

ISSN 2531-2960

Volumen I, Número I — Enero — Marzo - 2017

Revista del Desarrollo Tecnológico

ECORFAN®



ECORFAN-Spain

Indización

Google Scholar

Research Gate

REBID

Mendeley

ECORFAN-Spain

Directorio

Principal

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD.

Director Regional

MIRANDA-GARCIA, Marta. PhD.

Director de la Revista

SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC.

Edición de Logística

PERALTA-CASTRO, Enrique. PhD.

Diseñador de Edición

IGLESIAS-SUAREZ, Fernando. BsC

Revista del Desarrollo Tecnológico, Volúmen 1, Número 1, de Enero a Marzo - 2017, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Spain. Calle Matacerquillas 38, CP: 28411. Moralzarzal -Madrid. WEB: www.ecorfan.org/spain, revista@ecorfan.org. Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María. Co-Editor: MIRANDA-GARCÍA, Marta. PhD. ISSN-2531-2960. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN, Imelda, LUNA-SOTO, Vladimir, actualizado al 31 de Marzo 2017.

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

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Centro Español de Ciencia y Tecnología.

Consejo Editorial

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

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

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

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

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

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

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

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

Consejo Arbitral

VGPA. MsC
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

EAO. MsC
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

MMD. PhD
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

BRIIG. PhD
Bannerstone Capital Management, U.S.

EAO. MsC
Bannerstone Capital Management, U.S.

OAF. PhD
Universidad Panamericana, México

CAF. PhD
Universidad Panamericana, México

RBJC. MsC
Universidad Panamericana, México

Presentación

ECORFAN, es una revista de investigación que publica artículos en el área de Desarrollo Tecnológico.

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

El artículo *Síntesis de BiVO₄/Al₂O₃ y evaluación de la actividad fotocatalítica en la degradación de azul de metileno* por SÁNCHEZ-ALBORES, Rocío Magdalena, PÉREZ-SARIÑANA, Bianca Yadira, CALDERÓN-BENAVIDES, Héctor Alfredo y PATHIYAMATTON-JOSEPH, Sebastian con adscripción en la Universidad Politécnica de Chiapas. La Escuela Superior de Física y Matemáticas y la UNAM, como siguiente artículo está *Modelo de Innovación y Calidad para la industria del cartón, en el estado de Tabasco* por LÓPEZ-VALDIVIESO, Leticia, ELISEO-DANTES, Hortensia, CASTRO-DE LA CRUZ, Jucelly y FUENTES-LÓPEZ, Mayra Edilia, como siguiente artículo *Diseño, simulación y control de un sistema eólico* por B LINARES-ENRIQUEZ, Alejandro y ROMERO-PASARÓN, Samuel con adscripción en la Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, como siguiente artículo está *Laboratorio virtual de robótica basado en Matlab[®]/Simulink[®]/RobotStudio* por LORETO-GÓMEZ, Gerardo, MORALES-MORFIN, Marcela, SÁNCHEZ-SUAREZ, Isahi' y VÁZQUEZ-INFANTE, J. Jesús con adscripción en el Instituto Tecnológico Superior de Uruapan y la Universidad Politécnica de Uruapan, como siguiente artículo está *Diseño de un inversor de puente H con tecnología multinivel utilizando la técnica de Eliminación Selectiva de Armónicos* por BERNAL-GUERRERO, Erick, LÓPEZ-MONTEAGUDO, Francisco Eneldo y DE LA TORRE-Y RAMOS, Jorge con adscripción en la Universidad Autónoma De Zacatecas, como siguiente artículo está *Estudio de los factores que inciden en el uso de combustible, en un corporativo nacional de transporte terrestre, para un modelo de mejora general* por ELISEO-DANTES, Hortensia, MADRIGAL-ELISEO, José Luis, CASTRO-DE LA CRUZ, Jucelly y DE LEÓN-DE LOS SANTOS, Brissa Roxana, como siguiente artículo está *Prototipo funcional de prótesis transfemoral* por ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, Ervin Jesús, ALDANA-FRANCO, Rosario, LÓPEZ-VELÁZQUEZ, Andrés y ABURTO-MENESES, Armando con adscripción en la Universidad Veracruzana.

