realizó el modelado y simulación utilizando los tres modelos cinéticos antes mencionados; para así obtener parámetros cinéticos de acuerdo al modelo utilizado.



Fig. 1. Biorreactor Anaerobio RAFA de 5L de operación.

En la figura 2, se representa el diagrama general de la metodología desarrollada en el presente trabajo.

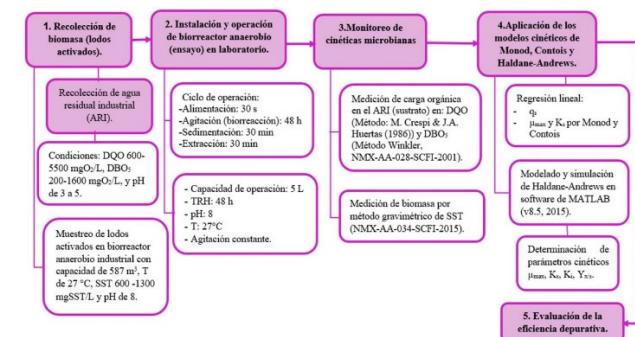


Fig. 2. Diagrama general de la metodología desarrollada.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinó por regresión lineal el consumo de sustrato ( $q_s$ ); es decir la taza de consumo del sustrato durante la biodegradación del mismo, también se calculó el rendimiento de

biomasa/sustrato  $Y_{(X/S)}$  a partir de las condiciones extremas de cada cinética microbiana. En la tabla 1 se observa que en las cinéticas realizadas se determinaron otros parámetros independientes a los modelos; estos parámetros son: -Velocidad específica de consumo de sustrato ( $q_s$ ); este parámetro indica la tasa de consumo de sustrato cuando este sufre una biodegradación. (Hernández, 2003). -Rendimiento biomasa/sustrato  $Y_{(X/S)}$ ; este parámetro se define como la relación entre la biomasa que es producida con la cantidad de sustrato que se ha consumido (Arenas L. R., 2009).

Tabla 1. Parámetros cinéticos por Regresión Lineal.

No. Cinética	Condiciones iniciales		Parámetros cinéticos	
	$X_0$ (mg/L)	$S_0$ (mg/L)	$q_s$ (mgS/L h)	$Y_{(X/S)}$ (mgX/mgS)
1	470	573.9	0.0114	2.820
2	516	206.5	0.0084	1.448

Para la cinética 1 con el uso de los modelos: Monod y Contois se determinó  $\text{máx}$  y  $K_s$  como se observa en la tabla 2, siendo los valores más adecuados los datos del modelo de Monod debido a que el coeficiente de correlación  $R^2$  es mayor, los datos representan un crecimiento microbiano lento a través del tiempo ( $\text{máx}=0.0345\text{h}^{-1}$ ) y la afinidad por el sustrato es menor cuando el valor de  $K_s$  (716.5523 mg/L) es mayor. En el caso de la cinética 2 los valores de  $\text{máx}$  y  $K_s$  más aceptables fueron los obtenidos con el modelo de Contois: 0.00841  $\text{h}^{-1}$  y 0.4265 mg/L respectivamente. Los mejores datos fueron seleccionados de acuerdo al porcentaje de variación ( $R^2$ ) el valor más cercano a 1 es el modelo que mejor ajusto a los datos experimentales obtenidos (Figueroa, Moreno, & Hormaza, 2014).

Tabla 2. Comparación de los parámetros  $K_s$  y  $\text{máx}$  para modelos cinéticos de Monod y Contois.

Parámetros	Modelo Cinético					
	Monod			Contois		
	$\text{máx}$ ( $\text{h}^{-1}$ )	$K_s$ (mg/L)	$R^2$	$\text{máx}$ ( $\text{h}^{-1}$ )	$K_s$ (mg/L)	$R^2$
Cinética 1	0.03 45	716.5	0.87	0.0365	1.370	0. 82
Cinética 2	0.00 50	203.3	0.96	0.008 4	0.4265	0. 97

Por su parte el modelo de Haldane-Andrews aporto información sobre los procesos de inhibición por el sustrato en el medio como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros cinéticos obtenidos con el modelo de Haldane-Andrews.

Modelo: HALDANE-ANDREWS				
Parámetros Cinéticos				
No. Cinética	$\text{máx}$ ( $\text{h}^{-1}$ )	$K_s$ (mg/L)	$K_i$ (mg/mgS* h)	$Y_{(X/S)}$ (mgX/mgS)
Cinética 1	0.85 5	300	395	0.550
Cinética 2	0.0 05	0.426	50	1.448

Comparando estos datos como se resume en la tabla 4, con los obtenidos por Jaime Moreno y Germán Buitrón en su trabajo "Optimación de un Biorreactor Aerobio para el Tratamiento de Aguas Residuales Industriales" con un  $V= 8.5 \text{ L}$ ,  $S_0 = 174 \text{ mg/L}_{4CF}$ ,  $T= 20 \pm 2^\circ\text{C}$  y un tiempo de operación de 24 h, para un  $S^*= 25 \text{ mg/L}$ , que se calcula con como:  $S^* = \sqrt{(K_s K_i)}$  (Moreno & Buitrón, 2002). Para la cinética 1:  $S^* = 344.238 \text{ mg/L}$ , en el caso de la cinética 2:  $S^* = 4.6178 \text{ mg/L}$ . De acuerdo a los datos obtenidos se comparó la cinética 2 con el trabajo antes mencionado, ya que su variación es menor que en la cinética 1. Los datos reportados por Jaime Moreno son:  $\text{máx}=0.0345$ ,  $Y_{(X/S)} = 0.3$  (mg<sub>ss</sub>/mg<sub>4CF</sub>),  $K_i= 81.25 \text{ mg/L}$  y  $K_s= 7.69 \text{ mg/L}$ , comparando estos valores con los presentados en la Tabla 2b, es notoria la semejanza de los datos encontrados, es decir que se obtuvieron datos más óptimos para la cinética 2 como el  $K_i$  con un valor de 50 mg/mgS\*h, donde se puede deducir que los posibles procesos inhibitorios serán bajos tomando en consideración que la biomasa inicial ( $X_0$ ) es de 516 mgSST/L. (Calderón, 2017).

Tabla 4. Constantes cinéticas reportadas para lodos activados como biomasa para biodegradación de sustrato.

Autores	Tipo de Biomasa	Concentración de sustrato (mg/L)	Constante del modelo de Haldane		
			$\text{máx}$ ( $\text{h}^{-1}$ )	$K_s$ (mg/L)	$K_i$ (mg/L)
Moreno y Buitrón, 2002	Lodos activados	174 <sub>4CF</sub>	0.034 5	7.69	81.25
Nuhoglu y Yalcin, 2005	Lodos activados	25 – 1450 Fenol	0.143	87.45	107.06
Kumaran y Paruchuri, 1997	Lodos activados	60 – 500 Fenol	0.246	27.4	524
D'Adamo et al., 1984	Lodos activados acclimatados	50 – 1000 Fenol	0.131 – 0.363	5 – 266	142 – 1199
Pawlowsky y Howell, 1973	Lodos activados no filamentosos	0 – 900 Fenol	0.26	25.4	173
Marrot B. et al., 2006	Lodos activados acclimatados	500 - 3000 Fenol	0.438	29.54	72.45

Las variaciones observadas se pueden atribuir a los biomasa (lodos activados) fue muy baja respecto diferentes sustratos, así como las concentraciones del a los trabajos comparados; así mismo se tiene un mismo, es muy notorio que existe una elevada valor de  $K_s$  disminuido, lo cual concuerda con la inconsistencia en los parámetros reportados de Haldane- Andrews para una combinación específica presentarse a su vez poca afinidad por el organismo/sustrato, esta variabilidad se debe al tipo de sustrato. Es importante mencionar que se debe cultivar de crecimiento, el sustrato y la concentración de realizar la replicación de cinéticas microbianas sustrato inicial. En las dos cinéticas ensayo realizadas que emulen aún más las condiciones operativas utilizando el biorreactor anaerobio, considerando como del biorreactor industrial de la PTAR de la concentraciones iniciales de sustrato las equivalentes a embotelladora en estudio; con el fin de disponer DBO<sub>5</sub> presente en el ARI. Se puede apreciar una mayor de una parametrización cinética detallada que biodegradabilidad de la cinética 2 (64%) con  $S_0 = 206.514$  permite reproducir adecuadamente el sistema y mgO<sub>2</sub>/L, en comparación con la cinética 1 (55%),  $S_0 =$  a su vez proponer los ajustes necesarios para mejorar su operación y eficiencia depurativa. La optimización de los procesos biológicos mediante simulaciones numéricas permite superar los problemas que se presentan durante la degradación de altas concentraciones de carga orgánica.

### Abreviaciones y Acrónimos

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

S.A.P.I.: Sociedad Anónima Promotora de Inversión.

C.V. Capital Variable.

RAFA: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanquet.

ARI: Agua Residual Industrial.

### CONCLUSIONES

Al finalizar la prueba de biodegradación anaerobia en el biorreactor de laboratorio, los parámetros obtenidos del modelo de Haldane- Andrews se compararon con el trabajo de Moreno & Buitrón, 2002; quienes analizaron un sistema de un biorreactor anaerobio de 7L de operación, con biomasa de lodos activados, a 24 °C y pH 7; semejante al del presente proyecto. Estos autores, reportan los siguientes valores de los parámetros cinéticos:  $\text{máx} = 0.0345 \text{ h}^{-1}$ ,  $Y_{(X/S)} = 0.3 \text{ mgX/mgS}$ ,  $K_i = 81.25 \text{ mg/L}$  y  $K_s = 7.69 \text{ mg/L}$ . Igualmente se comparó con el trabajo de Marrot B. et al., 2006 que es un sistema aerobio, a 25°C, pH no controlado; que reportan valores de  $\text{máx} = 0.438$ ,  $K_i = 72.45 \text{ mg/L}$  y  $K_s = 29.54 \text{ mg/L}$ . Al comparar estos valores cinéticos con los obtenidos en este proyecto:  $\text{máx} = 0.0005 \text{ h}^{-1}$ ,  $Y_{(X/S)} = 1.4485 \text{ mgX/mgS}$ ,  $K_i = 50.00 \text{ mg/L}$  y  $K_s = 0.4265 \text{ mg/L}$ ; se puede concluir que los datos más aceptables corresponden a la cinética 2; para el caso de la constante de inhibición por el sustrato ( $K_i$ ), es evidente que aparentemente en la prueba de biodegradación se tuvo una inhibición media de la biomasa por el sustrato. En tanto que el valor de  $\text{máx}$ , que se obtuvo, muestra que la velocidad con la que creció la

### RECONOCIMIENTOS

El autor Baños Rodríguez Ubaldo, agradece a la empresa Embotelladora Las Margaritas S.A.P.I de C.V. por brindarnos la oportunidad de realizar este proyecto en la PTAR

### REFERENCIAS

Arenas López, J. R. (Marzo de 2009). *Simulación del tren de tratamiento de agua residual, anaerobio-aerobio de la empresa Empacadora San Marcos S.A. de C.V., mediante la utilización de modelos matemáticos resueltos en software*. Obtenido de Ciencias con Especialidad en Ingeniería Química.: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/meiq/arenas\\_l\\_jr/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meiq/arenas_l_jr/capitulo4.pdf)

Cáceres, E. V. (2011). "EVALUACIÓN DE EFLUENTES INDUSTRIALES. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO: FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN, 15-45.

Figueroa, D., Moreno, A., & Hormaza, A. (12 de Diciembre de 2014). Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos. (I. 1692-3324, Ed.) Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 14(26), 105-120.

Moreno, J., & Buitrón, G. (2002). Optimación de un Biorreactor Aerobio para el Tratamiento de Aguas

Residuales Industriales. Universidad Autónoma de México, 76-78.

- Huertas, R. A. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *SCIELO*, 145-150.
- Ubal, S. (2009). *El agua es esencial para la vida y es la sangre de nuestro planeta*. Obtenido de ALAI: <https://www.alainet.org/es/active/2074>

# Sistema electrónico para monitoreo de la demanda y corrección del factor de potencia para servicio eléctrico residencial

R. Arrieta-Pérez, C. Fragoso-Cruz, A. Meneses-Figueroa, D. Robles-Camarillo<sup>\*</sup>  
<sup>\*</sup>danielrc@upp.edu.mx<sup>\*</sup>

Universidad Politécnica de Pachuca, Carr. Pachuca-Cd. Sahagún Km. 20, ExHacienda Santa Bárbara, Zempoala, Hidalgo, México

Recibido: Septiembre 07, 2021; Aceptado: Septiembre 22, 2021.

## Resumen (ÁREA TEMÁTICA: CCCF)

El sistema propuesto ha sido diseñado con dos finalidades, establecer un medio de transmisión de información para atención a la demanda en una *smart grid* y mejorar la eficiencia en el consumo de energía eléctrica con base en la corrección del factor de potencia de un servicio de distribución monofásico. Las técnicas de adquisición, procesamiento y transmisión de la información, implementadas en el sistema, permiten el monitoreo a distancia sin depender de redes privadas comerciales de comunicación inalámbrica, además de mejorar el aprovechamiento de la energía eléctrica contratada mejorando el factor de potencia por arriba de 0.9. Se ha podido comprobar la factibilidad de un enlace en red de 2.4 GHz dentro de una superficie superior a los 750 km<sup>2</sup>, de más de 56 mil usuarios.

*Palabras clave:* Atención a la demanda, red inalámbrica de sensores, factor de potencia.

## Abstract (AREA: CCCF)

The proposed system has been designed with two purposes: to establish the via to information transmission for demand-side management in a *smart grid* and to improve the efficiency in the electrical energy consumption based on the correction of power factor for a monophasic distribution service. The information acquisition, processing and transmission techniques, implemented in the system, allow remote monitoring without depending on private commercial wireless communication networks, in addition to improving the use of electrical energy service, by means of the power factor improvement above 0.9. It has been possible to verify the feasibility to deploy a 2.4 GHz network link within a range area about 750 km<sup>2</sup> with more than 56 thousand users.

*Key words:* Demand-side management, wireless sensor network, power factor.

## INTRODUCCIÓN

La crisis global energética durante el siglo XXI, provocada por el crecimiento poblacional y sus consecuencias ambientales han impulsado investigación para afrontar los retos de abastecimiento.

Igualmente se ha demostrado que cambios significativos en los hábitos de consumo podrían ahorrar alrededor de 19% ( $\pm 5\%$ ) de la energía consumida en una casa habitación [1].

Uno de los mecanismos usados para hacer más sencillo el cambio de los hábitos de consumo, es la adopción de sistemas de gestión de la energía, lo que significa la disminución de su consumo por medio del manejo integral de la energía eléctrica, así como el uso de energías renovables.

En este sentido es importante incorporar tecnología e innovación con soluciones que permitan optimizar el consumo energético [2].

Países como Reino Unido, Alemania y Francia han avanzado en el uso de dichas estrategias y han establecido regulaciones enfocadas a la reducción de la demanda de energía. Los principales desarrollos se encuentran en la producción de la energía eléctrica por el mismo consumidor, con la capacidad de abastecer la red de distribución con sus remanentes [2].

En este escenario, es necesario un agente agregador (*aggregator agent*) que facilite la participación del usuario en gestión de conexión-desconexión, límite de carga, reducción del pico de demanda, generación y

cogeneración. Otros mecanismos se enfocan en la creación e implementación de sistemas autónomos o inteligentes, que permitan la gestión eficiente de la energía consumida [2,3]. El manejo activo del lado de la demanda (DM, *demand-side management*, por sus siglas en inglés) es un conjunto de estrategias y mediciones enfocado en resolver el problema de la flexibilidad y la participación de los consumidores para incrementar la eficiencia del sistema eléctrico de distribución y reducir la demanda. El usuario residencial es esencial para la calidad del servicio, en caso de proporcionar información acerca de sus patrones de uso, ya que el sector residencial consume aproximadamente el 40% de la energía suministrada por las fuentes convencionales.

Existen dispositivos de control del consumo de la energía doméstica (HEMS, *home energy management systems*, por sus siglas en inglés), los cuales permiten conocer el consumo por parte del usuario final por medios remotos, con sistemas computacionales y redes de comunicación, para observar el impacto de la demanda [4]. Algunos países motivan al usuario con incentivos fiscales por el uso de estos sistemas en sus domicilios [2].

## DESARROLLO

El presente documento muestra el desarrollo de un sistema capaz de medir y transmitir los parámetros de una acometida residencial monofásica (1F-2H) para determinar el patrón de consumo del usuario y mejorar la eficiencia del consumo doméstico.

## Materiales y métodos

El sistema propuesto consta de una tarjeta electrónica (hardware) y un programa informático (software) para el monitoreo y control de la información adquirida. Con base en la metodología *bottom-up*, se han diseñado módulos electrónicos independientes para conformar el circuito que integra el hardware del sistema. El programa y su interfaz gráfica de usuario fueron desarrollados en Matlab siguiendo la metodología de desarrollo ágil SCRUM. La figura 1 muestra el diagrama a bloques del sistema propuesto.

### Acondicionamiento de señales

El bloque de la acometida representa un servicio residencial monofásico (1F-2H), de 127 volts alternos RMS. La corriente que demanda la carga

total instalada es adquirida por un transformador de corriente de núcleo dividido SCT013, con capacidad de 50A/1V [5].

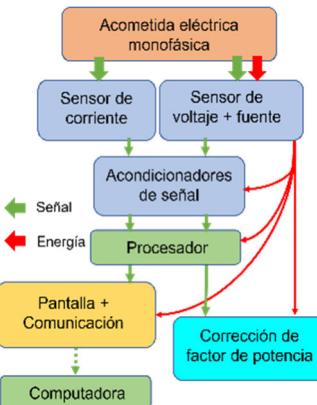


Fig. 1. Diagrama a bloques del sistema propuesto.

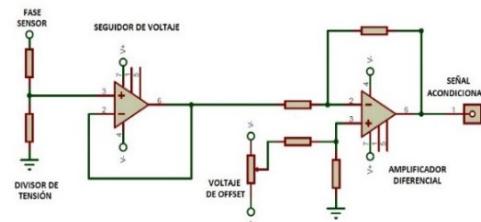


Fig. 2. Diagrama esquemático del circuito acondicionador de señal de voltaje.

La señal de voltaje se adquiere con un transformador de 12 VCA/2 A, con derivación central, mismo que permite establecer una fuente bipolar regulada simétrica de  $\pm 6$  VCD. La señal de corriente y la de voltaje preservan sus características de frecuencia y fase, por lo que requieren una etapa de acondicionamiento previo al convertidor analógico-digital (ADC) del microcontrolador. La figura 2 muestra el circuito de acondicionamiento para la señal de voltaje.

El secundario del transformador entrega una señal de voltaje bipolar alterno superior a los 16 volts, por lo que la señal deberá ser acondicionada para obtener una señal monopolar e inferior a los 5 volts para que pueda ser procesada por el ADC del microcontrolador.

El divisor de tensión permite ajustar la amplitud de la señal a  $\pm 2.5$  volts pico-pico, que entran a un amplificador operacional conectado en configuración de seguidor de voltaje, de este modo se logra separar la fuente de corriente

alterna de la fuente bipolar por el efecto de alta impedancia.

Posteriormente la señal pasa a un amplificador operacional en configuración de amplificador diferencial con ganancia unitaria, que preserva las características de fase, amplitud y frecuencia de la señal adquirida, pero permite agregar un nivel de offset para mantener la forma de la señal con valores monopolares entre 0 y 5 voltos. Dicha señal si puede ser muestreada por el ADC del microcontrolador sin exceder los parámetros recomendados por el fabricante. Las curvas de la figura 3 muestran la relación de las señales acondicionadas.

### Adquisición de la señal

El microcontrolador utilizado es un PIC16F877A, que cuenta con un ADC de 10 bits y hasta 8 canales conmutables para conversión.

Este componente es el encargado de convertir las señales de voltaje y corriente, atender los comandos que recibe desde la computadora, desplegar datos de operación en una pantalla LCD, empaquetar los datos solicitados para su transmisión y conmutar los capacitores de corrección de factor de potencia, en caso necesario.

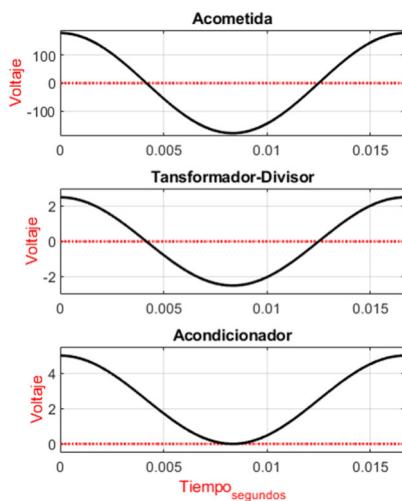


Fig. 3. Proceso de acondicionamiento de las señales alternas de voltaje.

En la figura 4 se muestra el diagrama esquemático del microcontrolador, donde se puede apreciar un arreglo *pull-up* de 4 bits para indicar el número de identificación de ese transceptor en la red, además de los periféricos que integran el hardware desarrollado.

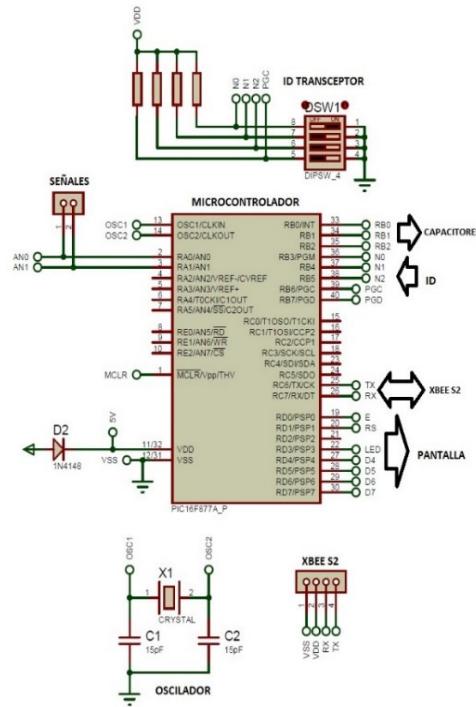


Fig. 4. Diagrama esquemático del microcontrolador, vista simplificada.

### Comunicación

El protocolo de comunicación utilizado es RS-232 sin retorno a cero, con 8 bits de datos, 19200 bps, y un bit de parada.

Por lo anterior es posible usar cable o módulos de comunicación inalámbrica para su conexión, en este caso se ha probado con módulos XBee S2 de 2.4 GHz, que trabajan bajo el estándar IEEE 802.15.4 con alcance en línea de vista en exteriores de hasta 1500 m y con consumo de 973 mW en modo de transmisión, conforme lo indica el fabricante [7].

Los módulos propuestos permiten la conformación de mallas, estrellas y árboles en red, además pueden configurarse en modo transparente. La figura 5 muestra una propuesta de topología estrella para una red de sensores inalámbricos usando XBee S2 [8].

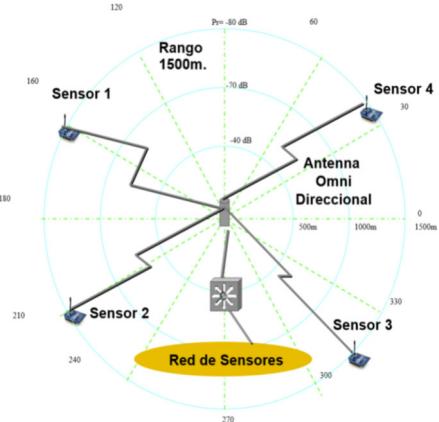


Fig. 5. Topología estrella para una red de sensores inalámbricos usando Xbee S2 [8].