Contenido

Artículo	Página
Síntesis de BiVO₄/Al₂O₃ y evaluación de la actividad fotocatalítica en la degradación de azul de metileno SÁNCHEZ-ALBORES, Rocío Magdalena, PÉREZ-SARIÑANA, Bianca Yadira, CALDERÓN-BENAVIDES, Héctor Alfredo y PATHIYAMATTON-JOSEPH, Sebastian	1-10
Modelo de Innovación y Calidad para la industria del cartón, en el estado de Tabasco LÓPEZ-VALDIVIESO, Leticia, ELISEO-DANTES, Hortensia, CASTRO-DE LA CRUZ, Jucelly y FUENTES-LÓPEZ, Mayra Edilia	11-18
Diseño, simulación y control de un sistema eólico LINARES-ENRIQUEZ, Alejandro y ROMERO-PASARÓN, Samuel	19-29
Laboratorio virtual de robótica basado en Matlab®/Simulink®/RobotStudio LORETO-GÓMEZ, Gerardo, MORALES-MORFIN, Marcela, SÁNCHEZ-SUAREZ, Isahi y VÁZQUEZ-INFANTE, J. Jesús	30-40
Diseño de un inversor de puente H con tecnología multinivel utilizando la técnica de Eliminación Selectiva de Armónicos BERNAL-GUERRERO, Erick, LÓPEZ-MONTEAGUDO, Francisco Eneldo y DE LA TORRE-Y RAMOS, Jorge	41-54
Estudio de los factores que inciden en el uso de combustible, en un corporativo nacional de transporte terrestre, para un modelo de mejora general ELISEO-DANTES, Hortensia, MADRIGAL-ELISEO, José Luis, CASTRO-DE LA CRUZ, Jucelly y DE LEÓN-DE LOS SANTOS, Brissa Roxana	55-63
Prototipo funcional de prótesis transfemoral ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, Ervin Jesús, ALDANA-FRANCO, Rosario, LÓPEZ-VELÁZQUEZ, Andrés y ABURTO-MENESES, Armando	64-81

Instrucciones para Autores

Formato de Originalidad

Formato de Autorización

Síntesis de BiVO₄/Al₂O₃ y evaluación de la actividad fotocatalítica en la degradación de azul de metileno

SÁNCHEZ-ALBORES, Rocío Magdalena*†, PÉREZ-SARIÑANA, Bianca Yadira, CALDERÓN-BENAVIDES, Héctor Alfredo y PATHIYAMATTON-JOSEPH, Sebastian''

Universidad Politécnica de Chiapas, Carretera Tuxtla-Villafloras KM. 1+500, Las Brisas, Suchiapa, C.P. 29150, México

'Escuela Superior de Física y Matemáticas, Ciudad de México, 07738, México

'' Instituto de Energías Renovables UNAM, Temixco Morelos, 62580, México

Recibido Enero 5, 2017; Aceptado Marzo 20, 2017

Resumen

El desarrollo de un material con rendimientos eficientes activados bajo irradiación de luz visible es uno de los temas prometedores para utilizar la energía solar y la remediación medio ambiental ya que los materiales actualmente utilizados tienen la desventaja principalmente de ser activados bajo irradiación de luz UV es por ello que el en presente trabajo se describe la síntesis, caracterización y evaluación de la actividad fotocatalítica del BiVO₄/Al₂O₃ en el colorante Azul de metileno, el BiVO₄ es considerado unos de los semiconductores mas prometedores debido a su capacidad de absorción óptica. Se sintetizó el material por el método de coprecipitación y la fase del material se estudió por difracción de rayos X (XRD) por la cual se obtuvo una sola fase monoclinica, La morfología del polvo de BiVO₄/Al₂O₃ se investigó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). La capacidad de absorción óptica se determinó por espectroscopía de reflectancia difusa y las muestras fueron evaluadas en la degradación del colorante azul de metileno bajo irradiación de luz visible (400 nm λ <math><580\text{ nm}</math>) y se comparó con el de BiVO₄ sin alúmina.

Fotocatálisis, BiVO₄/Al₂O₃, Co-precipitación, Azul de metileno

Abstract

The development of a material with the efficient yields activated under the irradiation of visible light is one of the promising subjects for the use of the solar energy and the environmental remediation since the materials currently used have the majority of the activated ones under the irradiation of the UV light is by what in the present work describe the synthesis, characterization and evaluation of the photographic activity of BiVO₄ / Al₂O₃ in the methylene blue dye, BiVO₄ is considered some of the most promising semiconductors by an absorption capacity optics. Material synthesized from the material by the coprecipitation method and the material phase was studied by X-ray diffraction (XRD) for which a single monoclinic phase was obtained, the morphology of the BiVO₄ / Al₂O₃ powder was investigated by scanning electron microscopy (SEM). The optical absorption capacity was determined by diffuse reflectance spectroscopy and the samples were evaluated in the degradation of the dye Methylene blue Under irradiation of visible light (400 nm λ <math><580\text{ nm}</math>) and compared with that of pure BiVO₄.

Photocatalyst, BiVO₄/Al₂O₃, Co-precipitación, methylene blue

Citación: SÁNCHEZ-ALBORES, Rocío Magdalena, PÉREZ-SARIÑANA, Bianca Yadira, CALDERÓN-BENAVIDES, Héctor Alfredo y PATHIYAMATTON-JOSEPH, Sebastian. Síntesis de BiVO₄/Al₂O₃ y evaluación de la actividad fotocatalítica en la degradación de azul de metileno. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017, 1-1: 1-10

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: 153571@mer.upchiapas.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El agua es el recurso natural más básico del mundo que abarca más del 70% de la superficie de la Tierra.

A pesar de esto, la accesibilidad al agua potable es crucial para la supervivencia tanto de la humanidad como de los animales.

Hasta la fecha, la crisis del agua es la preocupación más importante de una sociedad, se han realizado diversas investigaciones para el tratamiento efectivo de los contaminantes presentes en el agua. Uno de los principales efluentes contaminados proviene de la industria textil. (Tianyong Zhang Toshiyuki Oyamaa, 2001).

Los efluentes textiles sin tratar contienen colorantes orgánicos, que producen graves daños a la fertilidad de la tierra, las zonas pesqueras y la salud humana. Por lo tanto, es esencial eliminar los tintes antes de descárgalos en los cuerpos de agua superficiales.

Existen varios métodos de tratamiento para los efluentes de la industria textil como son métodos de precipitación, coagulación-floculación.

Adsorción de carbón activado, proceso de intercambio iónico estos tratamientos tienen limitaciones como son optimización de procesos, inadecuación para colorantes dispersos, son caros y selectivos hacia un tinte en particular.

En la última década, muchos investigadores han trabajado con reacción fotocatalíticas para la purificación de aguas residuales (A. Sivakumar B. M., 2014).

Actualmente el fotocatalizador más utilizado es el TiO_2 ya que ha demostrado sin duda ser un fotocatalizador excelente para la descomposición oxidativa de muchos compuestos orgánicos sin embargo debido a su brecha de banda de 3.2 eV sólo puede ser excitado por la radiación ultravioleta que representa el 4% del espectro de luz solar que llega a la superficie de la tierra lo que reduce su abanico de posibles aplicaciones (Haiyan Jiang, 2012), por lo que resulta conveniente desarrollar semiconductores que sean capaces de absorber luz visible ya que esta forma parte del 43 % del espectro solar (U.M. García-Pérez, 2012).

Se han estudiado diversos fotocatalizadores con alta eficiencia en la absorción de la región visible del espectro solar como lo son $\text{In}_{1-x}\text{Ni}_x\text{TaO}_4$, CaIn_2O_4 , InVO_4 y Bi_2MoO_6 , BiVO_4 , de entre estos óxidos el BiVO_4 es considerado un semiconductor importante por poseer propiedades de interés tecnológico como lo es la ferroelasticidad, conductividad anionica (Azael Martinez De la Cruz, 2013).

De acuerdo a estudios previos, el BiVO_4 presenta tres fases cristalinas: scheelita monoclinica, zircón tetragonal y scheelita tetragonal, la actividad fotocatalítica para las fases descritas es significativamente diferente, siendo la fase monoclinica la que presenta mayor actividad en condiciones de irradiación visible, mientras que la tetragonal aparece como una fase muy poco fotoactiva (G.P.Nagabhushana, 2015).

Varios métodos han sido reportados para la preparación de BiVO_4 con el fin de mejorar su actividad fotocatalítica, como: reacción en estado sólido convencional, sol-gel, coprecipitación, proceso hidrotérmico, la deposición de baño químico, todas estas rutas tienen el fin de tomar el control del tamaño de partícula, la morfología, la superficie específica y las propiedades texturales del fotocatalizador (C. Ravidhas, 2015).

A pesar de que se ha demostrado que el m- BiVO_4 presenta actividad fotocatalítica bajo luz visible para la degradación de compuestos orgánicos, el proceso de separación de cargas es altamente ineficiente (Ge, 2008) dado el potencial que presenta el m- BiVO_4 se trata de mejorar las propiedades fotocatalíticas del material mediante la mejora de sus propiedades, estudios recientes muestran que el aluminio es un excelente dopante en fotocatalizadores debido a su coeficiente de expansión térmica estable y propiedades físicas. Ding et al predijo teóricamente que el BiVO_4 dopado con Al exhibiría una mejor Fotoactividad, que el BiVO_4 puro (Shanshan Yao, 2010).

La elección del semiconductor BiVO_4 para el presente trabajo esta basado en lo atractivo que representa activar un material con la región visible del espectro solar, y para mitigar el efecto de recombinación de los pares hueco-electrón se introduce aluminio a diferentes concentraciones.

Mediante el empleo de diferentes rutas de síntesis es posible optimizar las propiedades texturales del vanadato de bismuto para potenciar su eficiencia en la degradación de especies orgánicas contaminantes.