### Procesamiento

La operación del microcontrolador se describe con el diagrama de flujo simplificado de la figura 6. Al conectar el transformador de voltaje a la acometida, la fuente bipolar simétrica alimenta los dispositivos de acondicionamiento, periféricos y al mismo microcontrolador. Despues de que el voltaje regulado de 5VCD se estabiliza, el código programado se ejecuta: primero se configuran los puertos digitales y analógicos, se inicializan en cero todas las salidas digitales y se sigue el procedimiento de configuración e inicio para el ADC, el LCD y el Xbee.

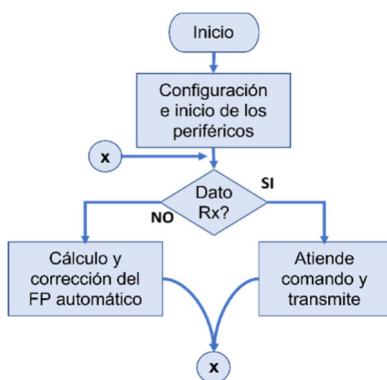


Fig. 6. Diagrama de flujo simplificado que describe la operación del microcontrolador propuesto.

Una vez iniciados los procesos, el microcontrolador ejecuta la lectura del canal analógico para determinar la fase y periodo ( $T$ ) de la señal de voltaje. Una vez que se detecta la fase de referencia, se comuta la entrada analógica al canal del sensor de corriente y se determina el tiempo transcurrido entre ambos cruces por cero ( $\Delta t$ ), con eso se puede calcular

el ángulo de fase ( $\phi^o$ ) entre la señal de voltaje y la de corriente, como se muestra en la ecuación (1).

$$\phi^o = \frac{\Delta t * 360^o}{T} \quad (1)$$

La grafica de la figura 7 muestra el proceso de adquisición y cálculo del ángulo de fase expresado en la ecuación (1), el proceso inicia cuando el microcontrolador continuamente lee el canal analógico de la señal de voltaje, hasta que determina el cruce por cero de esta. A partir de ese instante es posible determinar  $T$ , entonces comuta su adquisición al canal que tiene la señal de corriente y aguarda 15 ms para iniciar la adquisición hasta determinar el cruce por cero de la onda. Enseguida calcula con los ciclos de reloj el valor de  $\Delta t$ , estableciendo con ello los datos necesarios para calcular el ángulo de fase entre ambas señales.

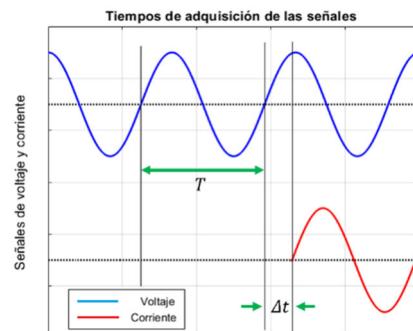


Fig. 7. Gráfica de tiempos para determinación del ángulo de fase.

Cada transceptor puede ser gestionado usando una interfaz gráfica de usuario (IGU) programada en Matlab. En la figura 8 se muestra el aspecto visual y los parámetros de monitoreo y control.

La IGU muestra en (A) el cuadro de acciones para el usuario con la finalidad de facilitar su uso. En (B) muestra la superposición gráfica de las señales, calculadas con base en los parámetros recibidos. El control (C) permite elegir el puerto de comunicación donde se encuentra el Xbee. Una vez conectado, se puede abrir el puerto con el botón (D). Para iniciar la comunicación es necesario el botón (E), mismo que envía los comandos para solicitar la información a la tarjeta. Una vez recibida la información de los parámetros de la acometida, se muestra el cálculo de FP en (G) y los parámetros calculados de potencia en (H).

Por último, toda esta información puede ser almacenada en el disco de la computadora, incluyendo su marca de tiempo para su análisis posterior con los controles (F).

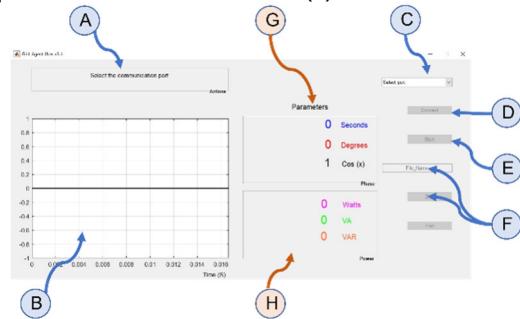


Fig. 8. Interfaz gráfica de usuario diseñada para el control y comunicación con el hardware.

## RESULTADOS

Respecto a la adquisición de las señales, en las figuras 9 y 10 se muestran las pruebas con el osciloscopio para: a) la señal a la salida del secundario del transformador de voltaje que alimenta el circuito y se aplica como sensor, b) la señal a la salida del divisor de tensión. En ambos casos es posible comprobar la naturaleza bipolar de la señal. En c) se muestra la señal a la entrada del ADC, misma que preserva la forma, fase y frecuencia de la señal de la acometida, pero en valores unipolares que pueden ser calibrados en amplitud y nivel de offset, con la finalidad de ajustarse a las capacidades del ADC del microcontrolador. Por último, en d) se presenta la señal muestreada digitalmente, en este caso la computadora recibe las muestras digitales a través del puerto de comunicación con baudrate de 19200 bps, grafica las señales con valores entre 0 y 1023.

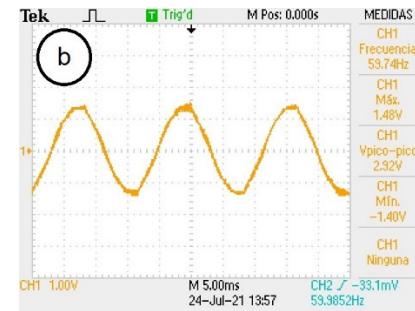
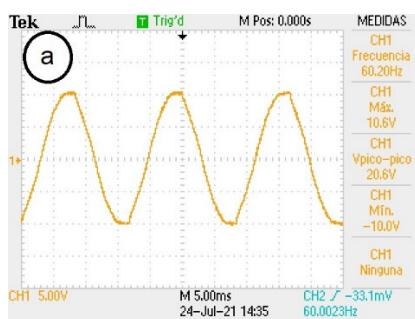


Fig. 9. a) Señal del voltaje a la salida del transformador sensor,  
 b) Señal de voltaje a la salida del circuito divisor de tensión.

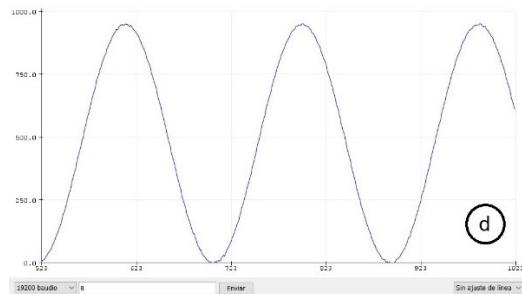
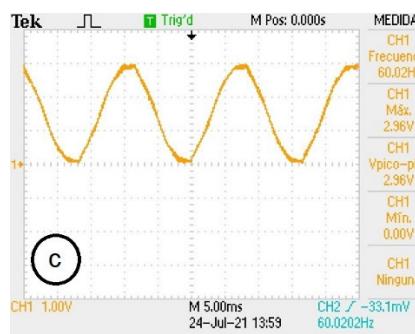


Fig. 10. c) Señal del voltaje a la entrada del ADC,  
 d) Señal de voltaje muestreada, transmitida y graficada en la PC.

Igualmente se comprobó la precisión de la detección de fase que debe hacer el microcontrolador para calcular el tiempo de defasamiento  $\Delta t$ . En la figura 11 se muestra la curva del voltaje a la entrada del ADC y el pulso que indica la determinación del instante donde se debe encontrar el cruce por cero de la señal. Es posible notar que el algoritmo para la determinación de tiempos establece el tiempo de referencia para el cálculo de la frecuencia y fase.

Con los parámetros obtenidos por el hardware, es posible calcular el ángulo de fase en grados, las tres potencias del circuito y el factor de potencia que experimenta la acometida al

energizar una carga inductiva. En la figura 12 se muestra la información desplegada por el software de adquisición y control.

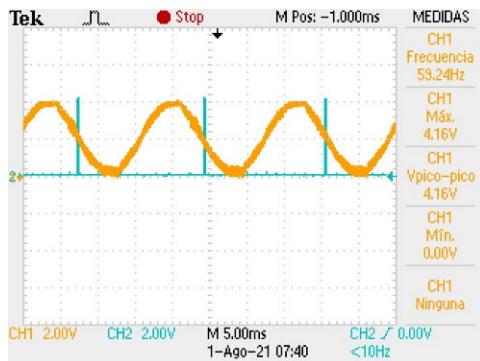


Fig. 11. Gráfica de la señal de voltaje monopolar y el impulso que indica el instante del cruce por cero como referencia de fase.

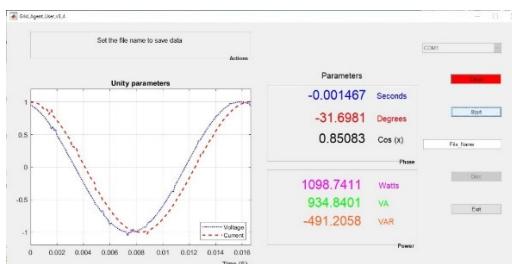


Fig. 12. Visualización de una lectura y cálculo de los parámetros de operación del sistema propuesto.

Las pruebas realizadas con los módulos de comunicación permiten establecer una red inalámbrica de sensores (WSN, wireless sensor network, por sus siglas en inglés) en topología estrella que permite designar a la computadora como el nodo "coordinador" de la red y a la tarjeta de hardware como un "router" con la finalidad de gestionar los procesos de adquisición y transmisión de datos. En la figura 13 se muestra la prueba de alcance en línea de vista usando Xbee S2.



Fig. 13. Prueba de alcance inalámbrico entre el coordinador y un router con módulos Xbee S2. Vista satelital del parque David Ben Gurión de la ciudad de Pachuca, Hgo.

La distancia calculada entre la computadora y el hardware es aproximada a 500 m en línea de vista, lo que permite afirmar que una WSN desplegada podría cubrir un área aproximada de 785.3 km<sup>2</sup> [9], misma que podría aumentar si las antenas de comunicación pudieran ser ubicadas por arriba de los 13 m sobre el nivel del piso terminado, para mantener despejado el volumen de Fresnel entre los módulos de comunicación [8].

La tabla 1 muestra la comparación de lecturas realizadas con un fasímetro comercial [12] y el sistema propuesto sobre electrodomésticos comerciales conectados en una casa habitación, que aportan efectos reactivos al servicio.

Tabla 1. Comparación de características eléctricas de aparatos electrodomésticos probados.

Tipo	Placa de datos		Equipo usado [12]	
	Potenci	Corrient	Fasimetr	Sistem
Motobomb	a 187 W	e 4.0 A	o 0.68	a 0.69
Lavadora	480 W	5.0 A	0.54	0.54
Refrigerad	160 W	1.2 A	0.73	0.75
or Secadora	425 W	7.0 A	0.66	0.65

Usando  $V_{RMS} = 127 V$ ,  $f = 60 Hz$ , y los datos obtenidos con el sistema propuesto, mostrados en la tabla 1 es posible hacer el análisis fasorial de cada electrodoméstico para determinar el valor del capacitor requerido para corregir el  $FP$  por arriba de 0.9. La figura 14 muestra el ejemplo de una carga inductiva.

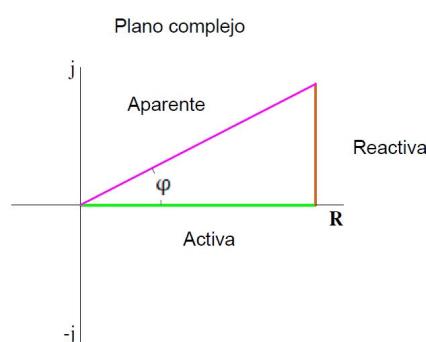


Fig. 14. Representación fasorial del triángulo de potencias en el plano complejo, con el ángulo de fase  $\varphi$  positivo, provocado por una carga inductiva. Los fasores representan la potencia aparente (S), activa (P) y reactiva (Q).

Con base en la ecuación (2) y los parámetros de la tabla 1 es posible calcular el ángulo de fase es  $\varphi$ . Usando el valor de la potencia  $P$  de la placa de

datos y con base en la relación de potencias de la ecuación (3), es necesario que el capacitor propuesto aporte una potencia reactiva  $Q$  negativa.

$$FP = \cos \varphi \quad (2)$$

$$Q = P * \tan \varphi \quad (3)$$

Ahora es posible calcular el ángulo necesario para obtener el  $FP$  corregido ( $FP_f \geq 0.9$ ), con base en la ecuación (4).

$$\varphi_f = \cos^{-1}(FP_f) \quad (4)$$

Es necesario calcular el valor que debe tener  $Q_f$  que será la potencia reactiva correspondiente a  $\varphi_f$ . de la ecuación (3). Con esos dos valores de  $Q$  y  $Q_f$  se puede calcular la potencia reactiva que debe aportar el capacitor  $Q_c$ , como lo indica la ecuación (5).

$$Q_c = Q - Q_f \quad (5)$$

Una vez calculada  $Q_c$ , es posible sustituir en la ecuación (6) para calcular la reactancia capacitiva  $X_c$ .

$$Q_c = \frac{V_{RMS}^2}{X_c} \quad (6)$$

La  $X_c$  se determina con la ecuación (7), siendo  $\omega = 2\pi f$  la velocidad angular en  $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ .

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (7)$$

Sustituyendo  $Q_c$  y despejando  $C$  de (7), se obtiene el valor exacto de capacitancia que corrige el  $FP_f$  para la carga analizada.

En la tabla 2 se muestra el cálculo respectivo para los electrodomésticos de la tabla 1 y el próximo valor comercial elegido en cada caso. Con el mismo proceso a la inversa, se puede calcular el  $FP$  logrado por el capacitor comercial.

Tabla 2. Comparación del  $FP$  calculado contra el  $FP$  provocado por la corrección de capacidores comerciales, en los aparatos electrodomésticos probados.

Tipo	Capacitor exacto	Valor comercial	FP corregido
Motobomba	17.36 F	18 F	0.91
Lavadora	84.80 F	90 F	0.92
Refrigerador	10.46 F	12 F	0.92
Secadora	47.86 F	50 F	0.91

## CONCLUSIONES

Con la prueba de comunicación realizada en línea de vista, no es posible alcanzar 1500 m entre módulos como lo afirma el fabricante [7,8]. Sin embargo, la cobertura superior a los 750 km<sup>2</sup> de área, facilitará la atención a la demanda con la perspectiva de enfocar los desarrollos a una ciudad inteligente [10,11].

Considerando la capacidad de 2<sup>16</sup> nodos en la red con los módulos Xbee S2 [7], es posible monitorear un asentamiento residencial sin la necesidad de depender de los servicios de comunicación móvil de la red telefónica celular o bien de servicios privados de proveedores de internet para gestionar y operar los sistemas instalados.

El cálculo de la capacitancia necesaria permite corregir el  $FP$  sobre 0.9, disminuyendo con ello la potencia reactiva de los electrodomésticos más comunes en una casa habitación y permite el ahorro de energía eléctrica que significa tanto la disminución del costo del servicio para el usuario como el uso eficiente de la red de distribución comercial.

El proceso de conexión-desconexión de un banco de capacidores en etapas discretas permite corregir el  $FP$  hasta en nueve configuraciones diferentes que pueden ajustar las necesidades específicas de diferentes condiciones de defasamiento comúnmente ocurridas en una casa habitación.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, (CONACYT) por su apoyo al presente proyecto a través de la Beca Nacional 1011863 y a la Secretaría de Educación Pública (SEP) por el apoyo a través del proyecto PRODEP-117272/2019.

## REFERENCIAS

- [1] Vega, A., Amaya, D., Santamaría, F., Rivas, E. "Active demand-side management strategies focused on the residential sector", *The Electricity Journal* 33 (2020) 106734, Elsevier.
- [2] Newburger, E. "Bipartisan infrastructure deal omits major climate change measures", CNBC Politics, [On line]. Available: <https://www.cnbc.com/2021/06/24/bipartisan-infrastructure-deal-will-likely-omit-major-climate-change-measures-.html>. [Last access: June 2021].

- [3] Podgornik, A., Sucic, B., Blazic, B., 2016. "Effects of customized consumption feedback on energy efficient behaviour in low-income households" J. Clean. Prod. 25–34
- [4] Louis, J.N., Caló, A., Leiviskä, K., Pongrácz, E. "Modelling home electricity management for sustainability: The impact of response levels, technological deployment & occupancy", 2016. Energy Build. 218–232.
- [5] YHDC, "Split core current transformer, Model:SCT013-030" YHDC inc. [On line]. Available: <http://en.yhdc.com/product/SCT013-401.html>. [Last access: May 2021].
- [6] STEREN, "Transformador de 24 Vca, 2 Amperes, con Tap central" STEREN México, [On line]. Available: <https://www.steren.com.mx/transformador-de-24-vca-2-amperes-con-tap-central.html>. [Last access: April 2021].
- [7] Digi International, "XBee/XBee-PRO Zigbee RF Modules User Guide", 2018. Pp 21-51.
- [8] Núñez-Pérez, JC., Bonilla-Rodríguez, A., Calvillo-Téllez, A. "Estimación del alcance de radiotransmisores Xbee", 2017. Research in Computing Science 142 (2017), Pp. 39-46.
- [9] M.R. Spiegel, S. Lipschuts, J. Liu. "Fórmulas y tablas de matemática aplicada, 4<sup>a</sup> edición", 2014. Ed. Mc Graw Hill, Pp. 6-7.
- [10] NACIONES UNIDAS, "Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles", [On line]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/> [Last access: June 2021].
- [11] NACIONES UNIDAS, "Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna", [On line]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/> [Last access: June 2021].
- [12] Fluke Corporation, "9040 Phase Rotation Indicator, user manual", 2011. [On line]. Available: <https://www.fluke.com/es-mx/producto/comprobacion-electrica/comprobadores-basicos/fluke-9040#> [Last access: September 2020].
- [13] Hayt, W.H. "Análisis de circuitos en ingeniería", 2019. Ed. Mc Graw Hill, España. Pp. 255-425

# Desarrollo de un sistema mecánico para rehabilitación de extremidad inferior

M. A. Alamilla-Daniel<sup>1</sup>, A. R. Licona-Rodríguez<sup>1</sup>, J. G. Benítez-Morales<sup>1</sup>, J. Hernández-Pérez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Pachuca

Recibido: Agosto 20, 2021; Aceptado: Septiembre 11, 2021.

## Resumen (ÁREA TEMÁTICA: CI)

Durante la rehabilitación pasiva, el médico terapeuta realiza rutinas específicas sobre las extremidades del paciente que poseen algún daño fisiológico y han perdido parcial o totalmente la movilidad y fortaleza muscular. Actualmente, existen dispositivos comerciales de naturaleza manual que auxilian al médico durante la aplicación de rutinas, sin embargo, no existen en el mercado algún sistema que automatice el proceso y ofrezca los beneficios de un sistema autónomo. En este artículo, detallamos el diseño y desarrollo de un sistema mecánico que será implementado como un rehabilitador de extremidad inferior pasiva autónomo. El sistema mecánico fue desarrollado tomando en cuenta la biomecánica de la rodilla, considerando el cambio de longitud que sufre la extremidad durante la flexión y la extensión, así como la antropometría de los pacientes a tratar. El sistema es actuado por elementos electromotrices a fin de evitar costosas instalaciones neumáticas o hidráulicas. El cálculo y desarrollo de un sistema de transmisión y selección de actuadores es también detallado en sus correspondientes secciones. Finalmente, el sistema es evaluado con una ley de control y un microcontrolador para verificar su funcionalidad.

*Palabras clave:* *Rehabilitador, Biomecánica, Mecanismo*

## Abstract (AREA: CI)

During passive rehabilitation, the medical therapist performs specific routines on the patient's limbs who have suffered physiological damage and has lost partial or total mobility and muscle strength. Currently, there are commercial devices of manual nature that assist the doctor during the application of routines. However, there are no systems on the market that automates the process and offers the benefits of an autonomous system. In this article, it is detailed the design and development of a mechanical system for an autonomous passive lower extremity rehabilitator. The mechanical system is developed considering the knee's biomechanics, the change in length of the limb during flexion and extension, and the anthropometry of the patients to be treated. The system is actuated by electromechanical elements to avoid costly pneumatic or hydraulic networks and provide easy use and displacement. The scheming and development of the transmission system for the electromotive actuator selection are also detailed in its corresponding section. Finally, the system is evaluated with a control law and a microcontroller to verify its functionality.

*Key words:* *Rehabilitator, Biomechanics, Mechanism.*

## INTRODUCCIÓN

La rehabilitación, como lo define la OMS, es "un conjunto de intervenciones diseñadas para optimizar el funcionamiento y reducir la discapacidad en individuos con condiciones de salud en interacción con su entorno" (WHO, 2021).

Al rehabilitar, el objetivo del médico terapeuta es reactivar y fortalecer los miembros que han sufrido de daño fisiológico en alguna extremidad

del paciente. Su objetivo final es regresar a la persona a la movilidad y fuerza que poseía antes del percance en la mayor brevedad posible para que pueda reestablecer su vida cotidiana. Existe dos tipos de rehabilitación, la pasiva y la activa. En la rehabilitación pasiva, el terapeuta moviliza la extremidad estimulando los nervios y músculos para reactivarlos; este tipo de rehabilitación es sugerido por los terapeutas, en pacientes posoperatorios, y debe realizar a la brevedad posible para poder recuperar cuanto

antes la movilidad de la extremidad afectada (Dávila Castrodad et al., 2019).

En la rehabilitación activa, el medico propone ejercicios o rutinas al paciente, quien haciendo uso de su fuerza intentará fortalecer y recuperar el movimiento de sus extremidades.

Actualmente existen diferentes métodos, técnicas, así como equipos para la rehabilitación pasiva; que ayudan al paciente y al médico a lograr este objetivo final. Sin embargo, la gran mayoría de estos métodos son de naturaleza manual, mecánica, lo cual puede llevar al terapeuta a sufrir fatiga después de repetidas rutinas aplicadas a distintos pacientes, y por ende reducir su rendimiento durante las rutinas finales de su jornada.

Debido a esto, este artículo se enfocará en el diseño y desarrollo de un sistema mecánico para rehabilitación de extremidad inferior autónomo, que permitirá automatizar las rutinas de rehabilitación relegando la responsabilidad del terapeuta a evaluación y asignación de secuencias.

A diferencia de otros sistemas comerciales, el modelo propuesto es de menor tamaño, funciona con elementos electromecánicos, lo cual evita costosas instalaciones neumáticas e hidráulicas, permitiendo incluso una fácil instalación, desplazamiento y uso.

El trabajo presentado en este artículo está dividido de la siguiente forma: En el *estado del arte*, en donde detallamos aquellos sistemas experimentales o comerciales que existen actualmente y cuya función u objetivo es similar al nuestro. En la sección de *extremidad inferior y su fisiología*, se detallan la biomecánica de la extremidad y la rodilla, los cuales establecen el tipo de movimientos que puede realizar el rehabilitador. En la sección de *propuesta*, se definirán los objetivos del sistema y la propuesta del sistema a realizar. En la sección de *Pacientes* se analizará el tipo de paciente y el rango de características que podrán soportar el sistema. En la sección *Diseño mecánico*, se expondrá el mecanismo propuesto y se analizará estáticamente. En la sección de *caja de transmisión* se mostrará el cálculo del sistema de transmisión y los motores utilizados. En la sección de *resultados* se mostrará los eslabones

propuestos ensamblados con la caja de transmisión y una prueba utilizando un control difuso implementado en un microcontrolador Arduino DUE.

## ESTADO DEL ARTE

En el campo de la rehabilitación física, existen algunos dispositivos encargados de activar nuevamente las funciones motrices tales como los exoesqueletos, ortesis y mecanismos terapéuticos. En el mercado actual se pueden encontrar diferentes tipos de instrumentos que comercializan las industrias médicas. En esta sección se detallarán los prototipos presentados por diversos investigadores.