Dado que el método de síntesis por coprecipitación permite tener una alta homogeneidad en el sistema, no requiere de altas temperaturas y no implica el uso de equipo especial de laboratorio, se seleccionó este método sobre los demás. A través de este método de síntesis propuesto, se busca evaluar las propiedades fotocatalíticas del vanadato de bismuto resultante en la degradación de azul de metileno en disolución acuosa por activación de la luz visible.

Metodología

Preparación del $\text{BiVO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$

La síntesis por coprecipitación se llevó a cabo mediante el mezclado de dos soluciones acuosas a 65 °C. Para la primera solución se usaron 50 mmol de $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (98%, Sigma-Aldrich) y se disolvieron en 25 ml de HNO_3 2M la segunda solución fue preparada disolviendo 50 mmol NH_4VO_3 (99%, Sigma-Aldrich) en 25 ml de NH_4OH 2M, la solución de nitrato de bismuto fue goteada lentamente en la solución del vanadato, adicionalmente se le agregan diferentes concentraciones de alúmina (1.2, 2.4 %) y se ajusta el pH a 8.5 con NH_4OH hasta obtener una suspensión de color amarilla se agita durante 30 minutos, se mantiene a baño maría hasta evaporar la mayor cantidad de solvente posible, el polvo obtenido se filtró y seco a 60 °C durante 12 horas posteriormente se lleva a calcinación durante 4 horas a 450 °C y 600 °C designadas como B₁, B₂ respectivamente y siendo el BiVO_4 sin alúmina B₀.

Caracterización de la muestra

La caracterización estructural fue hecha por difracción de rayos X en polvo en un difractor de rayos X modelo Smartlab marca RIGAKU, con radiación $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 0.15406$ nm) en el intervalo de 10° a 70°.

Las morfologías de los polvos fueron investigadas por microscopio electrónico de barrido (SEM) utilizando un instrumento de emisión de campo modelo FE SEM-Hitachi S-5500 con una aceleración de voltaje de 5 kv, el borde de absorción del BiVO_4 (300-800 nm) se midió con un espectrofotómetro ShimadzuUV-3600, con una esfera de integración (Shimadzu ISR-3100).

Degradación fotocatalítica de Azul de metileno

Las muestras fueron evaluadas en la degradación del colorante azul de metileno (MB) se utilizó una lámpara fluorescente de 25 W como fuente de luz, situada a unos 10 cm de distancia del reactor, se colocó un recipiente cilíndrico de borosilicato se trabajó con un volumen inicial de 200 ml y concentración inicial de MB de 10 ppm la suspensión se dejó durante 30 min en la oscuridad para establecer el proceso de equilibrio de adsorción/desorción posteriormente se encendió la fuente de luz, se tomaron alícuotas de 3 ml cada 30 minutos durante 6 horas, las muestras tomadas fueron centrifugadas durante 10 minutos con el fin de separar el fotocatalizador de la disolución por último, la disolución centrifugada de MB fue analizada por espectroscopia de UV- a una longitud de onda de 664.

Resultados

Caracterización del fotocatalizador

Difracción de rayos X (XRD)

La síntesis del BiVO_4 mediante el método de Coprecipitación produjo un polvo policristalino de una intensa coloración amarilla.

Para seguir el proceso de formación del BiVO_4 , se obtuvieron los patrones de difracción de rayos-X en polvo de las muestras. La figura 1 muestra la difracción de los polvos preparados a 450, 650 °C con un porcentaje de alúmina de 1.2 y 2.4 % respectivamente durante 4 h y el polvo de BiVO_4 sin adición de alúmina a 450°C y 4 h. El análisis de los patrones de rayos X obtenidos de acuerdo a la base de datos JCPDS No. 01-083-1699 muestran que se obtuvo un polvo policristalino con estructura monoclinica.

Fueron observado para los tres patrones de difracción picos característicos con 2θ a 18.99, 28.95, 30,53, etc., No hay picos adicionales esto indica que todas las muestras corresponde a la fase scheelite monoclinico y que el dopaje de aluminio no influye en la formación de la fase, Sin embargo, la presencia de Al se detecta claramente a partir del análisis EDS, (Figura 2).

Otros autores también han obtenido patrones de XRD similares de BiVO_4 (Haiyan Jiang, 2012).