El prototipo publicado por (Saso et al., 2004), LOKOMAT, muestra el principio de un producto actualmente comercial. Dicho mecanismo se trata de un exoesqueleto que utiliza pistones neumáticos sobre una caminadora y un sistema de poleas, que se encarga de sostener al paciente para liberar el peso de las piernas a rehabilitar, otra parte donde se integra los actuadores neumáticos es en la cadera y rodilla, permitiendo el ajuste a diferentes longitudes de las extremidades inferiores y superiores para diferentes tipos de pacientes. Este producto es actualmente comercializado y destinado a centros de rehabilitación, para tratar pacientes con problemas de lesión en médula espinal y accidentes. Sin embargo, aunque LOKOMAT es considerado por muchos la cúspide de los sistemas de tratamiento rehabilitación de extremidades inferiores, su alto costo y necesidad de instalaciones especializados lo hacen inviable para implementar en pequeños centros de rehabilitación.

En el MIT (Massachusetts Institute of Technology) fue desarrollado un sistema dedicado a la rehabilitación de tobillo en (Roy et al., 2007). El prototipo trata de un robot de tres grados de libertad con un peso de 3.6 Kg. El robot presenta cuatro tipos de movimientos: dorsiflexión, plantar flexión, inversión y eversión, permitiendo 25° de flexión en dorsiflexión, 45° en plantar flexión, 25° en inversión y 20° en eversión. Así como un máximo de 15° de rotación.

Otro prototipo de naturaleza similar al LOKOMAT presentado por (Banala et al., 2009). Se trata de un sistema de rehabilitación activa, pero a

diferencia del anterior, éste asiste al paciente quien aún debe cargar con su propio peso. Los actuadores y eslabones del sistema se encuentran en la parte trasera del paciente, soportados por una mesa al fin de evitar esfuerzo sobre éste. El sistema mecánico se basa en el balanceo de gravedad actuado mediante pistones neumáticos que propulsan el movimiento del paciente sobre una caminadora.

El sistema propuesto por (Lyu et al., 2016) se trata de un sistema de 3 grados de libertad, que considera la biomecánica de la rodilla. Los autores utilizan motores lineales, lo cual evitar el uso de instalaciones neumáticas o hidráulicas. El sistema fue diseñado para la rehabilitación de caminata, por lo cual requiere que el paciente este de pie en todo momento, lo cual limita el rango de rehabilitación pasiva, ya que algunos pacientes, después de ser intervenidos quirúrgicamente, no pueden mantenerse en dicha posición.

En más recientes años, el sistema propuesto por (Rifaï et al., 2017) propone el uso de un sistema de un grado de libertad para rehabilitación de la tibia. El sistema usa una polea y un chicote para movilizar la tibia, y utiliza como apoyo el fémur. La pierna del paciente es sostenida por cinchos de tela con velcro. El sistema utiliza un control de torque para asegurar que la fuerza que se aplica en el sistema sea la adecuada para mover al paciente. Este sistema es simple, sin embargo, solo es capaz de movilizar la tibia y por ende no es apropiado para una rehabilitación completa de la extremidad desde la cadera.

El exoesqueleto propuesto por (Harib et al., 2018) se utiliza para dar a las personas parapléjicas la oportunidad de volver a caminar. El exoesqueleto es actuado por motores sin escobillas, lo cual permite que el sistema sea pueda desplazarse con libertad. El control y la fuente de voltaje se encuentran dentro de una mochila que sostiene los eslabones que se conectan al paciente. Sin embargo, los desarrolladores obviaron también la biomecánica de la rodilla, considerándola como bisagra. A su vez, la disposición del sistema obliga al paciente a permanecer todo tiempo de pie, lo cual vuelve a limitar la implementación con aquellos pacientes que no pueden realizarlo durante sus primeras fases de rehabilitación.

Un mecanismo para rehabilitación pasiva de la extremidad inferior del paciente, es propuesto en (Vaida et al., 2020). La extremidad del paciente recostado es apoyada sobre soportes que conectan directamente con los actuadores en el centro de masa tanto del fémur y la tibia. Los investigadores realizaron el diseño del mecanismo basándose en mediciones hechas por goniómetros. Sin embargo, vuelven a obviar la biomecánica de la rodilla, al ser considerada una sola bisagra.

Finalmente (Wang et al., 2021) proponen un novedoso sistema que a diferencia de todos los vistos anteriormente, utiliza un sistema de cable y poleas para movilizar la extremidad del paciente desde la planta del pie. En este sistema el paciente coloca la extremidad a rehabilitar en el centro del sistema, y su pie es unido por cuatro diferentes cables, que se encargarán de establecer las diferentes posiciones de acuerdo con las tensiones de los cables. Debajo esta una caminadora que permite también movilizar la segunda extremidad del paciente. Este sistema ofrece una gran alternativa para la rehabilitación de andar, pero debido a la posición no es posible tampoco ser utilizado para pacientes que no pueden mantenerse parados.

## DESARROLLO

### *La extremidad inferior y su fisiología*

La rodilla se trata de unas articulaciones más utilizadas en el cuerpo humano, siendo indispensable para desplazarnos de un lugar a otro. Al contrario de la creencia popular, donde se considera que la rodilla funciona de manera similar a una bisagra, el movimiento que realiza la rodilla es un poco más complejo desde el aspecto biomecánico.

La rodilla puede tener una flexión que varía desde los 0° (medidos desde la parte femoral) hasta 120° a 160°, dependiendo de la posición de la cadera (McGinty et al., 2000)

Durante los movimientos de cadenas abierta y cerrada de la rodilla, los ligamentos sufren de modificaciones debido a la morfología de esta. La Figura 1 muestra los principales tipos de ligamentos que alteran su longitud debido al movimiento de la extremidad.



Figura 1 Partes de la rodilla.

El Ligamento cruzado posterior (LCP) evita que la tibia y fémur se deslicen sobre si mismos hacia atrás. El Ligamento cruzado anterior (LCA), al igual que el posterior, evita que la tibia y el fémur se deslicen hacia adelante sobre si mismos. Ambos ligamentos en conjunto ofrecen estabilidad a la rodilla cuando se realizan actividades como subir escaleras, correr o subir por una pendiente muy elevada. El Ligamento colateral medio permite la unión del fémur con la tibia. El ligamento colateral lateral evita que la rodilla tenga movilidad lateral y genu varo entre el fémur y la tibia. Por último, los meniscos son fibrocartílagos que se encargan de estabilizar las articulaciones del fémur y la tibia, evitar el rozamiento entre los huesos y servir como tope mecánico contra movimientos bruscos entre ambos segmentos.

Durante los ejercicios cinéticos de cadena cerrada, cuando la rodilla se flexiona, el ligamento cruzado posterior cambia su tamaño, presentando un alargamiento. Cuando el ligamento no puede estirarse más, la cabeza del fémur se desliza sobre la tibia para proporcionar la flexión, como se aprecia en la Figura 2.

Cuando se realiza el movimiento contrario, el estiramiento, el ligamento cruzado anterior se alarga hasta el punto en donde el cabezal del fémur requiere de un retroceso sobre la tibia para acoplarse correctamente, la Figura 3 muestra el efecto de este movimiento (McGinty et al., 2000)

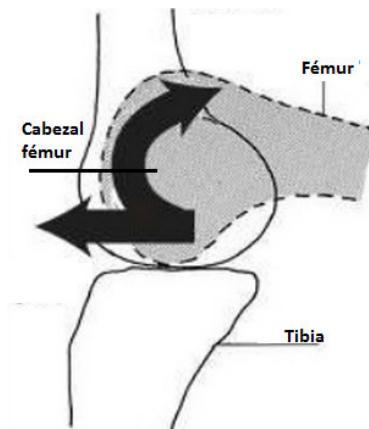


Figura 2 Comportamiento del cabezal del fémur (flexión).

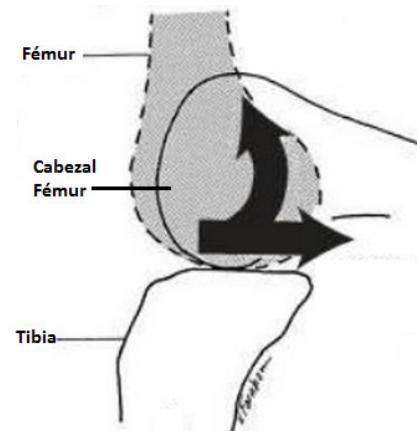


Figura 3 Comportamiento del cabezal del fémur (Estiramiento)

Como se pueden observar en la Figura 3, el movimiento de la rodilla provoca desplazamiento entre el fémur y la tibia, provocando que exista un alargamiento en los tendones.

Tanto en la Figura 2 y Figura 3, se puede observar más a detalle el movimiento generado en esta articulación. Conforme la rodilla se flexiona en el plano sagital. Este desplazamiento provoca un ligero alargamiento de la rodilla por un valor aproximado de 2 cm medida que la rótula se acopla a la nueva posición (Blackburne & Peel, 1977).

La morfología de la rodilla es comúnmente obviada por los diseñadores de sistemas de rehabilitación, lo que podría provocar una lesión interna para el paciente al presentarse una compresión innecesaria por permitir a la articulación desplazarse en la forma correcta.

Uno de los puntos a resolver durante el diseño del sistema es ofrecer un mecanismo que evite ello.

## PROPUESTA

En base al estado del arte y al planteamiento del problema, se ha sugerido la construcción de un sistema de dos grados de libertad que permita al terapeuta movilizar el miembro del paciente en cualquier grado de flexión que se desee. Se opta por una cadena cinemática abierto que nos permita movilizar el miembro en cualquier posición que el terapeuta establezca. Esta cadena de cinemática abierta ofrece ventajas sobre una cadena cinemática cerrado a no estar limitado por el mecanismo actuador, sin embargo, requiere de mayor atención en el torque requerido ya que no existe alguna base mecánica que ofrezca soporte a los eslabones.

Los movimientos que se replicarán en el rehabilitador serán la flexión y extensión, los cuales sirven para la rehabilitación de articulación de la rodilla, así como el de cadera. La Figura 4 muestra un sistema de dos barras propuesto para movilizar la extremidad inferior del paciente. El eslabón L1 representa el eslabón del fémur, que estará fijado a la cadera mientras el otro extremo soportará la tibia. El eslabón L2 es el eslabón de la tibia, encargada de sostener esta parte del miembro y a su vez mantiene al pie.



**Figura 4** Sistema de eslabones Pacientes.

Respecto al diseño de los eslabones del sistema, es necesario conocer el perfil del mexicano promedio, ya que el rehabilitador estará diseñado solo en pacientes adultos.

Estadísticamente, los pacientes mayores de 18 años que presentan menor estatura son las mujeres mexicanas, presentando un promedio  $155.3 \pm 7.1$  cm. Mientras que los pacientes con mayor estatura son los hombres, presentando un promedio de  $168.0 \pm 8.4$  cm. En cuanto al peso de los pacientes, las mujeres de menor estatura

presentan un promedio de 57 Kg., mientras que los hombres de mayor estatura presentan un promedio de  $66.4 \pm 13.1$  Kg. cómo se puede observar en la tabla 1.

**Tabla 1** Estadísticas peso/altura para mexicanos mayores de 18 años (Del-Rio-Navarro et al., 2007).

Sexo	Peso promedio (kg)	Altura promedio (cm)
Mujer	57.1	$155.3 \pm 7.1$
Hombre	$66.4 \pm 13.1$	$168.0 \pm 8.4$

Basándonos en estos datos, el rango de pacientes a atender varía desde los 1.5m hasta los 1.8m, con un máximo de 80Kg.

Por lo tanto, es necesario diseñar los eslabones considerando que pueden ser expandidos, capaces de adaptarse a cualquier longitud de extremidad dentro del rango de pacientes que considera. Para esto debemos considerar la antropometría del cuerpo, quien nos indica las proporciones de tamaño de cada parte de acuerdo a la estatura del paciente (Drillis et al., 1964). En este caso, el fémur tiene un 24.5% de la altura total del paciente, mientras que la tibia 28.5%.

Para el eslabón del fémur, se utiliza la ecuación 1 para determinar las longitudes máximas y mínimas.

$$F_l = 0.245(H) \quad (1)$$

donde  $F_l$  es la longitud del eslabón del fémur y  $H$  es la altura del paciente. Usando la ecuación 1, se determina que la altura máxima del eslabón de 0.441m y la mínima es de 0.365m.

Para determinar las medidas del eslabón de la tibia, se utiliza la ecuación 2.

$$T_l = 0.285(H) \quad (2)$$

donde  $T_l$  es la longitud de la tibia. Dada esta ecuación, nuestras longitudes máximas y mínimas para el eslabón de la tibia son de 0.513m y 0.427m.

Redondeando las medidas de ambos eslabones, se establece que ambos puedan desplazarse con un rango de 0.3m a 0.5m.

Una vez obtenida la altura, se debe considerar que, como se realizará una terapia pasiva, el paciente no ejerce fuerza para realizar la rutina, por tal motivo el sistema de transmisión del rehabilitador debe soportar el peso muerto de la extremidad, más el peso de los eslabones sobre el que se apoya.

Para ello utilizamos la tabla 2, que resume el estudio realizado por (Clauser et al., 1969), en donde las masas de cada extremidad del cuerpo son determinadas. Cada parte de la extremidad inferior está indicada en porcentaje del peso del paciente.

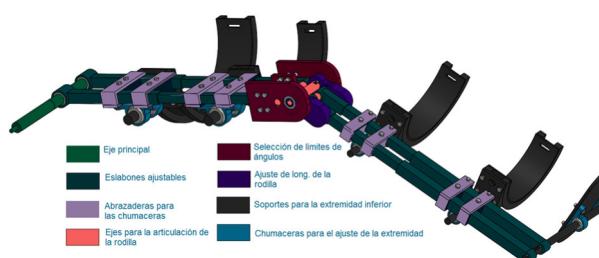
**Tabla 2** Porcentajes del peso total en partes y secciones del cuerpo humano.

.Parte	%Peso (paciente)
Fémur	10.3
Tibia y pie	5.8
Extremidad inferior (total)	16.1

Tomando en cuenta estas consideraciones, se desarrolló el eslabón (soporte de fémur y tibia) y el sistema de transmisión para el rehabilitador de extremidad inferior.

#### Eslabón

En la Figura 5 ese puede apreciar el eslabón diseñado para sostener la pierna del paciente, junto con sus partes esenciales.

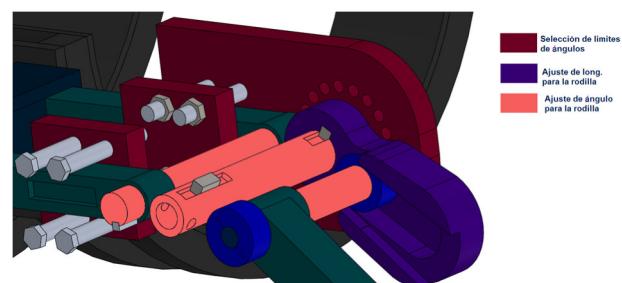


**Figura 5** Sistema de eslabones diseñados para el rehabilitador.

El eslabón posee cuatro soportes que son utilizados para que el paciente apoye el fémur y la tibia, al final del eslabón existe también un quinto soporte utilizado para la planta del pie. Las chumaceras son utilizadas para darle movilidad a los ejes que sostienen los soportes, y estos puedan acomodarse mejor a la morfología de la pierna del paciente. Estas chumaceras se encuentran unidas a la extremidad inferior mediante abrazaderas que pueden desplazarse por toda la estructura del

eslabón, y permiten adaptarse al tamaño de la extremidad del paciente. El eje principal es conectado directamente a la caja de transmisión, que será donde el torque se implementará para levantar el fémur, y soportará todo el peso de la extremidad del paciente y del eslabón; el eje de soporte de rodilla es donde se conecta directamente el motor que será el encargado de actuar la tibia.

En cuanto a la unión del eslabón de la tibia con el fémur, se desarrolló un sistema de acoplamiento que permite a la rodilla, poder desplazarse y adaptarse mejor a su movimiento biomecánico. En la figura 6 se puede ver con mayor detalle el sistema de articulación diseñado.



**Figura 6** Descripción de la articulación de rodilla en el sistema.

La articulación de la rodilla se desarrolló para ofrecer dos grados de movilidad al miembro del paciente durante la terapia. El eje que une el eslabón del fémur y la tibia puede desplazarse por la ranura del ajuste de longitud de rodilla, lo cual permite un desplazamiento máximo de 3cm. A su vez, este ajuste puede rotar hasta un ángulo máximo de 27°. La rotación del ajuste de longitud de la rodilla puede ser limitado físicamente, para ello se han implementado una matriz circular de barrenos sobre la placa donde se sostiene, de manera que se pueda insertar postes físicos en esta parte e impida la rotación de esta sección.

Esta articulación añadida durante la fase de rediseño presenta una ventaja del sistema sobre algunos mecanismos terapéuticos comerciales en donde no se contemplan. Este mecanismo permite que los eslabones se acoplen de una mejor manera a la estructura de la pierna, aumentando su tamaño y modificando su ángulo a petición de la extremidad. El deslizamiento del sistema se realizará por medio de baleros sobre los rieles del mecanismo en forma de ocho.

Ambos están conectados por un eje que permite movimientos uniformes en todo el mecanismo.

Para determinar los esfuerzos a los que estará sometido el sistema, y conocer si habrá o no una ruptura durante su utilización, un análisis estático fue realizado. Para ello se consideró el peso máximo del paciente, 80kg, y la altura máxima de 1.80m, y el miembro del paciente completamente extendido. Esta configuración demandaría el mayor torque para movilizar la pierna y a su vez ejercería el mayor esfuerzo sobre los ejes de sujeción. En la Figura 7 se muestra el análisis de esfuerzo de Von Mises, simulado en SolidWorks Simulation.

En un principio, se estableció que los cinco soportes del eslabón (dos de la parte del fémur, dos de la tibia y uno para la planta del pie) fueran fabricados de aluminio 6063-t6 por su fácil comercialización e implementación en sistemas médicos (Newson, 2002). Los ejes de acero AISI 1020. Con esto se obtuvo la densidad y masa del sistema, y más la del paciente se puede realizar un análisis estático.

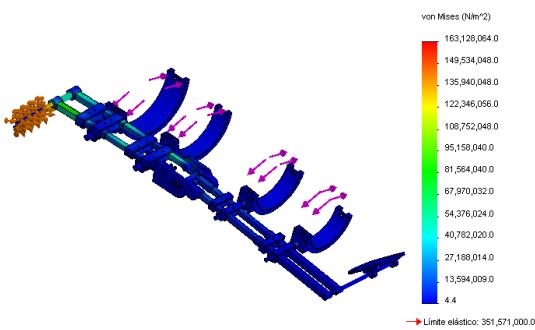


Figura 7 Esfuerzo de Von Mises.

Como se puede observar, el esfuerzo máximo se encuentra en el eje del fémur y es equivalente a 163Mpa. En la Figura 8, se muestra el análisis de factor de seguridad, que nos permite saber si el sistema podrá soportar la carga para la cual se está diseñando.

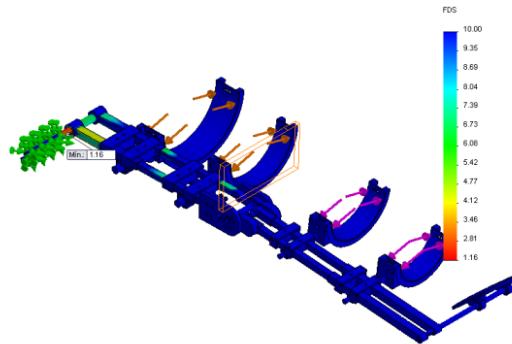


Figura 8 Gráfica de factor de seguridad.

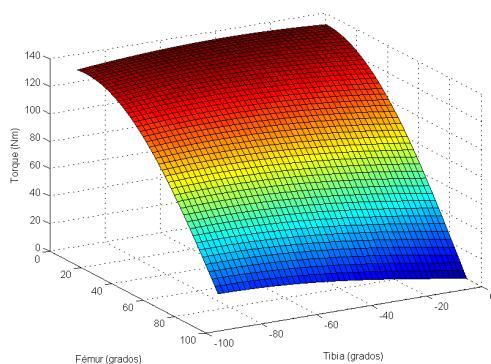
En este caso, el mínimo factor de seguridad es de 1.16, y se encuentra nuevamente en el eje del fémur. Esto significa que el sistema soporta hasta un 16% más de la carga máxima (recordando que la carga máxima es el peso de la pierna del paciente, más el peso del eslabón) a la cual está sometida por lo que podría considerarse suficiente para las pruebas con voluntarios sanos.

#### Caja de transmisión

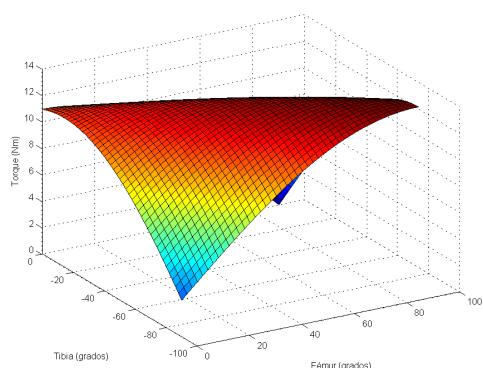
Como se mencionó, el objetivo es el de poder ofrecer un sistema de rehabilitación cuyos actuadores sean totalmente electromecánicos, para no depender de sistemas neumáticos o hidráulicos. Para poder determinar el tipo de motor a utilizar primero se debe calcular el torque que se debe ofrecer con cualquier configuración.

Utilizando el modelo dinámico de una cadena abierta de tres grados de libertad con fricción obtenido en (Alamilla Daniel, 2013), se obtuvo la superficie de torques requeridos por el sistema de acuerdo a los parámetros del mismo (Tabla 3).

La Figura 8 y la Figura 9 muestran las superficies de torques para el eslabón del fémur y la tibia respectivamente. Estas indican cuánto torque es requerido para cada posible configuración del eslabón durante una rutina.



**Figura 9** Superficie de torque para eslabón del fémur.



**Figura 10** Superficie de torque para eslabón de la tibia.

Para el motor de la tibia es requerido un máximo de 14Nm, mientras que el eslabón del fémur requiere 133.68Nm. Los actuadores seleccionados por su bajo costo y fácil adquisición son los motores de limpiaparabrisas, (*Wiper motor*) que ofrecen hasta 18Nm (Figura 10)



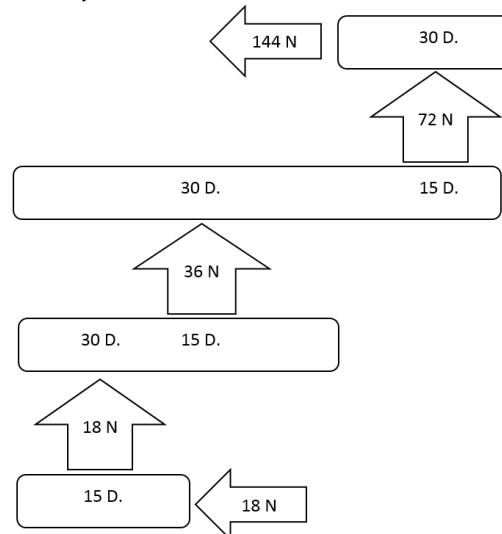
**Figura 11** Wiper motor.