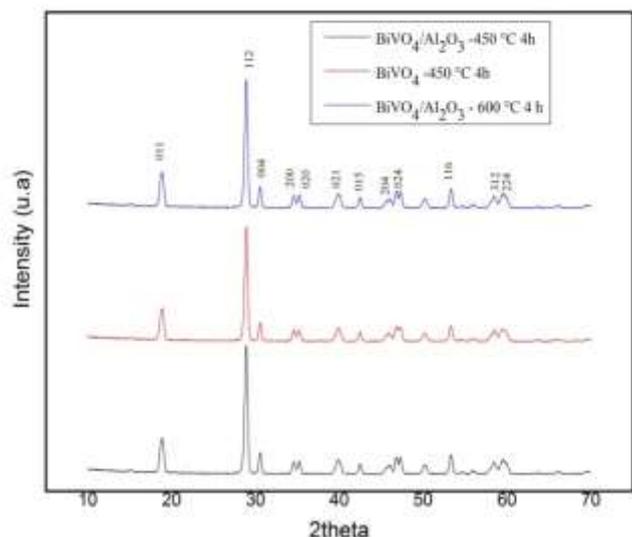


Figura 1 Patrón de difracción de rayos X: B₀, B₁, B₂

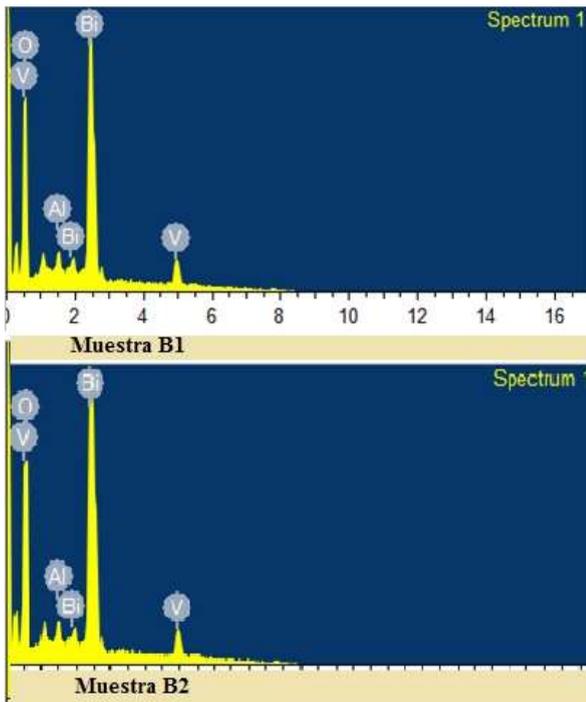


Figura 2 Análisis EDS polvos $\text{BiVO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$

Propiedades Ópticas

Los espectros de absorción de reflectancia difusa UV-Vis de las muestras preparadas fueron medidos para determinar la capacidad de absorción óptica del material, las propiedades ópticas de las partículas están determinadas por su banda de energía.

Se analizó reflectancia difusa con el fin de determinar la brecha de energía, la cual fue calculada mediante ecuación de Kubelka-Munk (Ecuación 1) (Rosendo López, 2012).

$$FR = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (1)$$

Donde R es la reflectancia difusa obtenida, una vez calculado el factor $F(R)$ se grafica $h\nu$ en la abscisa y $[F(R) h\nu]^n$ donde $h\nu=1240/\lambda$ y n, es un exponente cuyo valor depende de las características de transición del semiconductor: $n=1/2$ para un semiconductor de transición directa y $n=2$ para un semiconductor de transición indirecta.

Dado que el $m\text{-BiVO}_4$ es un semiconductor de transición directa el valor de m es $1/2$ (Natda Wetchakun, 2015). El intervalo de las bandas de las muestras B_0, B_1, B_2 son de 2.41, 2.38 y 2.39 eV respectivamente los cuales son comparables con el de otras investigaciones (Ying Zhou, 2010), esto revela que la introducción de Al presenta poco efecto sobre la brecha de banda, y puede afectar la capacidad de absorción. En la fig 3c, se puede observar que las muestras con Al presentan una mayor absorción en el rango de luz visible que la muestra que contiene solo BiVO_4 .

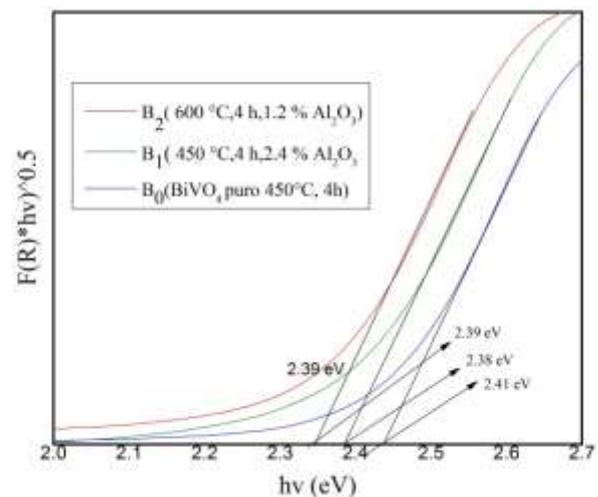


Figura 3 Determinación de la brecha de banda para las muestras de BiVO_4 y $\text{BiVO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$

Morfología

La figura 4 muestra las imágenes de SEM obtenidas para el $m\text{-BiVO}_4$ sintetizado en forma pura se observó que las partículas presentan un alto grado de aglomeración además que mostró morfologías ovaladas.