Para el eslabón de la tibia, un solo *Wiper motor* es suficiente para actuarla, pero en el caso del fémur, es necesario utilizar una caja de transmisión que incremente el torque entregado por el motor. Se utiliza la ecuación 3 para determinar la relación necesaria que deberá entregar la caja de transmisión para lograrlo.

$$r = \frac{T_{requerido}}{T_{entregado}} = \frac{133.68}{18} = 7.426 \approx 8 \quad (3)$$

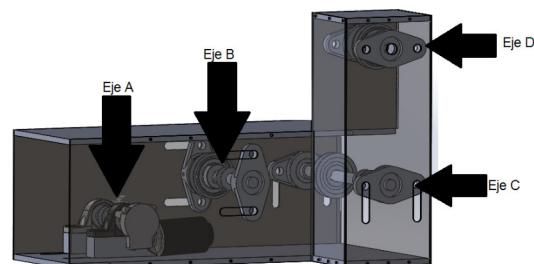
En ese caso se decidió redondear la relación a 1:8, por la facilidad para conseguir elementos con relaciones pares y en números enteros.

Para la relación de 8, se decidió también dividirla en 3 relaciones de 1:2, para obtener la misma ganancia de torque. En este caso la caja de transmisión fue realizada mediante sistema de cadena catarina por su facilidad de adquisición. En la Figura 11 se muestra el diagrama a bloques de la caja de transmisión.



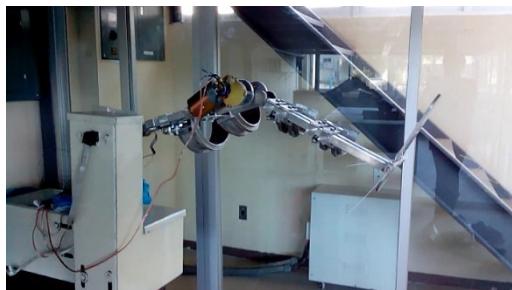
**Figura 12** Diagrama a bloques de la caja de transmisión.

Con una relación de 1:8, se obtiene un torque final de 144Nm, el cual es suficiente para poder actuar el eslabón del fémur. En la figura 12 se muestra la caja de transmisión diseñada.



**Figura 13** Diseño de la caja de transmisión.

En la Figura 13 se puede ver el eslabón implementado con la caja de transmisión.

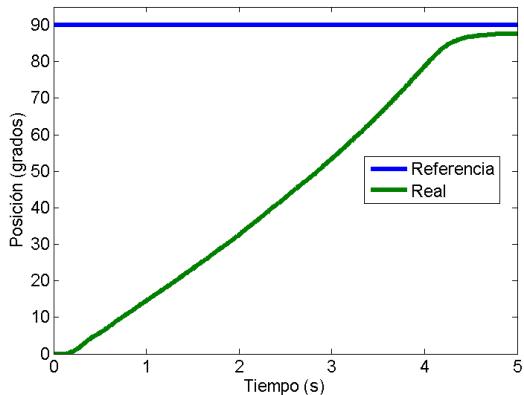


**Figura 14** Eslabón con caja de transmisión.

## RESULTADOS

Una vez construido el sistema, se conectaron al sistema de control y eléctrico que se había diseñado previamente para él. Se decidió hacer un control difuso implementando en una Arduino DUE propuesto por (Licona Rodríguez, 2013). Se realizaron pruebas de trayectoria, sin peso, para verificar que el sistema llegara a la posición deseada en cuanto a las rutinas que se realizaran.

Para el eslabón del fémur, se realizó una trayectoria ascendente con una referencia de 90°. La Figura 14 muestra los resultados obtenidos de la prueba.

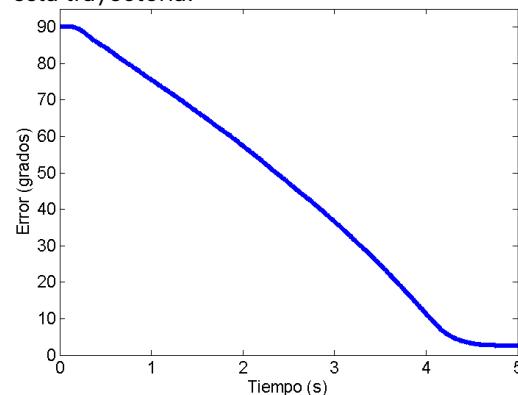


**Figura 15** Trayectoria del eslabón del fémur.

Utilizando el control difuso se puede apreciar que el sistema tiene un error estacionario de 2.46°, que representa un 2.7% de error de la referencia. Utilizando la máxima longitud de extremidad de un paciente, nos daría un arco de 3cm de diferencia entre la posición del pie con respecto a la cadera.

Para el eslabón de la tibia, se realizó una trayectoria descendente desde 90° hasta 0°. La

Figura 15, muestra los resultados obtenidos por esta trayectoria.



**Figura 16** Trayectoria del eslabón de la tibia.

Como se puede observar, el error estacionario en el eslabón de la tibia es de 1.75°, que representa el 1.8% de error respecto a la referencia. Esto daría un error de 1.3cm de diferencia entre la posición del pie con respecto a la rodilla.

## DISCUSIÓN

Los eslabones del rehabilitador fueron diseñados considerando el movimiento biomecánico de la rodilla, lo cual permite una mejor adaptación al movimiento de la extremidad, evitando lastimar al paciente durante la operación de la rutina.

Los eslabones fueron seleccionados de aluminio para aligerar el esfuerzo y el torque requerido.

La caja de transmisión permite incrementar el torque del motor seleccionado con una relación de 1:8, lo cual permite alimentar eléctricamente al sistema y no depender de sistemas neumáticos o hidráulicos para su operación.

En las pruebas que se realizaron, donde el máximo error de posición fue de 3cm para el fémur y 1.3cm para la tibia, se consideran aceptables en el rango de las terapias pasivas que se van a establecer; ya que, si bien rehabilitar el rango de movilidad del paciente es un objetivo de suma importancia, la mayoría de las veces los terapeutas realizan estas rutinas sin la ayuda de instrumentos de medición, basándose solo con la retroalimentación de dolor que otorga el paciente, y su experiencia.

## TRABAJO FUTURO

El prototipo del rehabilitador será sometido a dos etapas de evaluación. La primera será una evaluación con maniquíes la cual ayudará a evaluar diferentes leyes de control. Posteriormente, la segunda etapa será trabajar con pacientes y hacer un banco de pruebas para así evaluar la eficiencia del rehabilitador.

## REFERENCIAS

- Alamilla Daniel, M. de los A. (2013). *Desarrollo de un sistema de rehabilitación pasiva para extremidades inferiores en adultos*. Universidad Politécnica de Pachuca.
- Banala, S. K., Kim, S. H., Agrawal, S. K., & Scholz, J. P. (2009). Robot Assisted Gait Training With Active Leg Exoskeleton (ALEX). *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING*.
- Blackburne, J. S., & Peel, T. E. (1977). A new method of measuring patellar height. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 59(2), 241-242.
- Clauser, C. E., McConville, J. T., & Young, J. W. (1969). *Weight, volume, and center of mass of segments of the human body*.
- Dávila Castrodad, I. M., Recai, T. M., Abraham, M. M., Etcheson, J. I., Mohamed, N. S., Edalatpour, A., & Delanois, R. E. (2019). Rehabilitation protocols following total knee arthroplasty: a review of study designs and outcome measures. *Annals of Translational Medicine*, 7(S7), S255-S255. <https://doi.org/10.21037/atm.2019.08.15>
- Del-Rio-Navarro, B. E., Velázquez-Monroy, O., Santos-Preciado, J. I., Lara-Esqueda, A., Berber, A., Loredo-Abdala, A., Violante-Ortiz, R., & Tapia-Conyer, R. (2007). Mexican anthropometric percentiles for ages 10-18. *European Journal of Clinical Nutrition*, 61(8), 963-975.
- Drillis, R., Contini, R., & Bluestein, M. (1964). Body segment parameters. *Artificial Limbs*, 8(1), 44-66.
- Harib, O., Hereid, A., Agrawal, A., Gurriet, T., Finet, S., Boéris, G., Duburcq, A., Mungai, M. E., Masselin, M., Ames, A. D., Sreenath, K., & Grizzle, J. W. (2018). Feedback Control of an Exoskeleton for Paraplegics: Toward Robustly Stable, Hands-Free Dynamic Walking. *IEEE Control Systems*, 38(6), 61-87. <https://doi.org/10.1109/MCS.2018.2866604>
- Licona Rodríguez, A. R. (2013). *Instrumentación y control de un sistema mecánico para la rehabilitación de extremidades inferiores en adultos*. Universidad Politécnica de Pachuca.
- Lyu, M., Chen, W., Ding, X., Wang, J., Bai, S., & Ren, H. (2016). Design of a biologically inspired lower limb exoskeleton for human gait rehabilitation. *Review of Scientific Instruments*, 87(10). <https://doi.org/10.1063/1.4964136>
- McGinty, G., Irrgang, J. J., & Pezzullo, D. (2000). Biomechanical considerations for rehabilitation of the knee. *Clinical Biomechanics*, 15(3), 160-166.
- Newson, T. (2002). Stainless steel--A family of medical device materials. *This Article First Appeared in Business Briefing: Medical Device Manufacturing & Technology*.
- Rifaï, H., Mohammed, S., Djouani, K., & Amirat, Y. (2017). Toward Lower Limbs Functional Rehabilitation Through a Knee-Joint Exoskeleton. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(2), 712-719. <https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2565385>
- Roy, A., Krebs, H. I., Member, S., Williams, D. J., Bever, C. T., Forrester, L. W., Macko, R. M., & Hogan, N. (2007). Robot-Aided Neurorehabilitation: A Novel Robot for Ankle Rehabilitation. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, 569-580.
- Saso, J., Colombo, G., & Morari, M. (2004). Automatic Gait-Pattern Adaptation Algorithms for Rehabilitation With a 4-DOF Robotic Orthosis. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*.
- Vaida, C., Birlescu, I., Pisla, A., Ulinici, I. M., Tarnita, D., Carbone, G., & Pisla, D. (2020). Systematic Design of a Parallel Robotic System for Lower Limb Rehabilitation. *IEEE Access*, 8, 34522-34537. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2974295>
- Wang, Y., Wang, K., Zhang, Z., & Mo, Z. (2021). Control strategy and experimental research of a cable-driven lower limb rehabilitation robot. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(13), 2468-2481. <https://doi.org/10.1177/0954406220952510>
- WHO. (2021). *Rehabilitation WHO*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/rehabilitation>

# Un sistema subactuado con una interfaz de control de bajo costo para la educación de la ingeniería

H. A. Barrón-Pérez<sup>1</sup>, F. J. Torres-Del Carmen<sup>1</sup>, J. P. Ramírez-Paredes<sup>1</sup>, M. S. Arredondo-Martínez<sup>1</sup>

Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca. Carretera Federal Salamanca-Valle de Santiago  
km 3.5+1.8, comunidad Palo Blanco, Salamanca, Guanajuato, México. C.P. 36885.

Recibido: Agosto 31, 2021; Aceptado: Septiembre 11, 2021.

## Resumen (ÁREA TEMÁTICA: CI)

Este trabajo presenta el diseño, construcción y puesta en marcha de un péndulo invertido rotacional, controlado a través de una plataforma de bajo costo, el cual es considerado como un sistema subactuado para ser usado en prácticas de laboratorio de cursos en la educación de la ingeniería. El péndulo, construido de aluminio, es actuado en su brazo principal por un motorreductor de corriente directa con encoder incremental para conocer su desplazamiento angular, además, se incluyó un sensor giroscópico para obtener el ángulo de rotación del péndulo. El sistema de adquisición de datos, así como el control en lazo abierto del motor se llevaron a cabo sobre una minicomputadora Raspberry Pi en programación de lenguaje Python. Las pruebas experimentales han mostrado el correcto desempeño del sistema subactuado con la posibilidad de ser usado en prácticas de laboratorio de la educación de la ingeniería.

*Palabras clave:* Sistema subactuado, péndulo invertido rotacional, Python en Raspberry Pi.

## Abstract (AREA: CI)

This work presents the design, constructing and starting-up of a rotational inverted pendulum, controlled through a low-cost platform, which is considered like an underactuated system to be used in laboratory practices of courses in engineering education. The pendulum, made of aluminum, is actuated on its main arm by a direct current gearmotor with incremental encoder to know its angular displacement, in addition, a gyroscopic sensor was included to obtain the angle of rotation of the pendulum. The data acquisition system, as well as the open-loop control of the motor, were carried out on a Raspberry Pi minicomputer in Python programming language. Experimental tests have shown the correct performance of the underactuated system with the possibility of being used in laboratory practices of engineering education.

*Key words:* Underactuated system, rotational inverted pendulum, Python on Raspberry Pi.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas no lineales han sido objeto de interés entre los investigadores y educadores de la ingeniería. Estos sistemas se analizan en cursos como robótica, dinámica avanzada, mecanismos, sistemas de control, entre otros; en donde, comúnmente, se carece de prototipos que permitan realizar prácticas de laboratorio debido a ser dispositivos costosos por la complejidad del diseño y control.

Particularmente, el péndulo invertido rotacional es un sistema no lineal subactuado, lo cual significa que es mayor el número de grados de libertad al número de actuadores para realizar el movimiento dinámico que es modelado a través de un conjunto de ecuaciones diferenciales. En la literatura consultada, éste modelo se obtiene a partir de la formulación Euler-Lagrange (Duart et al, 2017) y (Balula, 2016). La implementación del control se ha desarrollado por medio del

analizar en cursos como robótica, dinámica avanzada, mecanismos, sistemas de control, entre otros; en donde, comúnmente, se carece de prototipos que permitan realizar prácticas de laboratorio debido a ser dispositivos costosos por la complejidad del diseño y control.

Particularmente, el péndulo invertido rotacional es un sistema no lineal subactuado, lo cual significa que es mayor el número de grados de libertad al número de actuadores para realizar el movimiento dinámico que es modelado a través de un conjunto de ecuaciones diferenciales. En la literatura consultada, éste modelo se obtiene a partir de la formulación Euler-Lagrange (Duart et al, 2017) y (Balula, 2016). La implementación del control se ha desarrollado por medio del

software licenciado Matlab, ya sea mediante una simulación numérica (Du y Cao, 2015) y (Bodily y Taylor, 2016) o mediante el entorno Real-Time Workshop (Valera et al, 2002), necesitando de una computadora de escritorio con gran capacidad de hardware y una tarjeta de adquisición de datos que relacione el entorno físico con el controlador del sistema.

La problemática se concibe en dos áreas, el software de programación para controlar y adquirir datos, así como el equipo computacional que cumpla con los requisitos mínimos de instalación y ejecución.

En este sentido, se ha notado un creciente uso del lenguaje Python, que ofrece grandes ventajas como el soportar varios paradigmas de la programación: la orientada a objetos, la estructurada, la imperativa o la funcional. Más aún, Python posee una licencia de código abierto, denominada Python Software Foundation License, que es compatible con la mero de actuadores para realizar el movimiento dinámico que es modelado a través de un conjunto de ecuaciones diferenciales. En la literatura consultada, éste modelo se obtiene a partir de la formulación Euler-Lagrange (Duart et al, 2017) y (Balula, 2016). La implementación del control se ha desarrollado por medio del software licenciado Matlab, ya sea mediante una simulación numérica (Du y Cao, 2015) y (Bodily y Taylor, 2016) o mediante el entorno Real-Time Workshop (Valera et al, 2002), necesitando de una computadora de escritorio con gran capacidad de hardware y una tarjeta de adquisición de datos que relacione el entorno físico con el controlador del sistema.

La problemática se concibe en dos áreas, el software de programación para controlar y adquirir datos, así como el equipo computacional que cumpla con los requisitos mínimos de instalación y ejecución.

En este sentido, se ha notado un creciente uso del lenguaje Python, que ofrece grandes ventajas como el soportar varios paradigmas de la programación: la orientada a objetos, la estructurada, la imperativa o la funcional. Más aún, Python posee una licencia de código abierto, denominada Python Software Foundation License, que es compatible con la

licencia pública general de GNU. Es multiplataforma, lo cual permite ejecutar el código fuente en varios sistemas operativos. Así, Python está siendo usado para propósitos de monitoreo y control. Por ejemplo, en (Truong-Duc-Duy, 2021) se emplean paquetes Python en un PLC Siemens S7-1200 para monitorear el lazo de control en un proceso térmico. (Minh, 2021) escribe el sistema de control completo en Python sobre un PLC para monitorear local y remotamente a un sistema de regulación de nivel de agua en un tanque individual.

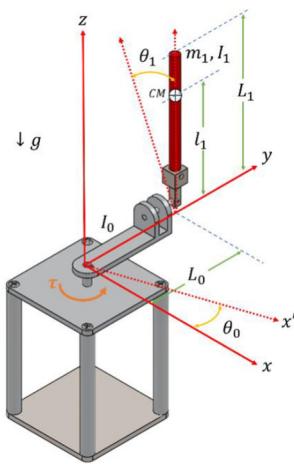
En la otra arista de la problemática, actualmente en la implementación del control, existe una tendencia hacia las minicomputadoras o tarjetas de desarrollo en placa, como la Raspberry Pi que soporta correctamente a Python. La combinación de Python en una Raspberry Pi 3B+ se puede encontrar en (Kamalakannan, 2019), donde se controla la velocidad de una banda transportadora actuada por un motor a pasos. Así mismo, (Ghani, 2021) controla un motor a pasos con código Python en una Raspberry Pi 4 como parte de un sistema de asistencia de manejo en tiempo real.

El objetivo de este artículo consiste en diseñar, construir y probar un péndulo invertido rotacional, considerado un sistema subactuado, en el cual se usa una Raspberry Pi y lenguaje Python para el control y adquisición de datos, como parte de una plataforma de control de bajo costo que permita la realización de prácticas de laboratorio en la educación de la ingeniería.

El resto del documento está segmentado de la siguiente manera: en la sección de Descripción del péndulo invertido se presentan las características y ecuaciones del péndulo invertido rotacional, en la sección de Diseño Mecánico se muestran los parámetros utilizados y el prototipo construido, en la sección de Control y Adquisición de datos se detallan los dispositivos usados, posteriormente, en la sección de Resultados se analizan las pruebas experimentales realizadas y, por último, se presentan las Conclusiones correspondientes.

## Descripción del Péndulo Invertido Rotacional

El péndulo invertido rotacional (PIR) es un mecanismo de dos grados de libertad (gdl) con dos articulaciones rotacionales y un solo actuador. El PIR consiste de 3 elementos principales: una estructura base donde se monta el motor eléctrico, un brazo rotacional y un péndulo. El eje del motor está conectado a un extremo del brazo giratorio haciendo que este gire completamente en un plano horizontal; el otro extremo del brazo tiene conectado el péndulo que gira libremente 360° en un plano vertical, como se aprecia en la Figura 1. Los parámetros son enunciados en la Tabla 1.



**Figura 1** Esquema de un péndulo invertido rotacional (PIR).  
 Fuente: (Duart et al, 2017).

**Tabla 1** Parámetros y simbología del PIR.  
 Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Símbolo
Masa del péndulo	$m_1$
Longitud del brazo	$L_0$
Longitud del péndulo	$L_1$
Longitud del centro de masa del péndulo	$l_1$
Momento de inercia del brazo	$I_0$
Momento de inercia del péndulo	$I_1$
Desplazamiento angular del brazo	$\theta_0$
Desplazamiento angular del péndulo	$\theta_1$
Aceleración de la gravedad	$g$
Par del motor eléctrico	$\tau$

Las ecuaciones dinámicas del PIR son dadas por:

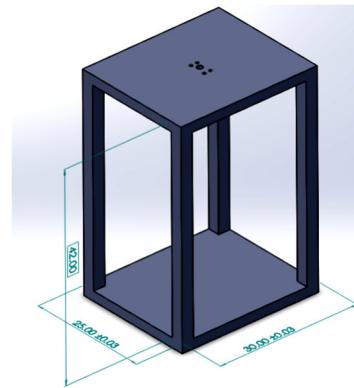
$$I_0\ddot{\theta}_0 + L_0^2m_1\dot{\theta}_0 + l_1^2m_1(\ddot{\theta}_0 \sin \theta_1 + 2\dot{\theta}_0\dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \cos \theta_1) + L_0l_1m_1(\ddot{\theta}_1 \cos \theta_1 - \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1) = \tau \quad (1)$$

$$I_1\ddot{\theta}_1 + l_1^2m_1\dot{\theta}_1 + L_0l_1m_1\dot{\theta}_0 \cos \theta_1 - l_1^2m_1\dot{\theta}_0^2 \sin \theta_1 \cos \theta_1 - m_1gl_1 \sin \theta_1 = 0 \quad (2)$$

## Diseño mecánico y construcción

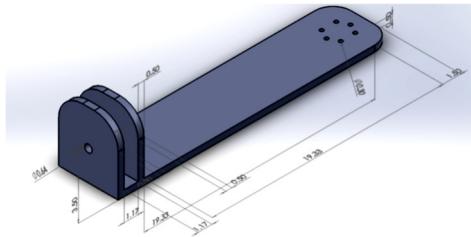
En consideración al PIR usado en (Duart, 2017) se diseñó en solidworks la estructura, brazo y péndulo del prototipo como se describe a continuación.

- La estructura base, ver Figura 2, consta de 4 barras de 40 x 2 x 2 cm y dos placas de 30 x 2 x 2 cm. La placa superior cuenta con las perforaciones correspondientes para el acoplamiento del motor.



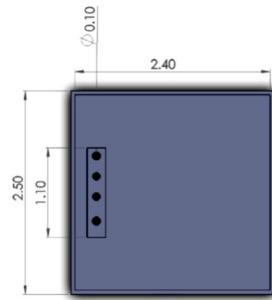
**Figura 2** Estructura base del PIR diseñado en este trabajo.  
 Fuente: elaboración propia.

- El brazo, ver Figura 3, tiene la finalidad de transmitir el par generado por el motor, está compuesto por una barra de 23 x 2 x 0.5 cm, 2 placas circulares con una perforación en el centro de 0.64 mm de diámetro. En la base del brazo se diseñaron 6 perforaciones de 0.3 mm de diámetro, las cuales permiten la unión con el acoplador para el motor eléctrico. Este acoplador se muestra en la Figura 4.



**Figura 3** Brazo del PIR diseñado en este trabajo.

Fuente: elaboración propia.



**Figura 6** Espacio en el péndulo para el sensor.

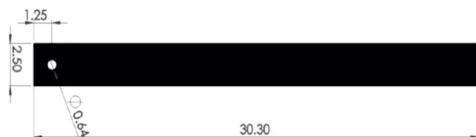
Fuente: elaboración propia.



**Figura 4** Acoplador para motorreductor 37d.

Fuente: (Sandorobotics, 2021)

- El péndulo, ver Figura 5, mide 30 cm x 2.5 cm x 2.5 cm, cuenta con un orificio de 0.64 cm de diámetro para poder acoplarlo al brazo, además de un espacio diseñado para insertar el sensor giroscópico (Figura 6), el cual exhibe 4 orificios para las conexiones correspondientes.



**Figura 5** Péndulo del PIR diseñado en este trabajo.

Fuente: elaboración propia.

La construcción de la estructura base y del brazo se realizaron con aluminio que permite llevar a cabo la manufactura de manera más sencilla que otro material como el acero. Se desestimó utilizar madera en éstos elementos que son la estructura de la parte estática del dispositivo, sin embargo, el péndulo se construyó con madera por ser un material más ligero que el aluminio. El PIR construido es mostrado en la Figura 7.

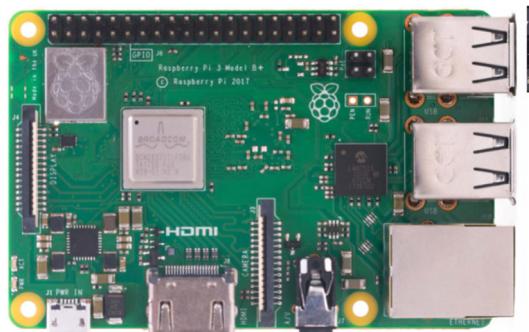


**Figura 7** PIR construido de acuerdo al diseño propuesto.

Fuente: elaboración propia.

## Control y adquisición de datos

El control y adquisición de datos se realiza a través de una minicomputadora Raspberry Pi (RPI) 3 model B+ (Figura 8), contiene un potente procesador de cuatro núcleos basado en ARM Cortex-A53 Broadcom BCM2837BO a 1.4 GHz y 1 GB de memoria RAM.