La figura 5 manifiesta que la morfología obtenida en la muestra presentó una forma regular y se encuentra conformada por partículas con un tamaño aproximado a los 100 nm, las cuales se encuentran auto ensambladas formando arreglos esféricos con un diámetro alrededor de los 3 μm .

La figura 6 se observan arreglos esféricos con tamaños aproximados a los 200 nm.

La tendencia de aglomeración es más a mayor temperatura y el tamaño de la partícula aumentó con el aumento de la temperatura de calcinación, así como la presencia de aluminio tiene una influencia sobre la morfología con tendencia a formar partículas con arreglos esféricos.

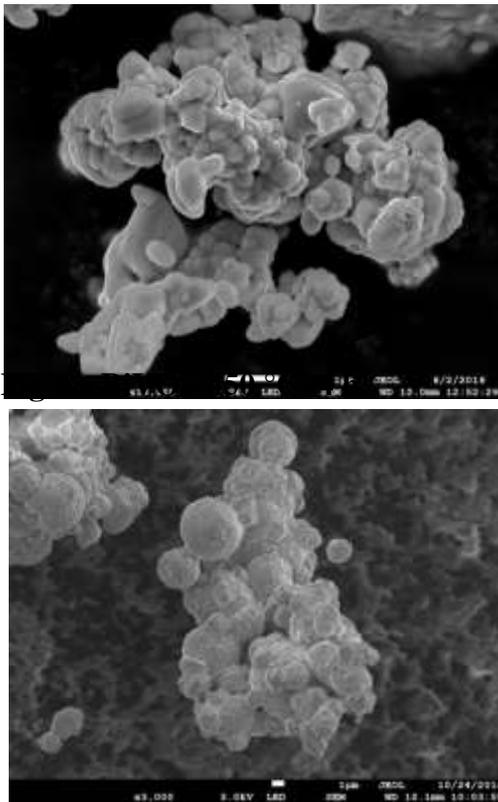


Figura 4 BiVO₄/Al₂O₃- 450 °C- 4 h

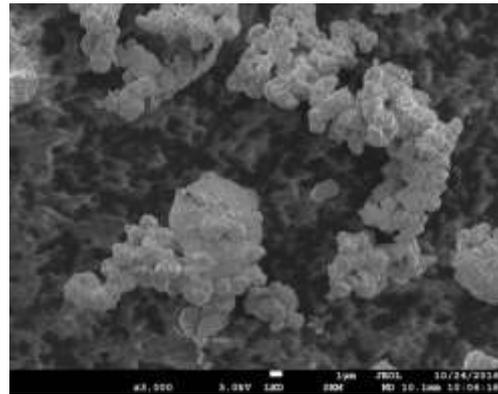


Figura 5 BiVO₄/Al₂O₃- 600 °C- 4 h

Actividad fotocatalítica

La actividad fotocatalítica de las nanopartículas semiconductoras ha sido ampliamente utilizada para descomponer colorantes orgánicos (Li Zhang, 2006).

La actividad fotocatalítica del material fue evaluada en la degradación de Azul de metileno (MB) en solución acuosa bajo irradiación de luz visible, el seguimiento de la degradación fotocatalítica del MB se realizó mediante un método colorimétrico, utilizando una longitud de máxima absorción del colorante, de $\lambda_{\text{máx}} = 664 \text{ nm}$ (Ying Wang, 2016). La evolución de la concentración del colorante durante el proceso de degradación es mostrada en la figura 5, con la finalidad de descartar la degradación del colorante por un proceso de fotólisis, se realizó un experimento donde una solución del colorante fue irradiada en ausencia del fotocatalizador la concentración de MB permaneció constante todo el tiempo lo que indica que la combinación fotocatalizador / irradiación luminosa es necesario para eliminar el colorante de la solución, sin embargo, en presencia del fotocatalizador e irradiación de luz visible, la degradación de MB aumentó. Se puede observar que el Al afecta en gran medida la actividad fotocatalítica de BiVO₄. Con el aumento de la concentración del metal, la actividad aumenta.

La actividad fotocatalítica más alta se obtiene con el 1,2% de Al (muestra B1) Cuando la concentración es de 2,4% (Muestra B2), la actividad disminuye.