**Figura 8** Raspberry Pi 3 modelo B+.  
 Fuente: (Raspberry Pi, s.f.).

Para mover el brazo del PIR se utiliza un motorreductor de corriente directa (CD) que se controla en lazo abierto. Además, se necesita de un controlador de puente completo de alto amperaje (30 A), conocido comúnmente como *Driver*, particularmente se utilizó el VNH2SP30 que permite controlar un motor de corriente directa mediante una señal de modulación por ancho de pulso (PWM).

El motor de la Figura 9 es el usado en este trabajo y tiene las siguientes características: alimentación de 12 V, modelo CHIHAI GM4632-370, par nominal de 10.0 kg cm, factor de reducción 1:200, adicionado con un encoder de cuadratura de 2200 ciclos por rotación (cpr). Este encoder consiste de un sensor de efecto hall de dos canales para detectar la rotación de un disco magnético.



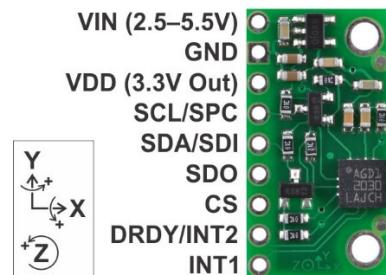
**Figura 9** Motorreductor 1:200 con encoder de 2200 cpr.  
 Fuente: (CHIHAI, s.f.).

Una vez conectado el encoder a los pines correspondientes en la RPi, es necesario declararlos dentro del código Python. El control de giro se realiza a través de la creación de dos variables que determinan el número máximo de pulsos del encoder antes de cambiar su sentido de giro, esto para realizar giros específicos a

máxima velocidad dentro de un rango de rotación en particular.

El control en lazo abierto del motorreductor hace girar el brazo del mecanismo que moverá el péndulo y se necesita conocer el desplazamiento angular denotado por  $\theta_1$ . Esta adquisición de datos se realiza mediante el sensor giroscópico L3G4200D y la RPi, utilizando Python.

EL L3G4200D, mostrado en la Figura 10, es un sensor de cambio angular de 3 ejes, de baja potencia, incluye un elemento de sensado y una interfaz I2C, tiene una escala completa de  $\pm 250/\pm 500/\pm 2000$  grados por segundo y puede operar en un rango de temperatura de - 40 °C a + 85 °C.



**Figura 10** Sensor giroscópico L3G4200D.  
 Fuente: (Pololu, s.f.).

Para utilizar el protocolo I2C del sensor, es necesario conectar los pines SDA y SCL del sensor a los pines correspondientes en el puerto GPIO de la RPi (2 y 5 respectivamente). Una vez conectado el sensor a la RPi y sabiendo su dirección en el bus, se vincula con Python mediante librerías y se configura su modo de trabajo mediante la función `write_byte_data(addr,reg,value)`. El sensor guarda los valores obtenidos en 2 registros separados, uno para los valores más significativos y otro para los menos significativos, esto se hace para los 3 ejes en los cuales se pueden tomar mediciones. En esta aplicación se trabaja con el eje x, el cual tiene los registros 28h y 29h. Para realizar la lectura de datos se utiliza la función `bus.read_byte_data(addr,reg)`.

En la Figura 11 se presenta el diagrama de conexiones de todos los elementos que se han descrito.

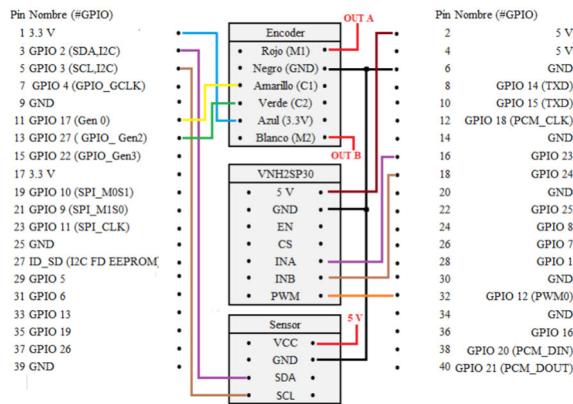


Figura 11 Conexión de los dispositivos empleados a la RPi.

Fuente: elaboración propia.

## Resultados

El costo total del dispositivo, incluida la instrumentación, controlador usado (minicomputadora Raspberry Pi) y manufactura, tuvo una inversión de \$2,800.00 MXN. Es importante destacar que un dispositivo de experimentación para propósitos de control es llevado a cabo en conexión con una computadora personal, lo cual, por sí sola excede el costo total del prototipo elaborado en este trabajo.

Después de haber construido el PIR, se montaron el motorreductor y el sensor, haciendo las conexiones correspondientes a la RPi, desde la cual se ejecutó el código de programación en Python para llevar a cabo las pruebas experimentales de la puesta en marcha del PIR como se observa en el fotograma de la Figura 12.

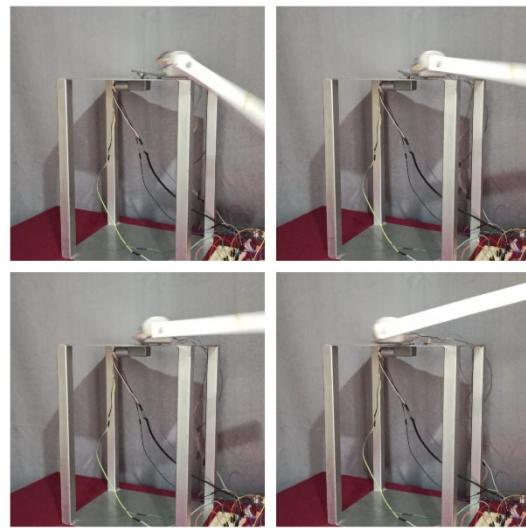


Figura 12 Fotograma de la puesta en marcha del PIR.

Fuente: elaboración propia.

Con la finalidad de encontrar el desplazamiento máximo posible alcanzado por el péndulo partiendo desde el reposo  $\theta_1 = 0$ , se realizan una serie de ejecuciones en las cuales se mantiene la velocidad máxima del motor con un ciclo de trabajo del 100% y se varía el rango de giro del brazo actuado por el motorreductor.

Los resultados son obtenidos a partir de un intervalo de 500 iteraciones, es decir el motor completa 500 giros en cada medición, tomando en cuenta 1 giro como el desplazamiento en ambos sentidos de giro (horario y anti- horario).

Las gráficas presentadas en la Figura 13, Figura 14 y Figura 15 muestran la respuesta  $\theta_1$  del péndulo cuando el brazo, actuado por el motorreductor, presenta un rango de rotación  $\theta_0$  de  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$  y  $\pm 75^\circ$  respectivamente.

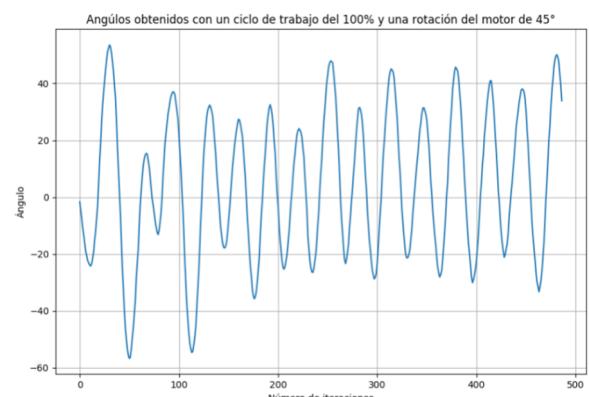
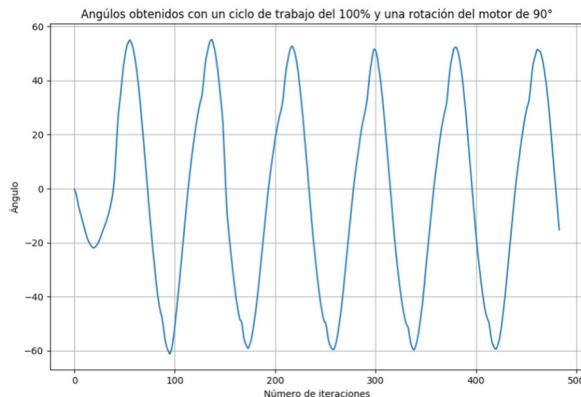
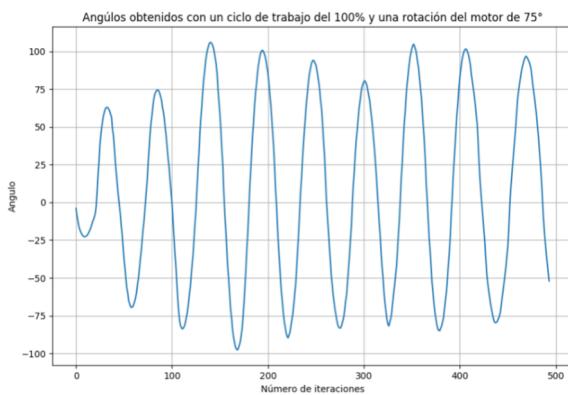


Figura 13 Respuesta del péndulo cuando el motor es controlado a una rotación de  $\pm 45^\circ$ .

Fuente: elaboración propia.



**Figura 14** Respuesta del péndulo cuando el motor es controlado a una rotación de  $\pm 90^\circ$ .  
 Fuente: elaboración propia.



**Figura 15** Respuesta del péndulo cuando el motor es controlado a una rotación de  $\pm 75^\circ$ .  
 Fuente: elaboración propia.

Tomando como referencia los resultados presentados, se puede observar que:

- Cuando el motor es controlado en lazo abierto a una rotación de  $\pm 45^\circ$ , el péndulo presenta oscilaciones con amplitudes variadas, lo cual permite identificar que el desplazamiento angular  $\theta_1$  máximo alcanzado es de  $50^\circ$  en el inicio.
- En la rotación del brazo de  $\pm 90^\circ$  se observa que las amplitudes de las oscilaciones del péndulo son prácticamente constantes, aunque en cantidad son menores oscilaciones respecto al caso donde el brazo rotó en  $\pm 45^\circ$ . Así, el desplazamiento angular  $\theta_1$  del péndulo fue de  $50^\circ$ .
- En el caso cuando el motor del brazo rotó en las posiciones de  $\pm 75^\circ$ , el péndulo presenta oscilaciones menores al caso de  $\pm 45^\circ$  y mayores al caso de  $\pm 90^\circ$ . Existe un desplazamiento angular

$\theta_1$  del péndulo mayor a los casos previos, alcanzando valores superiores a  $100^\circ$ , sin embargo las amplitudes de las oscilaciones no son constantes.

## Conclusiones

Se ha diseñado, construido y probado experimentalmente un péndulo invertido rotacional con características que permite ser considerado como una plataforma de control de bajo costo para posibles prácticas de laboratorio en la educación de la ingeniería.

La construcción del PIR se completó de manera satisfactoria, debido a que el resultado final de la implementación física de todos los componentes, coincide con el diseño propuesto y las propias simulaciones que genera el software de diseño usado.

La RPi en combinación con código Python han permitido adquirir los datos del encoder del motorreductor, así como del sensor giroscópico. Además, se ha controlado en lazo abierto el motorreductor a través del driver correspondiente, permitiendo obtener los datos del desplazamiento angular del péndulo en tiempo real para después ser mostrados en forma gráfica.

Las pruebas experimentales presentadas muestran que se pueden realizar diversas prácticas de laboratorio de cursos de la educación de ingeniería, como dinámica avanzada, sistemas de control, mecanismos, automatización, instrumentación, etc. Más aún, esta plataforma servirá para realizar trabajos futuros relacionados con la implementación de estrategias de control no lineal para propósitos de investigación aplicada.

## Referencias

Balula, A. S. Á. (2016). *Nonlinear control of an inverted pendulum* (Doctoral dissertation, M. Sc. Dissertation. Instituto Superior Técnico, Lisboa).

Bodily, D., y Taylor, P. (2016). Nonlinear Control of an Inverted Pendulum.

CHIHAI. (s.f.). GM4632-370 DC 12V 30RPM High torque Turbo Encoder. Banggood. Recuperado 30 de agosto de 2021, de [https://www.banggood.com/GM4632-370-DC-12V-30RPM-High-torque-Turbo-Encoder-Motor-Worm-Geared-Motor-Reducer-Motor-p-1069461.html?cur\\_warehouse=CN](https://www.banggood.com/GM4632-370-DC-12V-30RPM-High-torque-Turbo-Encoder-Motor-Worm-Geared-Motor-Reducer-Motor-p-1069461.html?cur_warehouse=CN)

Du, L., y Cao, F. (2015). Nonlinear controller design of the inverted pendulum system based on extended state observer. In *International Conference on Automation, Mechanical Control and Computational Engineering (AMCCT 2015)* (pp. 207-212).

Duart, J. L., Montero, B., Ospina, P. A., y González, E. (2017). Dynamic modeling and simulation of a rotational inverted pendulum. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 792, No. 1, p. 012081). IOP Publishing.

Ghani, S. A. C., Kettner, M., Aslan, F., Dzharuddin, F., y Sazali, N. (2021). Smart driving assistance system using Raspberry Pi and actuator networks. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1068, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.

Kamalakannan, M., y Devadharshini, K. (2019). Controlling the Speed of Conveyor Belt using Python-Raspberry Pi 3B+. *Oriental journal of computer science and technology*, 12(2), 57-64.

Minh, D. T., y Tan, P. V. (2021). Flatness-Based Single Tank Water Level Control Under Actuator Constraint. In *2021 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)* (pp. 1-4). IEEE.

Pololu. (s. f.). L3G4200D 3-Axis Gyro Carrier with Voltage Regulator. Pololu. Recuperado 30 de agosto de 2021, de <https://www.pololu.com/product/1272>

Raspberry Pi. (s. f.). Raspberry Pi 3 Model B+. Raspberry Pi. Recuperado 30 de agosto de 2021, de <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>

Truong-Duc-Duy, A., y Tan, P. V. (2021, June). A Python Framework for Model-Based Design, Commission and Monitor the Thermal Process. In *2021 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)* (pp. 1-4). IEEE.

Valera, A., Vallés, M., y Cardo, M. (2002). Desarrollo y Control de un Péndulo de Furuta. *Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad Politécnica de Valencia*. Camino de Vera, 14, 46022.

# Analysis of the vibratory response for a rotor-hybrid short journal bearing system with orbital movement pivoted with rigid shaft

D. E. Rivera-Arreola<sup>1</sup>, T. Hernández-Cortés<sup>1</sup>, H. F. Abundis-Fong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Pachuca.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Pachuca.

Recibido: Septiembre 01, 2021; Aceptado: Septiembre 11, 2021.

## Resumen (ÁREA TEMÁTICA: CI)

El objetivo de este trabajo es atenuar la respuesta vibratoria para un sistema de chumaceras cortas híbridas con puertos de inyección horizontal. Mediante la introducción de la función Dirac Delta en la ecuación de Reynolds, es posible simular la respuesta vibratoria del rotor respecto de un puerto específico de inyección de lubricante. Se analizaron dos casos particulares de estudio, cuando el puerto de inyección se ubica en  $\beta = 3\pi/2$  and  $\beta = \pi$ . Además, según el criterio de estabilidad de Lienard-Chipard, que involucra los coeficientes rotordinámicos de la película de aceite (amortiguación y rigidez), se calcula la velocidad umbral de estabilidad. Mediante la formulación matemática de espacio de estados, se realizaron simulaciones numéricas para obtener la respuesta vibratoria del sistema.

Los resultados muestran que la presurización externa se puede utilizar como una forma de atenuar el alto nivel de vibración en turbo máquinas.

**Palabras clave:** Función Delta de Dirac, Criterio de estabilidad de Lienard-Chipard, Chumacera híbrida.

## Abstract (AREA: CI)

The aim of this work is to attenuate the vibratory response for a rotor-hybrid short journal bearing system with horizontal oil injection ports. By mean of the introduction of the Dirac Delta function in the Reynolds equation is possible to simulate the vibratory response of the rotor regarding a specific oil injection port. Two particular cases of study were analyzed, when the oil injection port is located at  $\beta = 3\pi/2$  and  $\beta = \pi$ . Furthermore, by Lienard-Chipard stability criterion, which involves the oil film rotordynamic coefficients (damping and stiffness), the threshold speed of stability is calculated. By state-space mathematical formulation, numerical simulations were performed.

Results shown that the external pressurization can be used as a way to attenuate high vibration level in turbomachinery.

**Key words:** Dirac Delta function; Lienard-Chipard stability criterion; Reynolds equation; Hybrid short journal bearing.

## INTRODUCTION

Nowadays it is well known that an important mathematical tool is rotordynamic modeling, which is a way to interpret, determine and predict in a very real way the main dynamics characteristics for a rotor-hybrid short journal bearing system.

Donald-Bently corp. USA works with development of hybrid bearings obtaining some important results such as some graphs related to the stiffness, damping and frequency about the oil film. However, they omits to mention about the type of rotatory equipment and do not describe the external pressurization in the oil injection port. (Bently, 2019, pág. 499-515)

Seri A. Z. presented mathematical expressions to determine the pressure oil film in hydrodynamic journal bearing besides of some charts and tables with dimensionless values. (Andras, 205, pp. 88-146)

Others important researches such as Dara Childs and Michael Khonsari have showed specific models to determine the pressure oil film to hydrodynamic journal bearing derived from the Reynolds differential equation developed by physicist that carried his name. Today this expression it is used to characterizes as a basis for the analysis of hydrodynamic journal bearings. (Dara, 1993, pág. 132-223; K & E, 2008, pp. 143-171)

In 2003 I. F. Santos and F. Y. Watanabe published a work with active hybrid lubrication for journal bearings by means of computational fluid dynamics and control techniques, Concluded, that by controlling the flow and pressure one can obtain important changes in the forces of the oil film which considerably will affect the values of the stiffness of the oil film. (Santos & Watanabe, 2003, pp. 154-163)

Lately with new pressurized hybrid bearings designs, the stability threshold has been postponed, due to that the lubricant oil injection port considerably contributing to the stability of the mechanical system altering significantly the dynamic of the shaft. (Nosov, Rivera et al, 2010, pp. 29-36; Nosov, Rivera et al, 2013, pp. 74-92; Fedor, 2011; pp. 572-578)

Thus the present work keep on proposing a new mathematical model which it is used to simulate an oil injection port by mean of the Dirac Delta function to analyze the dynamic behavior of the vibratory response and the threshold speed of stability. Also the model can to be used like an easy and fast way to predict and interpret by simple graphs the dynamic behavior of the turbomachinery.

## II. Mathematical models for a hybrid short journal bearing

The Reynolds equation is the expression that is used to characterize the hydrodynamic journal bearing. This mathematical model studies a fluid film between to plates and currently is considering an important tool in order to predict the dynamic behavior of a shaft.

According to the movement of the shaft, the pressure field within a journal bearing is generated by the formation of a lubricant wedge due to that the shaft does not rotate concentrically with respect to it; since the eccentricity generates a displacement to journal bearing center. Thus, it is very important determinate the location of the maximum pressure and regions where the lubricant oil film can produce a cavitation (rupture). (Nosov, Gómez et al, 2011, pp. 595-601; Nosov & Gómez, 2010, pp. 233-238; Senthil, Thila et al, 2010, pp. 87-41) Therefore, Reynolds equation can be rewritten as:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + R^2 \frac{\partial}{\partial \theta} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 12\pi \frac{\mu R^2}{C_r^3} \left[ C_r \dot{\varepsilon} \cos \theta + C_r \varepsilon \left( \dot{\phi} - \frac{\omega}{2} \right) \sin \theta \right] \quad (1)$$

$$-\frac{L}{2} \leq z \leq \frac{L}{2}, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad h(\pi) = 1 + \varepsilon \cos \theta$$

$$p\left(\frac{L}{2}\right) = 0, \quad p\left(-\frac{L}{2}\right) = 0, \quad p(\theta+2\pi) = 0$$

where:  $p$  is the pressure, [Pa];  $\theta$  is the circumferential coordinate, [rad];  $z$  is the axial coordinate, [m];  $\phi$  is the equilibrium angle (attitud), [rad];  $C_r$  is the radial clearance, [m];  $e$  is the eccentricity, [m];  $\varepsilon$  is the dimensionless eccentricity,  $\varepsilon = e/C_r$ ;  $R$  is the journal bearing radius, [m];  $\mu$  is the dynamic viscosity, [Pa·s];  $H$  is the thickness of the oil film, [m];  $h$  is dimensionless thickness of the oil film,  $h = H/C_r$ ;  $\omega$  is the angular speed considering a counterclockwise, [rad/s];  $D$  is the journal bearing diameter, [m], and  $L$  the journal bearing length, [m].

Considering the stationary state, the equation (1) for a hydrodynamic journal bearings leads to:

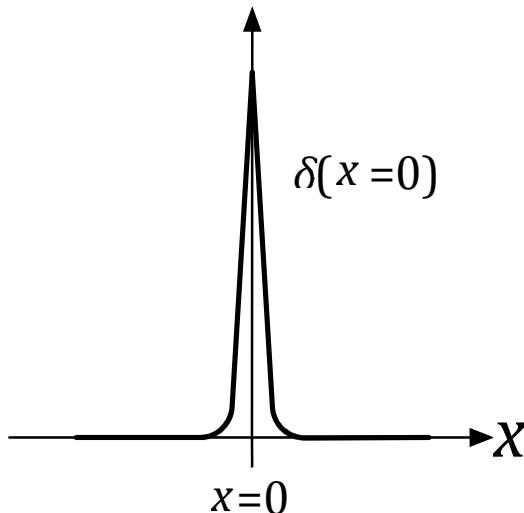
$$\frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right) = 12\pi \left( \frac{L}{D} \right)^2 (\varepsilon \sin \theta) \quad (2)$$

$-1 < \bar{z} < 1, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad \bar{p}(\bar{z}=\pm 1) = 0$   
 Solving the equation (2) for  $\bar{p}$  it is possible to calculate the pressure field for a short journal bearing without pressurization in dimensionless form. This expression is known as Ocvirk solution and is defined by [12], [13] and [14]:

$$\bar{p}_{ocv} = -6\pi \left( \frac{L}{D} \right)^2 \frac{\varepsilon \sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)} (1 - \bar{z}^2) \quad (3)$$

## III.- Mathematical model for the puntual pressurization

The mathematical model, which solves the pressurized case, presents an oil injection port. Therefore, to simulate the effect of the external pressurization in the hybrid journal bearing the generalized spatial Dirac Delta function is used, thus.



**Figure 1.** Graphical representation of the Dirac delta function.

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

The symbolic function  $\delta(x)$  represents the pressure in a point source located in  $x=0$ , and the accumulated pressure is known as the Heaviside function and is defined by [15]:

$$\Delta F_{\text{pres}} = \Delta p \cdot \Delta s \quad (5)$$

Where:  $\Delta F_{\text{pres}}$  is the pressurization force, [N];  $\Delta s$  is the Area of the oil injection port, [ $m^2$ ], and  $\Delta p$  is the pressure of the oil injection port, [Pa]. Thus, when  $\Delta s \rightarrow 0$ , then  $\Delta p \rightarrow \infty$  so that:

$$\Delta F_{\text{pres}} = \Delta p \cdot \Delta s = q = \text{constant} \quad (6)$$

These conditions allow to obtain the mathematical model that represents a pressurization point in dimensionless form described by the spatial Dirac delta function, thus:

$$(\Delta \bar{p})_{\text{prt}} = \bar{q}_{\text{prt}} \delta(z-a) \delta[\theta - (\pi + \beta - \phi)] \quad (7)$$

$$\bar{q}_{\text{prt}} = \frac{\Delta F_{\text{pres}}}{D L P_{\text{dim}}} = \frac{\Delta F_{\text{pres}}}{F_{\text{dim}}} \quad (8)$$

$$P_{\text{dim}} = \mu N \left( \frac{R}{C_r} \right)^2 \quad (9)$$

Besides,  $(\Delta \bar{p})$  is the dimensionless pressure in a punctual oil injection port;  $\bar{q}_{\text{prt}}$  is the

dimensionless pressure in a punctual port regard to the fictitious characteristic force;  $\delta(x)$  is the Dirac delta function;  $a$  is the arbitrary dimensionless axial position for the oil injection port;  $\beta$  is the angular coordinate of the oil injection port, [rad], and  $F_{\text{dim}}$  is the fictitious characteristic force, [N].