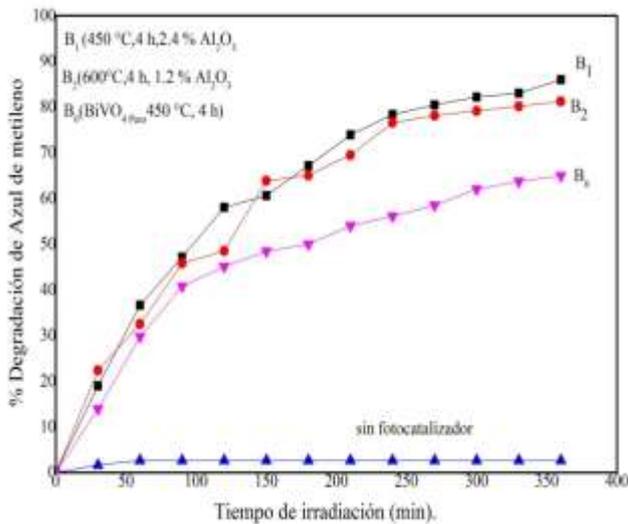


Figura 6 Degradación de azul de metileno bajo irradiación de luz visible a 664 nm

La mejora en el rendimiento fotocatalítico puede ser explicado de la siguiente forma (Jinhui Yang, 2013):

- La capacidad de absorción del reactivo sobre la superficie del catalizador.
- La capacidad de absorción del catalizador en la región visible.
- La separación eficiente y el transporte de los electrones y agujeros inducidos por la luz en el catalizador

El tamaño de partícula pequeño minimizó los sitios para la recombinación de pares de electrones-huecos fotogenerados por la luz y hubo una transferencia más eficiente a la superficie para degradar la moléculas de MB.

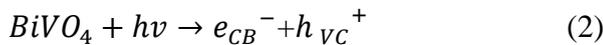
Además, la estructura altamente cristalina suprime la recombinación de pares de electrones-agujeros fotogenerados ya que la cristalinidad de las partículas juega un rol importante para que las reacciones puedan llevarse a cabo, una baja cristalinidad de los materiales favorece a que haya un mayor número de defectos cristalinos (por ejemplo: vacancias de oxígeno), lo cual favorece que se lleve a cabo el proceso de recombinación del par hueco-electrón y esto es contraproducente para que se dé el proceso de fotocatalisis.

Las muestras que contienen aluminio muestran mayor absorción en el rango visible por lo que eso aumenta la eficiencia fotocatalítica comparada con la muestra que no contiene aluminio además que se tienen morfologías más definidos en arreglos esféricos y tamaños pequeños.

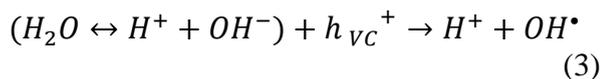
Al irradiar las partículas del semiconductor con luz visible, se generan electrones en la banda de valencia (BV), estos electrones se promueven a la banda de conducción (BC) generando un hueco (h^+) en la BV y electrones libres (e^-) en la BC, el hueco fotogenerado reacciona con el agua absorbida en la superficie para formar radicales OH^\cdot altamente reactivos ya que la energía de enlace de OH^\cdot es más alta comparada con las energías de enlace de C-C, C-N, C-H, C-O, O-H y N-H presentes en los compuestos orgánicos, por lo tanto el (OH^\cdot) puede romper fácilmente estos enlaces, (A. Sivakumar B. M., 2014) mientras que O_2 actúa como aceptor de electrones para formar un anión superóxido ($O_2^\cdot^-$) con la cual se lleva una serie de reacciones que conducen a la formación del radical libre (OH^\cdot) mediante el cual se lleva a cabo el proceso de degradación.

El posible mecanismo de oxidación se describe a continuación (Venkataraman Sivakumar, 2015).

1. Absorción eficiente de fotones ($h\nu > EG$ 2.4 eV) para el caso de BiVO_4



2. Neutralización de grupos OH^- por fotohuecos que producen radicales H^\bullet



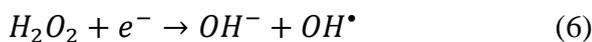
3. La absorción del oxígeno como un primer paso de la reducción del mismo



4. Formación del peróxido de hidrógeno y dismutación del oxígeno.



5. Descomposición del H_2O_2 y una segunda reducción del oxígeno.



6. Oxidación de los radicales orgánicos por la vía de ataques sucesivos de radicales.

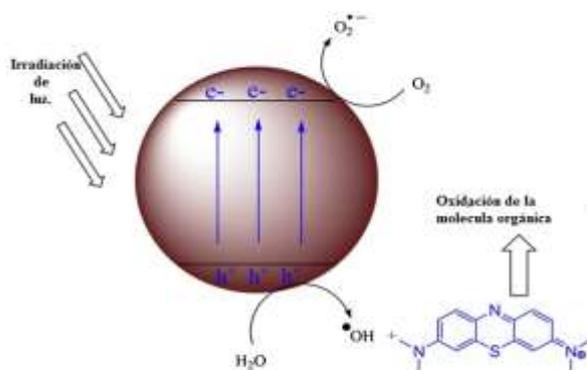
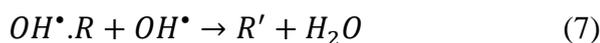


Figura 7 Esquema de degradación fotocatalítica en la superficie de BiVO_4 bajo irradiación de luz visible (Venkataraman Sivakuma)

Agradecimiento

A conacyt por el apoyo de una beca con número de registro 01/014UPChiapas.