Then, by substitution of (7), (8) and (9) in (2) one can obtain.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right) = \left( \frac{L}{D} \right)^2 \bar{q}_{\text{prt}} \delta(z-a) \delta[\theta - (\pi + \beta - \phi)] \quad (10)$$

-1 <  $\bar{z} < 1$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ,  $\bar{p}(\bar{z}=\pm 1)=0$ ,  
 $\bar{p}(\theta+2\pi)=\bar{p}(\theta)$

Where the solution of the equation (10) for  $\bar{p}_{\text{pres}}$  gives:

$$\bar{p}_{\text{pres}}(\bar{z}, \theta) = \left( \frac{L}{D} \right)^2 \bar{q}_{\text{prt}} \frac{\delta(z-a) \delta[\theta - (\pi + \beta - \phi)]}{2(1+\epsilon \cos \theta)^3} \quad (11)$$

And considering the consequent approximation [16]:

$$\delta[\theta - (\pi + \beta - \phi)] = \frac{\bar{n}}{\sqrt{\pi}} e^{-\bar{n}^{-2} [\theta - (\pi + \beta - \phi)]^2} \quad (12)$$

one can obtain the total pressure field for a hybrid journal bearing by addition of the unpressurized mathematical model (classic case) equation (3) plus the pressurized solution (pressurized case) equation (11). Thus, the following expression is obtained in dimensionless form:

$$\bar{p}_{\text{ocv}} + \bar{p}_{\text{pres}} = -6\pi \left( \frac{L}{D} \right)^2 \frac{\epsilon \sin \theta}{(1+\epsilon \cos \theta)} (1-\bar{z}^2) + \left( \frac{L}{D} \right)^2 \bar{q}_{\text{prt}} \frac{\delta(z-a) \delta[\theta - (\pi + \beta - \phi)]}{2(1+\epsilon \cos \theta)^3} (1-a\bar{z} - |\bar{z}-a|) \quad (13)$$

There is established for the bearings, according to their diameter and the axial length, a mechanical device classification. When a journal bearing length is very small compared to its diameter ratio:  $L \ll D$

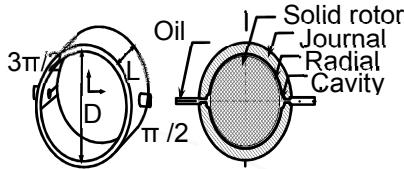
On this bases it probes:

$$\frac{L}{D} \leq \frac{1}{4}$$

#### 4. Two particular cases of study

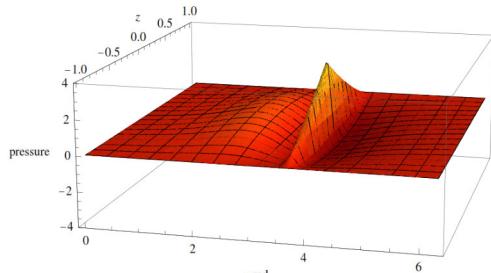
The present study is focused in two particular cases of analysis. First situation when the oil

injection port is placed in at  $\beta=3\pi/2$  and  $\beta=\pi/2$ . Figure 2 represents a cross section of the hydrodynamic journal bearing with horizontal oil injection ports. Where D is the diameter and L is the length.

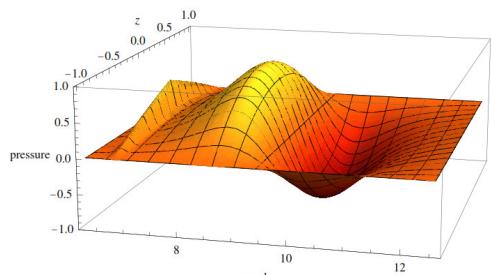


**Figure 2.** Schematic representation of a hybrid short journal bearing with horizontal oil injection ports.

Solving the equation (13) the pressure field for a hybrid short journal bearing with the oil injection ports in the horizontal plane is given



**Figure 3.**  $\theta=\pi/2.$ ,  $S=2.9171$ ,  $\varepsilon=0.4$ ,  $f_{pres}=20$ ,  $\varphi=40.1^0$



**Figure 4**  $\theta=3\pi/2.$ ,  $S=2.73$ ,  $\varepsilon=0.4$ ,  $f_{pres}=20$ ,  $\varphi=64.4^0$

Figure 3 and 4 depicts the effect of the external pressurization and the distribution of the oil film through the journal bearing. Clearly the location of the oil injection port influences in the distribution of the oil film.

## 5. Determination of the attitude angle (rotor position)

To determine the rotordynamics coefficients (stiffness and damping), which are essential for

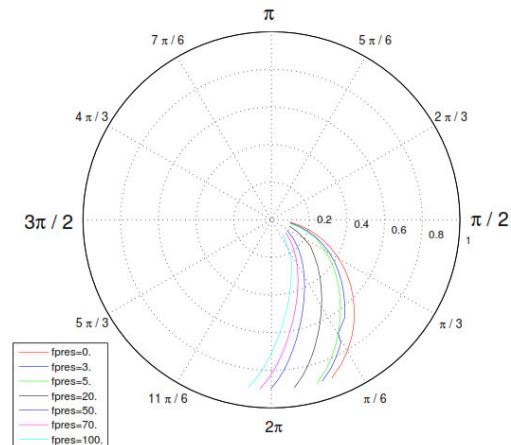
subsequent calculus in the dynamic analysis for a hybrid short journal bearing, the attitude angle denoted by  $\varphi$  (rad) is an important variable to take into account. Now considering the oil injection ports in the horizontal axis, the components of equation (13) leads to:

$$W-F_{dim} \left( \frac{L}{D} \right)^2 \left[ \frac{4\pi\varepsilon^2}{(1-\varepsilon^2)^2} \cos\phi + \frac{\pi^2\varepsilon}{(1-\varepsilon^2)^2} \sin\phi \right] + \\ \Delta F_{pres} \left( \frac{L}{D} \right)^2 \frac{(1-a^2)\cos(\pi+\beta)}{8[1+\varepsilon\cos(\pi+\beta-\phi)]^3} = 0 \quad (15)$$

$$F_{dim} \left( \frac{L}{D} \right)^2 \left[ -\frac{4\pi\varepsilon^2}{(1-\varepsilon^2)^2} \sin\phi + \frac{\pi^2\varepsilon}{(1-\varepsilon^2)^2} \cos\phi \right] + \\ \Delta F_{pres} \left( \frac{L}{D} \right)^2 \frac{(1-a^2)\sin(\pi+\beta)}{8[1+\varepsilon\cos(\pi+\beta-\phi)]^3} = 0 \quad (16)$$

Where:  $\beta$  is the angular location of the oil injection port, [rad] and W is the total weight of the system, [N].

Solving equations (15) and (16) for  $\varphi$  one can obtain the locus of equilibrium. Figures (5) and (6) are the graphical representation of the geometrical center rotor due to the consequence of the external pressurization. Properly, the position of the oil injection port yield a significant change in the dynamic behavior of the center shaft location.



**Figure 5.** Locus of equilibrium for  $\theta=\pi/2$ .

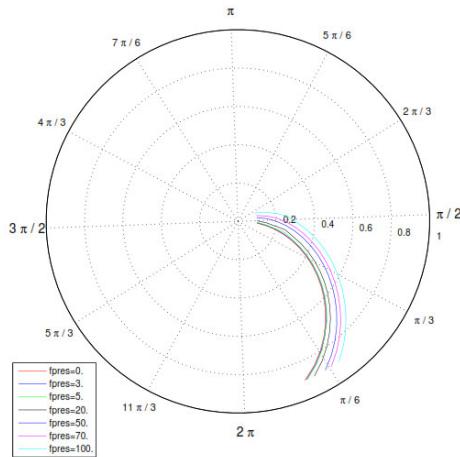


Figure 6. Locus of equilibrium for  $\beta=3\pi/2$ .

## 6. Threshold speed of stability

The equation (17) computes the threshold speed of stability for a configuration of rigid shaft by mean of the Lienard-Chipard stability criterion. This equation involves the oil film coefficients (damping and stiffness) and represents the threshold rate of stability in dimensionless form [17], [18] and [19]:

$$P_{\text{umbral}}^2 = \frac{\sum(c)\Delta(c)\Delta(c)}{\Delta(c)\sum^2(c)+\Delta^2(c,k)-\sum(c)\Delta(k)\Delta(c,k)} \quad (17)$$

Where:

$$\begin{aligned} \sum(c) &= C_{xx} + C_{yy} \\ \sum(k) &= K_{xx} + K_{yy} \\ \Delta(c) &= C_{xx}C_{yy} - C_{yx}C_{xy} \\ \Delta(k) &= K_{xx}K_{yy} - K_{yx}K_{xy} \\ \Delta(c,k) &= C_{xx}K_{yy} + C_{yy}K_{xx} - C_{xy}K_{yx} - C_{yx}K_{xy} \end{aligned}$$

Evaluating the equation (17) the threshold speed of stability for a hybrid short journal bearing with horizontal oil injection port is obtained.

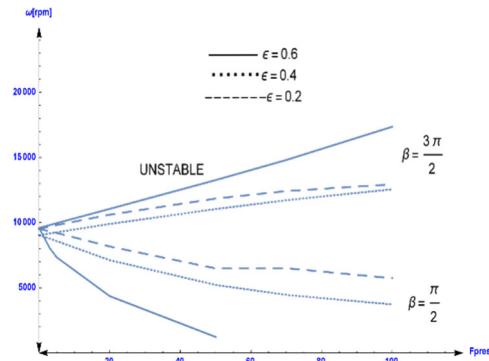


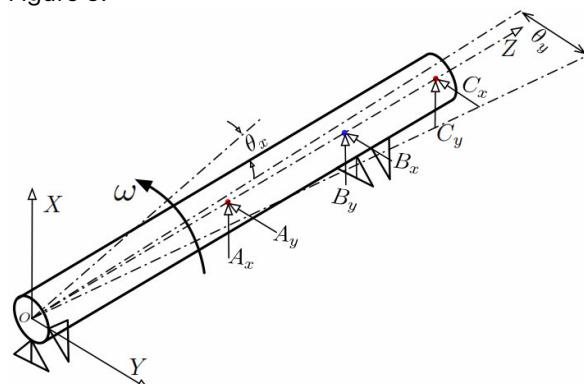
Figure 7. Threshold speed of stability considering a counterclockwise shaft rotation.

Figure 7 is a graphical representation of the angular speed (rpm) versus pressurization force (dimensionless). The curves shows the maximum speed that can be reached before the instability occurs.

The location of the oil injection port clearly has an important repercussion in the dynamic of the mechanical system. Also the increase of the external pressurization and the size of the eccentricity can be an important factor in the attenuation of the vibration control level.

## 7. Dynamic response for a hybrid short journal bearing with horizontal oil injection ports

To determine the vibration response of the rotor-hybrid short journal bearing system with the oil injection port in the horizontal plane a mathematical model with orbital movement pivoted is needed. This mathematical model was proposed by Nicoletti and Santos [20]; employing similar characteristics with the corresponding considerations the nonlinear analogous mathematical model is depicted in Figure 8:



**Figure 8.** Sections for a rigid shaft model.

### 7.1 Characterization for the mathematical model

With the purpose of simplifying the mathematical model with orbital movement pivoted, the next considerations must be assumed:

1.-Rigid shaft.

2.-Disks are equidistant to the bearing.

3.-Inertia moment of the shaft is ignored due to it is much smaller than the moment of inertia of the disks.

Thus, force  $A_x$  is generated by unbalance and the weight of the disk onto X-axis, and it is located through  $\overline{OA}=l/2$ . On the other hand,  $A_y$  is the unbalance force from disk on the Y-axis; forces on  $B_x$  and  $B_y$  are produced by oil pressure through  $\overline{OB}=(3/4)l$ , position of the hybrid short journal bearing. Forces in  $C_x$  are composed by the unbalance and weight of a second disk onto X-axis. Finally  $C_y$  is produced by unbalance of the second disk through the Y-axis and located at  $\overline{OA}=l$ .

Angular displacement are described by  $\theta_x$  and  $\theta_y$  respectively. Thus, the mathematical model is derived by Newton-Euler formulation (Nosov & Gómez, 2003, pp. 927-947).

$$I_0\ddot{\theta}_x + \left(\frac{9}{16}\right)^2 l^2 (C_{XX}\dot{\theta}_x(1+\tan^2\theta_x) + C_{XY}\dot{\theta}_y(1+\tan^2\theta_y) + K_{XX}\tan\theta_x + K_{XY}\tan\theta_y) = \left(\frac{1}{2}\right)m_{d1}(\dot{\phi}^2 e_1^x \cos\omega t - \dot{\phi}e_1^y \sin\omega t) + Im_{d2}(\dot{\phi}^2 e_2^x \cos\omega t - \dot{\phi}e_2^y \sin\omega t) \quad (18)$$

$$I_0\ddot{\theta}_y + \left(\frac{9}{16}\right)^2 l^2 (C_{YX}\dot{\theta}_x(1+\tan^2\theta_x) + C_{YY}\dot{\theta}_y(1+\tan^2\theta_y) + K_{YX}\tan\theta_x + K_{YY}\tan\theta_y) = \left(\frac{1}{2}\right)m_{d1}(\dot{\phi}^2 e_1^x \sin\omega t - \dot{\phi}e_1^y \cos\omega t) + Im_{d2}(\dot{\phi}^2 e_2^x \sin\omega t - \dot{\phi}e_2^y \cos\omega t) \quad (19)$$

In order to obtain the linear mathematical model it is assumed that:

$$\tan\theta_x \approx \theta_x \quad (20)$$

$$\tan\theta_y \approx \theta_y \quad (21)$$

Therefore, the linear mathematical configuration of equations (18) and (19) results:

$$I_0\ddot{\theta}_x + \left(\frac{9}{16}\right)^2 l^2 (C_{XX}\dot{\theta}_x + C_{XY}\dot{\theta}_y + K_{XX}\theta_x + K_{XY}\theta_y) = \left(\frac{1}{2}\right)m_{d1}(\dot{\phi}^2 e_1^x \cos\omega t - \dot{\phi}e_1^y \sin\omega t) + Im_{d2}(\dot{\phi}^2 e_2^x \cos\omega t - \dot{\phi}e_2^y \sin\omega t) \quad (22)$$

$$I_0\ddot{\theta}_y + \left(\frac{9}{16}\right)^2 l^2 (C_{YX}\dot{\theta}_x + C_{YY}\dot{\theta}_y + K_{YX}\theta_x + K_{YY}\theta_y) = \left(\frac{1}{2}\right)m_{d1}(\dot{\phi}^2 e_1^x \sin\omega t - \dot{\phi}e_1^y \cos\omega t) + Im_{d2}(\dot{\phi}^2 e_2^x \sin\omega t - \dot{\phi}e_2^y \cos\omega t) \quad (23)$$

Where:

$$I_0 = \left[ \left(\frac{1}{4}\right)m_{d1}r_{d1}^2 + m_{d1}\left(\frac{l}{2}\right)^2 \right] + \left[ \left(\frac{1}{4}\right)m_{d2}r_{d2}^2 + m_{d2}l^2 \right] \quad (24)$$

is the mass moment of inertia, [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ];  $I$  is the length of the shaft, [m];  $m_{d1}$  and  $m_{d2}$  are the mass of the disks [kg];  $r$  is the radial clearance, [m];  $e_1^x = e_2^x = e_1^y = e_2^y$  are the unbalance distance of the mass in the  $x$  and  $y$  direction, [m], and  $W=m_{dg}$  is the weight of the system, [N].

The equations to determine the rotordynamic coefficients in the dimension form are:

$$k_{ij} = \frac{W}{C_r} K_{ij} \quad (25)$$

$$c_{ij} = \frac{W}{C_r \omega} C_{ij} \quad (26)$$

Where,  $k_{ij}$  is the dimension stiffness coefficient in the direction  $i, j$  and  $c_{ij}$  is the dimension damping coefficient in the direction  $i, j$ .

In order to obtain a full description of the system and its response to any given set of inputs, the equations (22) and (23) in state-space are:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{M_1 - \left(\frac{9}{16}\right)^2 l^2 (C_{XX}x_2 + C_{XY}x_4 + K_{XX}x_1 + K_{XY}x_3)}{I_0} \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \end{aligned} \quad (27)$$

$$\ddot{x}_4 = \frac{M_2 - \left(\frac{9}{16}\right) l^2 (c_{yx}x_2 + c_{yy}x_4 + k_{yx}x_1 + k_{yy}x_3)}{l_0}$$

Where:

$$M_1 = \left(\frac{l}{2}\right) m_{d1} (\dot{\phi}^2 e_1^x \cos \omega t - \dot{\phi} e_1^y \sin \omega t) + \\ l m_{d2} (\dot{\phi}^2 e_2^x \cos \omega t - \dot{\phi} e_2^y \sin \omega t)$$

$$M_2 = \left(\frac{l}{2}\right) m_{d1} (\dot{\phi}^2 e_1^y \sin \omega t - \dot{\phi} e_1^x \cos \omega t) + \\ l m_{d2} (\dot{\phi}^2 e_2^y \sin \omega t - \dot{\phi} e_2^x \cos \omega t)$$

Now, in order to obtain dimension form of the equation (23) the following equality is used:

$$\Delta_x = \alpha l \tan \theta_x \quad (28)$$

$$\Delta_y = \alpha l \tan \theta_y \quad (29)$$

Where:  $\alpha$  is the distance of the pivot o to  $\overline{OB}$  of the shaft and  $\Delta_x$  and  $\Delta_y$  are in [m].

## 8. Simulation Results

Consider the new mathematical model, which it is used to simulate an oil injection port by means of the Dirac Delta function, to analyze the dynamic behavior of the vibratory response and the threshold speed of stability. To this end, the following is proposed:

1.  $l$  is the length of the shaft, 0.24 [m].
2.  $m_{d1} = m_{d2}$  are the masses of the disks, 0.8 [kg].
3.  $C_r$  is the radial clearance,  $71 \times 10^{-6}$  [m].
4.  $e_1^x = e_2^x = e_1^y = e_2^y$  are the unbalance distances of the masses in the direction x and y in meters.
5.  $W = m_d g$  is the weight of the system, 15.6[N].
6.  $r_{d1} = r_{d2}$  are disk radios, 0.0126 [m].

Then, by using (24) the  $l_0$  is obtained. Now in order to obtain the orbit of the center line shaft and the vibratory response, the equations (28) and (29) are:

$$\Delta_x = \alpha l \tan \theta_x = \frac{3}{4} (0.24) \tan \theta_x$$

$$\Delta_y = \alpha l \tan \theta_y = \frac{3}{4} (0.24) \tan \theta_y$$

$\Delta_x$  and  $\Delta_y$  in meters [m]. We remark that the system has been tested with the injection pressures for a range from 0 P to 20 P due to an analysis with hight pressure requires a lot of energy. Thus, the increase of pressure improves the behavior of the system by reducing the amplitude of vibration level.

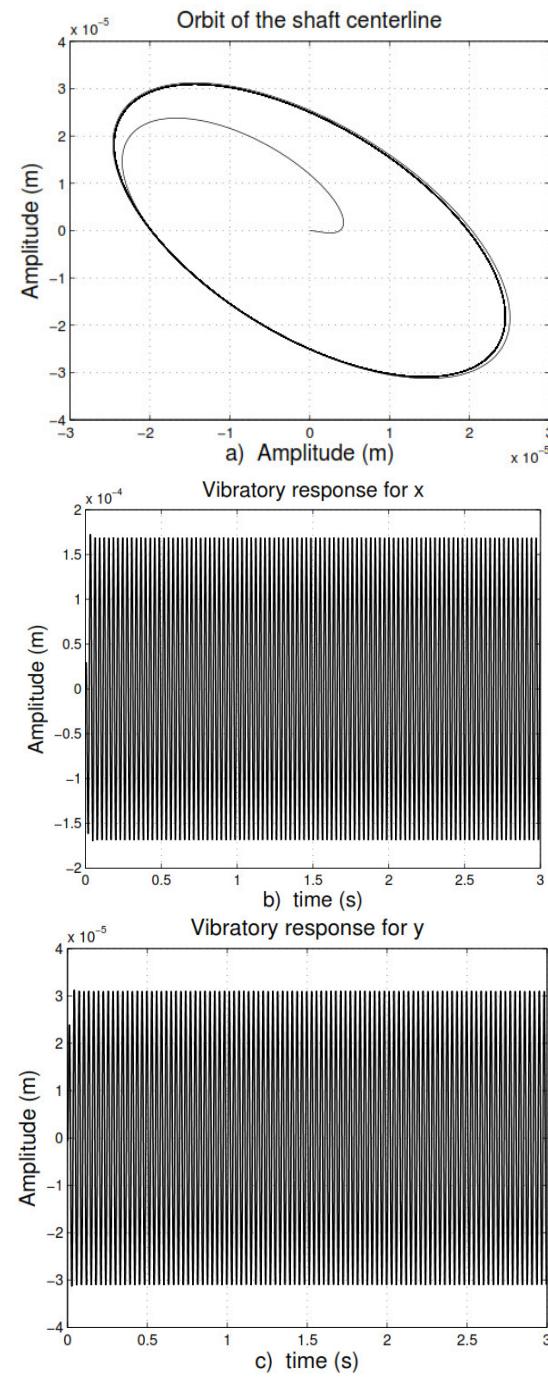
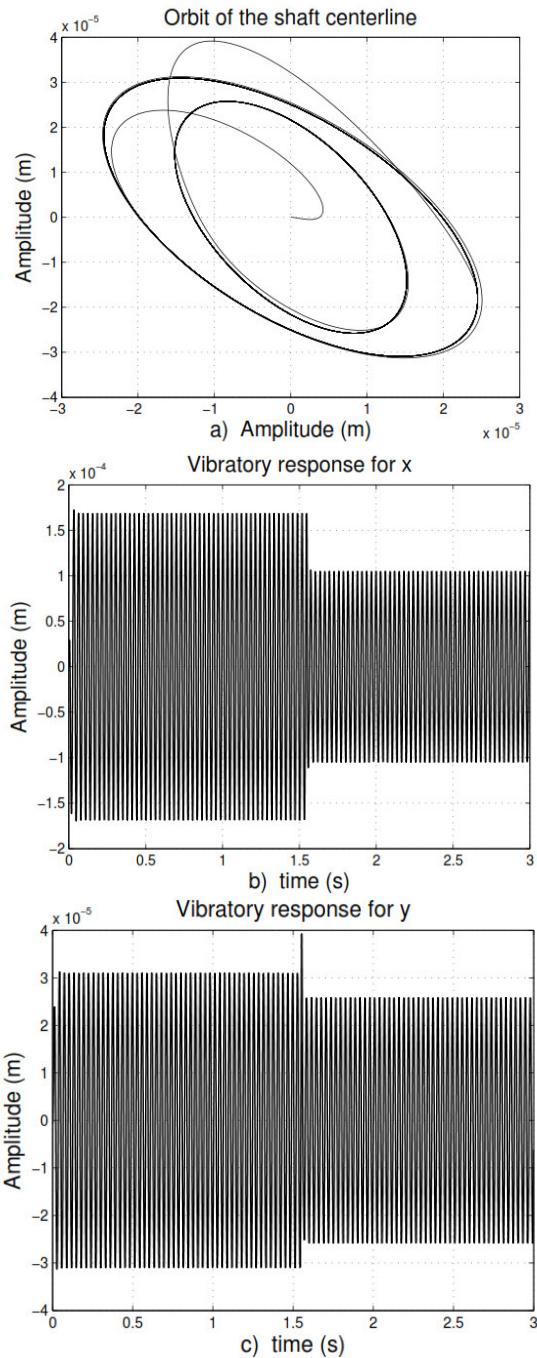


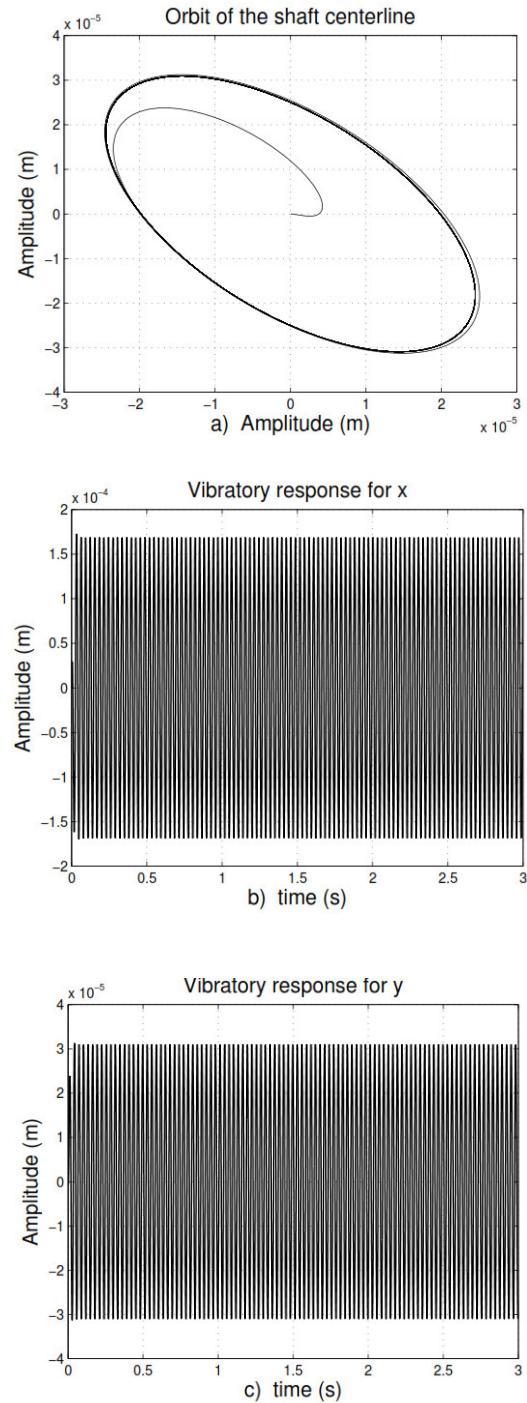
Figure 9 Results for the computer simulation with  $\theta=\pi/2$ ,  $\epsilon=0.4$  and  $f_{pres}=0$  and  $\omega=1980$  rpm.

a) orbit of the center shaft, b) amplitude response for x and c) amplitude response for y.



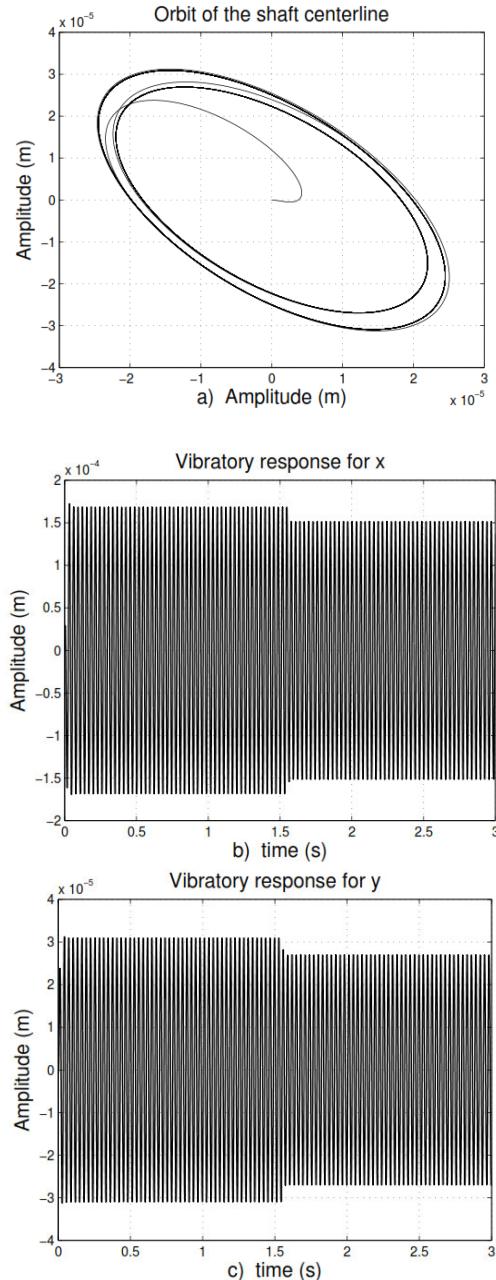
**Figure 10.** Results for the computer simulation with  $\theta=\pi/2$ ,  $\epsilon=0.5$  and  $f_{\text{pres}}=0$ , to  $f_{\text{pres}}=20$  and  $\omega=1980$  rpm. a) orbit of the center shaft, b) amplitude response for  $x$  and c) amplitude response for  $y$ .

Figure 9 represents the vibratory response for  $\beta=\pi/2$ ,  $\epsilon=0.4$  and  $f_{\text{pres}}=0$ . In this way there is not oil supply by external force. However, in the figure 10  $\beta=\pi/2$ ,  $\epsilon=0.5$  and,  $f_{\text{pres}}=20$  in this case the amplitude in the vibratory response was attenuated.



**Figure 11.** Results for the computer simulation with  $\theta=3\pi/2$ ,  $\epsilon=0.5$  and  $f_{\text{pres}}=0$  and  $\omega=1980$  rpm. a) orbit of the center shaft, b) amplitude response for  $x$  and c) amplitude response for  $y$ .

Figure 11 represents the vibratory response for  $\beta=3\pi/2$ ,  $\epsilon=0.5$  and  $f_{\text{pres}}=0$ . Similarly, as was shown in Figure 9 there is not external oil force.



**Figure 12.** Results for the computer simulation with  $\beta=3\pi/2$ ,  $\epsilon=0.5$  and  $f_{pres}=0$ , to  $f_{pres}=20$  and  $\omega=1980$  rpm. a) orbit of the center shaft, b) amplitude response for x and c) amplitude response for y.

In the Figure 12 external oil force is applied. The simulation depict an attenuation in the vibratory response, such as Figure 10.

The simulation results for the case  $\beta=\pi/2$  with  $P=0$  are depicted in Figure 9. These results confirm that a pressure  $P=0$  (also known as Ocvirk pressure) produces a similar response to

$\beta=3\pi/2$ , as you can see in the Figure 11. Nevertheless, for a supply of pressure equal to  $P=20$  a considerable attenuation in the response is generated as shown in the figures 10.

The dynamic behavior for  $\beta=\pi/2$  due to the supply of pressure gives a considerably reduction in the vibration level although the threshold speed of stability reaching low operating angular speed such as the Figure 7 depicts.

On the other hand, the figures 12 shows the orbit of the centerline shaft and the vibratory response for the axis "x" and "y" respectively when  $P=20$ . According to these graphics the oil injection port for  $\beta=3\pi/2$  requires more pressure than  $\beta=\pi/2$  to attenuate the amplitude of the response level. However, the port located in  $\beta=3\pi/2$  let postpone the instability of the system operating to high angular speed, maintaining an exceptional threshold speed of stability.

At this point two things must be noted:

1. Undoubtedly the stability of the system can be altered by the effects of the external pressurization
2. The correct location of the oil injection port can attenuate the amplitude of the vibration level.

## Conclusions

In this paper, a simplified model to determine the vibratory response for a hybrid short journal bearing with horizontal oil injection ports by means of the Dirac Delta function is proposed. Numerical simulations are performed to show that external pressurization can be used as a way to attenuate the vibration level of the overall system. Also, the analysis of stability determines that the dynamic behavior of the system is directly influenced by the position of the oil injection port which has a deep control in the rotor. Thus, the oil port located in  $\beta=3\pi/2$  has a better performance than  $\beta=\pi/2$  for mitigate the amplitude of vibration level. Besides, the oil port positioned in  $\beta=3\pi/2$ .

## References

- Donald-Bently E., (2019), Fundamentals of rotating machinery diagnostics, USA, Bob Grissom.
- Andras, Z.S., (2005), "Fluid film lubrication", Cambridge University Press.
- Childs-Dara, W., (1993) "Turbomachinery rotordynamics: Phenomena, modeling and analysis," Jhon Wiley and Sons.
- Michael, M.K., and Richard, B.E., (2008), "Applied tribology: bearing design and lubrication," Wiley-Interscience publication.
- Santos, I.F., Watanabe, F.Y., (2003), "Feasibility of influencing the dynamic fluid film coefficients of a multirecess journal bearing by means of active hybrid lubrication", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.
- Nosov, V.R., Gómez-Mancilla, J.C., Rivera-Arreola, D.E. and Ramírez, V.I., (2010), "Stationary position for hybrid journal bearing with horizontal Point injection ports", vol. (449), Trans Tech Publ. Key Engin. Mtl.
- Nosov, V.R., Rivera-Arreola, D.E., and Gómez-Mancilla, J.C., (2013), "Stability Threshold Velocity for a Hybrid Short Journal Bearing with the Injection Ports in the Symetric Points.", vol.(2), Journal of Scientific Research and reports.
- Fedor, J.V., (2011), "Journal Bearings with Arbitrary Position of Source", vol.(83), Journal of Fluids Engineering ASME.
- Nosov, V.R. and Gómez-Mancilla, J.C., and Meda-Campaña, J.A., (2011), "Occurrence of hydrodynamic cavitation", Water Sci Technol., vol. (64).
- Nosov, V.R., and Gómez-Mancilla, J.C., (2010), "On the Appearance of Lubricant Film Rupture in Cylindrical Journal Bearings," vol(47) Tribology Transactions.
- Senthil-Kumar, M., Thila, P. R. and Anbarasu, E., (2010), "Numerical analysis of hydrodynamic journal bearing under transient dynamic conditions", 82(2), MECHANICA.
- Ocvirk, F.V., (1952), "SHORT-BEARING APPROXIMATION FOR FULL JOURNAL BEARINGS", pp. 1-61, NASA Technical Reports Server (NTRS).
- Kanwal, R. P., (1998), "Generalized functions:theory and applicaion," Birkhauser.
- Stachowiak, G. W. and Andrew, A. W., (2005), "Engineering tribology," Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Rodkina, A., Nosov, V.R., and Gómez-Mancilla, J.C., (2002), "On application of Kharitonov theorem to analyse the stability of journal bearings", Beer-Sheva University.
- George, A., Hans, W., Frank, H.E., (2000), "Mathematical Methods for Physicists", ELSEVIER.
- Martinez, E., Nosov, V.R., and Gómez-Mancilla, J.C., (2004), "Mathematical Methods for Physicists", 15(2), pp. 83-90, CENTRO DE INFORMACION TECNOLOGICA.
- Gómez-Mancilla, J.C., Nossov, V.R. and Silva Navarro, G., (2005), "Rotor bearing system stability performance comparing hybrid versus conventional bearings", 2005(1), pp. 16-22, International Journal of rotating Machinery.
- Paulo-Flores, Pimienta-Claro, J.C., and Jorge Ambrosio, (2006), "Journal Bearing Subjected to dynamics loads: The analytical Mobility Method", 137(1), pp. 115-127, Revista de Asociación Portuguesa de Análisis Experimental de Tensores.
- Nosov, V.R., and Gómez-Mancilla, J.C., and Meda-Campaña, J.A., (2003), "Linear and non-linear control techniques applied to actively lubricated journal bearings", 260(5), ELSEVIER.
- Gómez-Mancilla, J.C., Meda-Campaña, J.A., Torres-Cedillo, S.G., Nossov, R.V., (2009), "Model Derivation and Numerical Simulation for a Pivoted Rigid Rotor-Bearing system", vol.(15), pp. 89-94, Trans Tech Publications, Key Engineering Materials.

# Algoritmo para la corrección de medición en posición mediante un acelerómetro para tractores autónomos agrícolas

G. Hernández-Romero<sup>1</sup>, J. Ramos-Fernandez<sup>1</sup>, V. Lopez-Morales<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Pachuca, Carr. Pachuca-Cd Sahagún Km. 20, Ex-Hacienda de Santa Bárbara, Zempoala, Hidalgo, México.

<sup>2</sup>UAEH-ICBI-Ctro. inv. Tec. Inf. & Sist., Carr. Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, Col. Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

Recibido: Septiembre 07, 2021; Aceptado: Septiembre 21, 2021.

## Resumen

Debido a las irregularidades de las superficies que existen en los campos agrícolas, los trabajos de labranza mediante robots autónomos representan un gran reto en cuanto al diseño de sistemas de control, ya que estos deben ser amigables con los usuarios y atender los requerimientos que presentan dichos campos agrícolas. Para esto se propone el desarrollo tecnológico de robots tractores que ayuden a mejorar estos trabajos.

El objetivo de este artículo es el de desarrollar un algoritmo basado en técnicas de inteligencia computacional, para la creación de un robot tractor autónomo. Una tarea fundamental es la de describir la orientación del robot móvil, lo cual se logra, utilizando los ángulos de orientación de Euler y de acuerdo con un marco de coordenadas de referencia con respecto del terreno a trabajar. Con el fin de describir la orientación del robot móvil (robot tractor), se muestran algunos resultados obtenidos en simulación y en tiempo real con un sensor de aceleración.

*Palabras clave:* Tractor autónomo, agricultura de precisión, orientación, mecatrónica.

## Abstract

Due to the surface irregularities in the agricultural fields, autonomous agricultural tillage represents a challenge in terms of the design of the user-friendly control systems that meet these dynamic requirements. Thus, a scientific and technological development is proposed for helping robot tractors, to improve agricultural tasks. The goal is to develop an algorithm based on computational intelligence techniques to implement in an autonomous tractor robot. An important task is to describe the orientation of the mobile robot, achieved by using the Euler orientation angles, according to an orientation's reference with respect to the agricultural fields. Obtained results are shown in simulation and in real time with an accelerometer sensor, to describe the orientation of a mobile robot (tractor robot).

*Key words:* Autonomous tractor, precision agriculture, orientation, mechatronics.

## INTRODUCCIÓN

La robótica en los sistemas agrícolas debe de ser segura para el medio ambiente y la población, además de procurar ser lo más económica, eficiente y con ayuda de monitoreo y administración en tiempo real (Noguchi, 2018). Recientes investigaciones en el estudio de los robots agrícolas se concentran en aplicaciones específicas como el control de las malas hierbas, de los cultivos y las plagas (Noguchi & Barawid, 2011). Para esto, actualmente se realizan diversas investigaciones para el desarrollo integral de un sistema de agricultura robotizada que pueda aplicarse en todos los trabajos agrícolas desde la

siembra/plantación hasta la cosecha (Noguchi & Barawid, 2011).

A lo largo de la historia, la agricultura ha evolucionado de una actividad manual a una actividad altamente automatizada, utilizando una amplia variedad de herramientas, implementos y máquinas (Zhang & Noguchi, 2017).

Los campos agrícolas tienen varias ventajas para desarrollar sistemas de guiado autónomo, ya que las parcelas de cultivo generalmente no cambian su estructura física y en consecuencia las dimensiones de trabajo agrícola son constantes. Así, los puntos de referencia pueden

colocarse de manera sistemática en las esquinas de un campo y representarse en un sistema de coordenadas x-y-z (Liangliang & Noguchi 2014). Normalmente, los cultivos agrícolas que se siembran en una parcela son siempre las mismas variedades, en los mismos lugares y puede ser fácilmente distinguido por una máquina, previa identificación del patrón de la forma de las plantas (Perez-Ruiz & et al, 2012). Por tanto, aunque hay más desventajas que ventajas para la realización agrícola de guía autónoma del tractor, hay suficiente investigación y logros para promover su desarrollo (González & et al, 2009).

Hoy en día en universidades y centros de investigación, se proponen formas de aumentar la producción de alimentos sin comprometer la conservación del medio ambiente (García & Flego, 2008). Una forma viable de aumentar la producción de comida consiste en integrar las nuevas tecnologías con gran impacto en la agricultura, como el GPS (sistema de posicionamiento global), información espacial, tecnología robótica, láser escáneres, CCD (cámara de carga acoplada) y giroscopios (Nagasaki & et al, 2008). Para esto, se requiere de avances considerables en la investigación científica y el desarrollo tecnológico, así como la participación de los diferentes sectores (social, civil y gubernamental), para llevar estas soluciones a la automatización de las tareas agrícolas (Noguchi, 2018).

Una de las principales dificultades de automatizar un tractor autónomo para que siga fiablemente un carril de cultivo (surco), es que la dinámica del sistema está cambiando constantemente. Esto se debe a diferentes factores como las irregularidades del suelo, el clima, los cambios en la velocidad de conducción y la carga de sus aditamentos (arado, cosechadora, etc.). Esto hace, que el diseño de un controlador de seguimiento de trayectoria sea una tarea difícil, ya que es necesario encontrar el conjunto de parámetros óptimos del controlador para cada variación dinámica (Barawid, & Noguchi, 2011). Por tanto, la motivación última de este artículo es la de obtener una ley de control robusta y adaptable para mejorar el tiempo en la implementación y el ajuste de los parámetros del controlador.

La agricultura automatizada es compleja en su desarrollo y aplicación y es así como se acuña el término de *Agricultura de Precisión*, que es un área interdisciplinaria de la ingeniería. Tal como se define en (García & Flego, 2008), la agricultura de precisión “aplica la cantidad de insumos correcta en el momento adecuado y en el lugar exacto”. La agricultura de precisión involucra el uso de las tecnologías de la información, así como también del GPS, entre otros (Perez-Ruiz & et al, 2012).

Debido a que los terrenos agrícolas no son uniformes, esto ocasiona que el sistema de guiado comience a tener variaciones en las mediciones, originados por la orientación del tractor con respecto al terreno de cultivo.

Así, en (Liangliang & Noguchi 2014) se propone un algoritmo útil para hacer la corrección de coordenadas de un robot móvil por medio de las mediciones de la cinemática y de los ángulos de orientación de Euler.

Para tres de los eventos más comunes a los que se enfrentan los tractores en su día a día para realizar sus labores, se realizaron simulaciones con un algoritmo basado en la matriz de orientación de Euler con mediciones de 0 a 15 grados mediante un acelerómetro y un sistema de adquisición datos con Arduino y una computadora personal, para así corregir la descripción de la posición de un tractor autónomo. El análisis y los resultados obtenidos se encuentran expresados a continuación.

## DESARROLLO

Importancia de la medición de los ángulos de orientación para la navegación autónoma de tractores agrícolas.

Los ángulos de orientación representan una parte fundamental para la navegación de tractores y vehículos autónomos. Debido a que los terrenos de cultivo son superficies irregulares, estos pueden presentar obstáculos los cuales desviarían de la trayectoria al tractor respecto de sus coordenadas establecidas o bien alterar la descripción de las coordenadas de posición. En la Figura 1, se muestran los ángulos de orientación del tractor con respecto de su marco base, donde  $\theta_r$ ,  $\theta_p$  y  $\theta_\phi$ , representan los ángulos de cabeceo, alabeo y de rumbo

respectivamente. Para ubicar el RTK-GPS, se toman las distancias  $a$ ,  $b$  y  $h$  con respecto al marco base, estas distancias se muestran en la Figura 1.

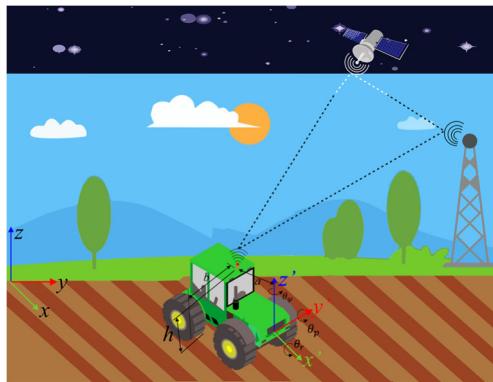


Fig. 1. Marcos de referencia y ángulos de orientación del tractor. Fuente (Elaboración propia)

Para realizar la corrección del error de posición inducido por la inclinación del tractor con los ángulos de Euler, se utiliza un algoritmo (Liangliang & Noguchi, 2014) donde la ecuación (1) describe esta corrección de posición.

$$P' = P - E * A \quad (1)$$

$$P' = [x', y', z']^T \quad (2)$$

$$P = [x, y, z]^T \quad (3)$$

$$A = [a, b, h]^T \quad (4)$$

donde  $h$  es a la altura de la antena desde la superficie del suelo en vertical del eje  $z$ ,  $a$  es la distancia del origen del sistema de referencia del tractor,  $b$  es la distancia del punto medio del sistema de tracción a una de las llantas,  $P'$  son las coordenadas corregidas y  $[x, y, z]^T$  son las coordenadas medidas por el equipo RTK-GPS,

La literal  $E$  es una representación de los ángulos de Euler con respecto a los ángulos de orientación del tractor, que se muestran (5).

$$E = \begin{bmatrix} \cos \theta_r \cos \theta_p + \sin \theta_r \sin \theta_p \sin \theta_\phi & \cos \theta_p \sin \theta_p & -\cos \theta_r \sin \theta_p \sin \theta_\phi + \sin \theta_r \cos \theta_\phi \\ -\cos \theta_r \sin \theta_p + \sin \theta_r \sin \theta_p \cos \theta_\phi & \cos \theta_p \cos \theta_\phi & -\cos \theta_r \sin \theta_p \cos \theta_\phi - \sin \theta_r \sin \theta_\phi \\ -\sin \theta_r \cos \theta_p & \sin \theta_p & \cos \theta_r \cos \theta_\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

## METODOLOGÍA

Para la corrección de los datos de navegación en tiempo real se requiere la lectura del GPS y un acelerómetro para realizar la corrección de posición (cf. Figura 2).

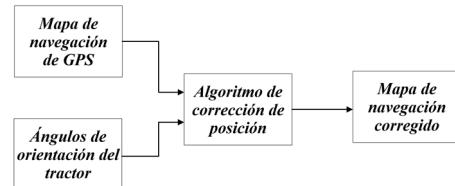


Fig. 2. Diagrama de cálculo de corrección del mapa de navegación. Fuente (Elaboración propia)

En la Tabla 1 se muestran las condiciones de ángulos de giro del tractor y las coordenadas deseadas de la trayectoria.

Tabla 1. Parámetros de las condiciones de ángulos de la base del tractor. Fuente (Elaboración propia)

Medición de coordenada de trayectoria			Ángulo de inclinación			Figura
$x$	$y$	$z$	$\theta_r$	$\theta_p$	$\theta_\phi$	
150m	16m	0m	15°	0°	0°	2
150m	16m	0m	0°	15°	0°	3
150m	16m	0m	0°	0°	15°	4

Para el primer caso, el terreno presenta un borde de tierra que hace que el tractor tenga una inclinación con un giro sobre su dirección de ataque y esto ocasiona un desvío en la trayectoria del tractor (cf. Figura 3).

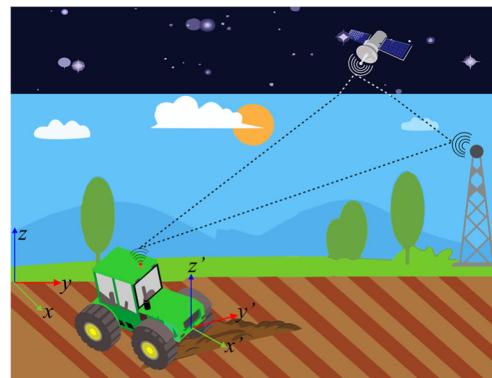


Fig. 3. Inclinación de tractor con respecto a su eje de ataque. Fuente (Elaboración propia)

Sustituyendo los valores de la Tabla 1 en las ecuaciones (3), (4) y (5), y tomando los valores de  $a=0.5m$ ,  $b=0.5m$  y  $h=1.5m$  se obtienen las ecuaciones (6), (7) y (8).

$$P = [150, 16, 0]^T \quad (6)$$

$$A = [0.5, 0.5, 1.5]^T \quad (7)$$

$$E = \begin{bmatrix} \cos 15^\circ \cos 0^\circ + \sin 15^\circ \sin 0^\circ \sin 0^\circ & \cos 0^\circ \sin 0^\circ & -\cos 15^\circ \sin 0^\circ \sin 0^\circ + \sin 15^\circ \cos 0^\circ \\ -\cos 15^\circ \sin 0^\circ + \sin 15^\circ \sin 0^\circ \cos 0^\circ & \cos 0^\circ \cos 0^\circ & -\cos 15^\circ \sin 0^\circ \cos 0^\circ - \sin 15^\circ \sin 0^\circ \\ -\sin 15^\circ \cos 0^\circ & \sin 0^\circ & \cos 15^\circ \cos 0^\circ \end{bmatrix} \quad (8)$$

Por tanto, de la ecuación (1), se obtiene

$$P' = \begin{bmatrix} 150 \\ 16 \\ 0 \end{bmatrix} - E * \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 1.5 \end{bmatrix}$$

$$P' = \begin{bmatrix} 150 \\ 16 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.8712 \\ 0.5 \\ 1.3195 \end{bmatrix}$$

$$P' = \begin{bmatrix} 149.1288 \\ 15.5 \\ -1.3195 \end{bmatrix}$$

donde  $P'$  son las coordenadas ya corregidas. Para el segundo caso, si existiera un hoyo en la superficie del terreno agrícola, esto ocasionaría una inclinación en el tractor que podría incluso llegar a volcarlo (cf. Figura 4). Realizando un procedimiento similar al caso 1, los resultados de las coordenadas corregidas se encuentran en la Tabla 2.

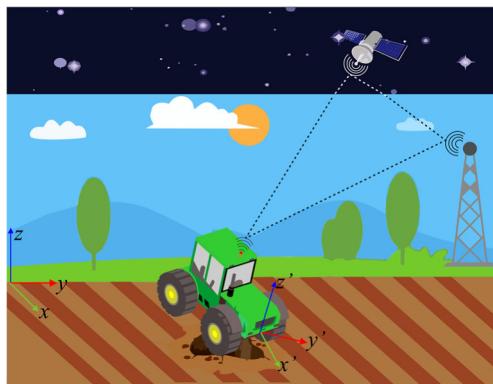


Fig. 4. Inclinación del tractor con respecto al eje y. Fuente (Elaboración propia)

Para el tercer caso, una acumulación de tierra trasera originaría una inclinación del tractor, que conllevaría a un cambio en la posición del tractor con respecto a su base de coordenadas dadas por el GPS, y consecuentemente, un cambio en el ángulo de rumbo del tractor (cf. Figura 5).

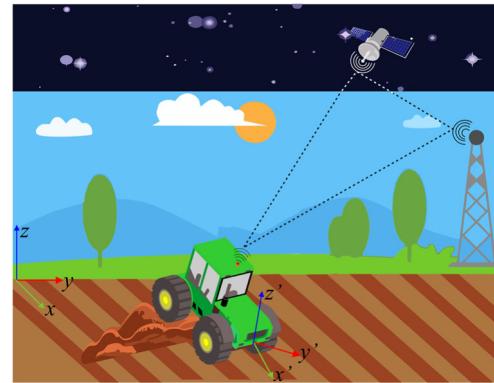


Fig. 5. Inclinación del tractor. Fuente (Elaboración propia)

Tabla 2. Coordenadas corregidas de  $P'$ . Fuente (Elaboración propia)

Coordenada corregida			Figura
$x'$	$y'$	$z'$	
149.12m	15.5m	-1.3195m	2
149.5m	15.9053m	-1.5781m	3
149.38m	15.6446m	-1.5m	4

Estos son los casos más comunes a los que se enfrentan los tractores agrícolas en sus labores diarias y debido a esto es la importancia de tener una buena medición de los ángulos de orientación.

Con el fin de realizar una simulación de la corrección de trayectoria, se midieron los diferentes ángulos a partir de un acelerómetro a través de un Arduino. En la Figura 6 se muestra el diagrama de conexión entre la tarjeta Arduino y el sensor.

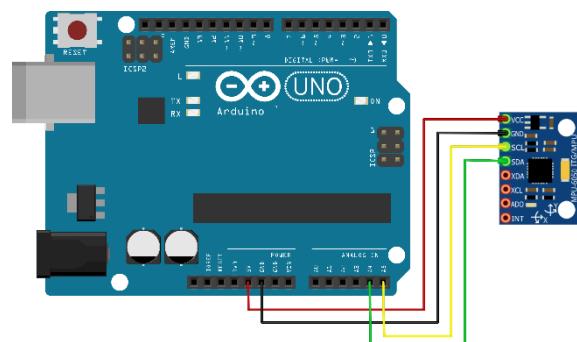


Fig. 6. Diagrama de conexión de Arduino y acelerómetro. Fuente (Elaboración propia)

La programación del sensor (acelerómetro) se realizó en Arduino, mediante una aplicación disponible en (Naylamp Mechatronics, 2021).

Las mediciones en tiempo real se llevaron a cabo y también la corrección de los ángulos de orientación.

## RESULTADOS

En un primer momento y con el fin de comprobar la fiabilidad del algoritmo, se llevaron a cabo, en simulación numérica, diversas variaciones de los ángulos de orientación. Estos ángulos se utilizaron en el modelo Ackerman (Corker, 2017) que representa la cinemática del robot tractor. En el Gráfico 1 se muestra en color azul, la trayectoria simulada y en color naranja, la trayectoria obtenida con la corrección del ángulo de inclinación.

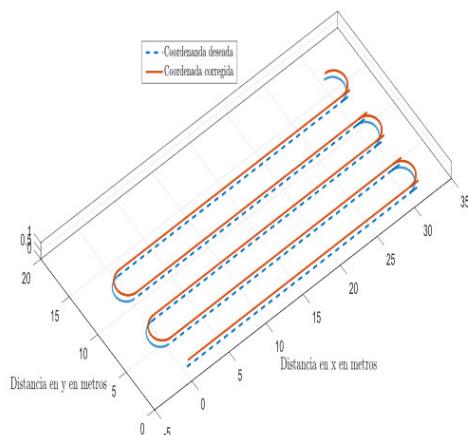


Fig. 7. Gráfico 1. Trayectoria deseada vs trayectoria corregida.  
 Fuente (Elaboración propia)

En el Gráfico 2 se observa el error en la coordenada  $x$  del algoritmo de corrección con una variación de 0 a 15 grados en los ángulos de orientación.

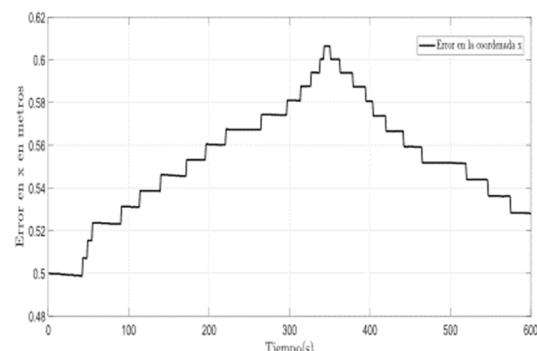


Fig. 8. Gráfico 2. Error de la coordenada x. Fuente  
 (Elaboración propia)

En el Gráfico 3 se observa las mediciones en tiempo real del ángulo de rumbo mediante la tarjeta de Arduino y el sensor acelerómetro.

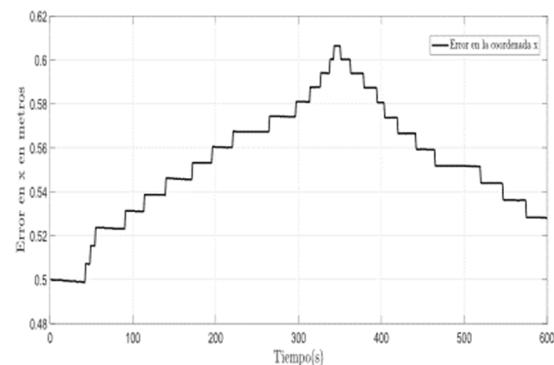


Fig. 9. Gráfico 3. Angulo de rumbo en tiempo real. Fuente  
 (Elaboración propia).

## CONCLUSIONES

En este trabajo, se muestra la integración de un sensor de aceleración para medir los ángulos de Euler a través de una tarjeta de desarrollo. Así también, se muestran los resultados de la programación del código de corrección de las coordenadas de posición  $x-y-z$ , así como de las pruebas en simulación numérica con el modelo cinemático de un robot tractor en configuración Ackerman. Los resultados obtenidos son satisfactorios y demuestran que es posible su implementación en los equipos utilizados. Por ejemplo, el sistema de medición completo es compacto y con un bajo consumo de energía. Como se pudo demostrar, una inclinación del tractor puede cambiar su trayectoria, y en consecuencia se debe de tomar dicha modificación en los ángulos de orientación del tractor, para evitar que se modifique el seguimiento de la trayectoria programada. Una aportación principal en el presente trabajo es la experimentación en simulación numérica del modelo de orientación de Euler con el modelo dinámico virtual de un robot móvil tipo Ackerman, además de la implementación en un microcontrolador de gama pequeña, con importante ahorro económico y resultados de simulación numérica con una interfaz a Matlab.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico con la beca 771379 del estudiante Guillermo Oliverio Hernández Romero. También por los apoyos económicos al laboratorio Nacional en Vehículos Autónomos y exoesqueletos (LANAVEX).

## REFERENCIAS

- Zhang, C., & Noguchi, N. (2017). Development of a multi-robot tractor system for agriculture field work. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 79-90.
- Corker, P. (2017). Robotics, vision and control. En P. Corker, *Mobile Robot Vehicles* (págs. 100-102). Springer.
- García, E., & Flego, F. (2008). Agricultura de precisión. *Revista Ciencia y Tecnología. Recuperado de* [http://www.palermo.edu/ingenieria/Ciencia\\_y\\_tecnologia/ciencia\\_y\\_tecno\\_8.html](http://www.palermo.edu/ingenieria/Ciencia_y_tecnologia/ciencia_y_tecno_8.html).
- Liangliang, Y. A. N. G., & Noguchi, N. (2014). Development of a wheel-type robot tractor and its utilization. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 11571-11576.
- Perez-Ruiz, M., Slaughter, D. C., Gliever, C., & Upadhyaya, S. K. (2012). Tractor-based Real-time Kinematic-Global Positioning System (RTK-GPS) guidance system for geospatial mapping of row crop transplant. *Biosystems engineering*, 111(1), 64-71.
- Naylamp Mechatronics. (12 de Agosto de 2021). Obtenido de Naylamp Mechatronics: [https://naylampmechatronics.com/blog/45\\_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html](https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html)
- Noguchi, N., & Barawid Jr, O. C. (2011). Robot farming system using multiple robot tractors in Japan agriculture. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 633-637.
- Noguchi, N. (2018). Agricultural vehicle robot. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 30(2), 165-172.
- Barawid Jr, O. C., & Noguchi, N. (2011). Automatic steering system for electronic robot vehicle. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 2901-2906.
- González, R., Rodríguez, F., Sánchez-Hermosilla, J., & Donaire, J. G. (2009). Navigation techniques for mobile robots in greenhouses. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(2), 153-165.
- Nagasaki, Y., Umeda, N., Kanetai, Y., Taniwaki, K., & Sasaki, Y. (2004). Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes. *Computers and electronics in Agriculture*, 43(3), 223-234

# Formato para los Artículos del Simposio Iberoamericano

## Multidisciplinario de Ciencias e Ingenierías 2021 (Graphik Regular 14 centrado)

A. ApellidoPat-ApellidoMat<sup>1</sup>, B. ApellidoPat-ApellidoMat<sup>2</sup>  
(texto centrado: Graphik Regular 10)

<sup>1</sup>Institución de Procedencia del autor. Dirección, Municipio, Estado, País.

<sup>2</sup>Institución de Procedencia del Coautor. Dirección, Municipio, Estado, País. (texto centrado: Graphik Regular 9)

Recibido: Fecha; Aceptado: Fecha. (texto centrado: Graphik Regular 8. Uso exclusivo para la Universidad Politécnica de Pachuca)

### Resumen (ÁREA TEMÁTICA: CBS, CCCF, CI)

El presente formato en Word es una guía básica para preparar los artículos para su publicación en la revista digital Simposio Iberoamericano Multidisciplinario de Ciencias e Ingenierías 2021. Los trabajos como artículos en extenso deberán tener una extensión máxima de 5 cuartillas. El resumen no debe exceder las 250 palabras y tiene que dar a conocer los objetivos de la investigación, la metodología empleada, los resultados resumidos y la conclusión principal. El idioma oficial es el español, pero también serán aceptados trabajos en inglés. Incluya en su resumen, las palabras clave en orden alfabético y separado por comas. No se utilicen acrónimos ni se citen referencias en el resumen. Para todo el documento utilizar margen izquierdo de 25 mm, derecho de 20 mm, superior de 25 mm e inferior de 20 mm. Utilice la fuente Graphik Regular tamaño 9 para el resumen y para el texto principal. Se deberá indicar el área temática a la que pertenece la contribución, entre paréntesis y posterior a la palabra "Resumen" de la siguiente manera: (CBS) cuando el área sea Ciencias Biológicas y de la Salud; (CCCF) correspondiente a Ciencias Computacionales, Comunicaciones y Finanzas; (CI) si pertenece a Ciencias de la Ingeniería, (CE) para Ciencias de la Educación.

Palabras clave: Proporcione de 3 a 5 palabras o frases clave, en orden alfabético, separadas con una coma.

### Abstract (AREA)

These instructions give you guidelines for preparing paper for the digital journal Multidisciplinary Iberoamerican Symposium on Sciences and Engineering 2021. Use this document as a template if you are using Microsoft Word 6.0 or later. Otherwise, use this document as an instruction set. Be careful, because the electronic file of your paper will appear as you finally presented it. Define all symbols used in the abstract. Do not cite references in the abstract. This abstract does not have to exceed 250 words and must state the principal objectives of the investigation, describe the methodology employed, summarize the results and state the principal conclusions. Please include appropriate key words in your abstract, in alphabetical order, separated by commas. You must indicate the thematic area into parenthesis next to the word "Abstract" as is indicated: (CBS) for Biologic and Health Science; (CCCF) corresponding to Computing Sciences, Communications and Finances; (CI) if it belongs to Engineering Science, (CE) for Education Science.

Key words: About three to five key words or phrases in alphabetical order, separated by commas.

### INTRODUCCIÓN

En esta primera parte de su artículo haga una breve introducción a su trabajo, sin extenderse en conceptos bien conocidos por todos. Para preparar su artículo se recomienda seguir fielmente estas instrucciones, pues su archivo electrónico aparecerá tal como usted lo presente.

Para enfatizar utilice *italicas*, no subraye. Defina todos los símbolos usados en la base de esta

primera columna. Es muy importante incluir el artículo del trabajo en esta sección.

### DESARROLLO INCLUYE: MATERIAL Y MÉTODOS; RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección y acorde al área temática, es muy importante describir las metodologías, procedimientos, reactivos y equipos utilizados en el trabajo.

Esta parte de desarrollo, también incluye la sección de Resultados y Discusión, las cuales

pueden venir en una sola sección o separadas según convenga a los autores.

## Figuras y Tablas

Asegúrese de que sus tablas y figuras sean claramente legibles y no sacrifique su tamaño, de ser necesario éste puede ocupar ambas columnas. El título o descripción de la tabla debe colocarse centrado, por arriba y en itálicas. (ver tabla 1). No abrevie "Tab.". Las tablas serán numeradas con números arábigos. Dé un espacio anterior y posterior de 3 puntos a los textos interiores. Respecto a las figuras: coloque su título o descripción por debajo (ver fig. 1), no incluya descripciones como parte de ellas, no coloque descripciones en "cajas de texto" ligadas a las figuras, no ponga marcos alrededor de ellas.

Puede usar la abreviación "Fig." aún al iniciar una frase. Verifique que las tablas y figuras que usted menciona realmente estén incluidas en el trabajo, y colóquelas al inicio o al final de la columna.

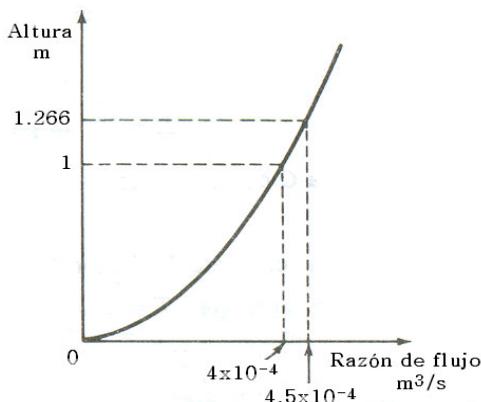


Fig. 1. Gráfica de un sistema de nivel de líquido.  
(Note el centrado de esta descripción de la figura).

Tabla 1. Tamaño y estilo de fuente para los artículos.

Tamaño de letras (puntos)	Estilo de fuente		
	Normal	Negritas	Itálica
8	Subíndices y superíndices, referencias, pies de página.		Descripción de tablas y figuras (Arial)
10		Resumen, Abstract	
10	Texto principal, ecuaciones.	ENCABEZADOS Sub-encabezados	
11	Nombres de autores.		
16		Título del Artículo	

## Abreviaciones y Acrónimos

Defina las abreviaciones y los acrónimos desde la primera vez que se utilizan en el texto, aún después de que han sido definidos en el resumen. No use abreviaciones en el título a menos que sea inevitable.

## Ecuaciones

Utilice el Editor de ecuaciones de Microsoft Word o el MathType (<http://www.mathtype.com>).

Numere las ecuaciones consecutivamente en paréntesis normal, en el margen derecho como en (1). Para escribir la ecuación, utilice el editor de ecuaciones (Clic izquierdo en barra de Herramientas| Personalizar | Comandos | Insertar | y arrastrar editor de ecuaciones a la barra de herramientas). Entonces seleccione el estilo de marcador "Ecuación". Presione la tecla tabuladora y escriba el número de la ecuación entre paréntesis. Utilice paréntesis para evitar ambigüedades en los denominadores. Puntualice las ecuaciones cuando forman parte de una frase: "En la ecuación (1) se describe..."

$$\int_0^{r_2} F(r, \varphi) dr d\varphi = [\sigma r_2 / (2\mu_0)] \quad (1)$$

Asegúrese de que los símbolos de su ecuación han sido definidos antes o inmediatamente después de que aparece la ecuación. Refiérase a "(1)," no "Eq. (1)" o "ecuación (1)," exceptuando al iniciar una frase: "Ecuación (1) es....".

## Unidades

Use el Sistema Internacional de Unidades SI. Puede utilizar unidades inglesas como unidades secundarias (entre paréntesis). Por ejemplo se puede escribir "15 Gb/cm<sup>2</sup> (100 Gb/in<sup>2</sup>)"; una excepción es cuando las unidades inglesas se usan para designar comercialmente un producto, tal como disquete de 3½", Pantalla LCD de 2.0", etc.

## Otras Recomendaciones

Deje un espacio después de puntos y comas. Evite palabras inespecíficas tales como "Usando (1), fue calculado el potencial". [No queda claro quién o que fue usado (1)]. Escriba en su lugar,

"El potencial fue calculado utilizando (1)," o "Usando (1), calculamos el potencial."

Use un cero antes del punto decimal: "0.25," no ".25." Use "cm<sup>3</sup>," no "cc." Indicar dimensiones en cada cifra como "0.1 cm. × 0.2 cm.," no "0.1 × 0.2 cm<sup>2</sup>." La abreviación para segundos es "s," no "seg." No mezcle palabras completas con abreviaciones de unidades.

Si usted lo desea, puede escribir en la primera persona de singular o plural y utilizar la voz activa ("observé que..." u "observamos que..." en vez de "Se observó que..."). Cuide su ortografía.

## CONCLUSIÓN

Una conclusión debe enfatizar los puntos principales del artículo. No repita el resumen como la conclusión. Una conclusión puede resaltar la importancia del trabajo o sugerir aplicaciones y trabajos complementarios.

## APÉNDICES

Los apéndices, cuando sean necesarios, van antes de los reconocimientos.

## RECONOCIMIENTOS

Use un solo encabezado para todos los reconocimientos. Evite expresiones tales como "Uno de los autores desea agradecer..." mejor escriba "Tal Autor agradece...."

## REFERENCIAS

Para las citas a lo largo del documento, basarse en el estilo APA sexta edición, así como para colocar las diferentes fuentes de información en esta sección con tipo de letra Graphik Regular tamaño 8.

Apellidos paterno, Inicial(es) del nombre (en caso de dos o más autores, separar con coma los nombres). (Año). *Título del libro*. Edición. Editorial. Ciudad. Páginas.

Apellidos del autor, Inicial del nombre (en caso de dos o más autores, separar con punto y coma los nombres). (Año de publicación). "Título del artículo". *Titulo de la revista*. Volumen (No.) (ejemplo: Vol. 3(5). Páginas en las cuales está descrito el artículo (ejemplo: pp. 131-139).

Apellido del Autor, Inicial del nombre. (Año) (Fecha exacta de la consulta). *Dirección electrónica de la página Web*. Fecha de la consulta.

Artículos en Extenso,  
Revista Digital Arbitrada.

# SIMPOSIO IBEROAMERICANO MULTIDISCIPLINARIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**Producción de Vinos de Altura en el Estado de Hidalgo, México. Un Potencial Derivado del Cambio Climático.**

A. Ahumada-Medina, R. M. Chio-Austria.

Universidad Politécnica de Pachuca, Hidalgo, México.

**Prueba ensayo depurativa de un agua residual industrial con un biorreactor anaerobio.**

Ubaldo Baños Rodríguez, Zaira N. Miranda Terán, Ana L. Ramos Camargo Lidia Ortiz López.

Universidad Politécnica de Pachuca, Hidalgo, México.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Embotelladora "Las Margaritas", Hidalgo, México.

**Sistema electrónico para monitoreo de la demanda y corrección del factor de potencia para servicio eléctrico residencial.**

R. Arrieta-Pérez, C. Fragoso-Cruz, A. Meneses-Figueroa, D. Robles-Camarillo.

Universidad Politécnica de Pachuca, Hidalgo, México.

**Desarrollo de un sistema mecánico para rehabilitación de extremidad inferior.**

M. A. Alamilla-Daniel, A. R. Licona-Rodríguez, J. G. Benítez-Morales, J. Hernández-Pérez.

Universidad Politécnica de Pachuca, Hidalgo, México.

**Un sistema subactuado con una interfaz de control de bajo costo para la educación de la ingeniería.**

H. A. Barrón-Pérez, F. J. Torres-Del Carmen, J. P. Ramírez-Paredes, M. S. Arredondo-Martínez.

Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.

**Analysis of the vibratory response for a rotor-hybrid short journal bearing system with orbital movement pivoted with rigid shaft.**

D. E. Rivera-Arreola, T. Hernández-Cortés, H. F. Abundis-Fong.

Universidad Politécnica de Pachuca, Hidalgo, México.

Instituto Tecnológico de Pachuca, Hidalgo, México.

**Algoritmo para la corrección de medición en posición mediante un acelerómetro para tractores autónomos agrícolas.**

G. Hernández-Romero, J. Ramos-Fernandez, V. Lopez-Morales.

Universidad Politécnica de Pachuca, Hidalgo, México.

UAEH-ICBI, Hidalgo, México.