Al Instituto de Energías Renovables por su asistencia en la caracterización de Materiales

(Técnico Rogelio Moran Elvira, Mtro José Campos, Dra Maria Luisa Ramón García)

A la Universidad Politécnica de Chiapas donde se desarrolló el proyecto.

Maestra Edith Ponce Recinos por su asistencia en la difracción de rayos X.

Conclusiones

En resumen, sintetizamos con éxito polvos de BiVO_4 con alúmina por el método de coprecipitación. El contenido de Al tuvo un efecto significativo sobre la estructura y morfología de los productos BiVO_4 .

La espectroscopia XRD confirma la formación de BiVO_4 monoclínico.

La propiedad de absorción óptica se estudió mediante espectroscopia UV-Visible los espectros mostraron que todas las muestras presentaron una fuerte absorción en la región visible del espectro electromagnético.

Después de introducir Al, las partículas BiVO_4 retienen la estructuras de scheelita monoclínicas y se mejora la capacidad de absorción de luz.

El experimento fotocatalítico demuestra que la incorporación de especies de Al puede mejorar la actividad fotocatalítica de BiVO_4 .

La eficiencia más alta se obtiene con una concentración de 1,2 % de Al.

Referencias

- A. Sivakumar, B. M. (2014). A review on decolourisation of dyes by photodegradation using various bismuth catalysts. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2300–2306.
- A. Sivakumar, B. M. (2014). A review on decolourisation of dyes by photodegradation using various bismuth catalysts. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2300-2306.
- Azael Martinez De la Cruz, S. S. (2013). Procesos avanzados de oxidación por acción de BiVO₄ para la purificación de agua. *ingenierias*, 43-50.
- C. Ravidhas, A. .. (2015). Facile synthesis of nanostructured monoclinic bismuth vanadate by a co-precipitation method: Structural, optical and photocatalytic properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 343–351.
- G.P.Nagabhushana, A. .. (2015). Energetics of bismuth vanadate. *Journal of Solid State Chemistry*, 187–192.
- Ge, L. (2008). Synthesis and characterization of novel visible-light-driven Pd/BiVO₄. *Materials Letters*, 926-928.
- Haiyan Jiang, H. D. (2012). Hydrothermal fabrication and visible-light-driven photocatalytic properties of bismuth vanadate with multiple morphologies and/or porous structures for Methyl Orange degradation. *Journal of Environmental Sciences*, 449–457.
- Jinhui Yang, D. W. (2013). Roles of Cocatalysts in Photocatalysis and Photoelectrocatalysis. *Accounts of Chemical Research*, 1900–1909.
- Li Zhang, D. C. (2006). Monoclinic Structured BiVO₄ Nanosheets: Hydrothermal Preparation, Formation Mechanism, and Coloristic and Photocatalytic Properties. *The Journal Physical Chemistry B*, 2668–2673.
- Natda Wetchakun, S. C. (2015). Efficient photocatalytic degradation of methylene blue over BiVO₄/TiO₂ nanocomposites. *Ceramics International*, 5999-6004.
- Rosendo López, R. G. (2012). Band-gap energy estimation from diffuse reflectance measurements on sol–gel and commercial TiO₂: a comparative study. *J Sol-Gel Sci Technol*, 1-7.
- Shanshan Yao, K. D. (2010). The effects of the introduction of Al atom into monoclinic BiVO₄: a theoretical prediction. *127(751–757)*.
- Tianyong Zhang Toshiyuki Oyama, A. A. (2001). Photooxidative N-demethylation of methylene blue in aqueous TiO₂ dispersions under UV irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 163-172.
- U.M. García-Pérez, S. S.-G.-d. (2012). Selective Synthesis of Monoclinic Bismuth Vanadate Powders by Surfactant-Assisted Co-Precipitation Method: Study of Their Electrochemical and Photocatalytic Properties. *International Journal of Electrochemical Science*, 9622 - 9632.
- Venkataraman Sivakumar, R. S. (2015). BiVO₄ nanoparticles: Preparation, characterization and photocatalytic activity. *INORGANIC CHEMISTRY*.
- Ying Wang, F. L. (2016). Microwave synthesis and photocatalytic activity of Tb³⁺-doped BiVO₄ microcrystals. *Journal of Colloid and Interface Science*, 307-313.

Ying Zhou, K. V. (2010). An inorganic hydrothermal route to photocatalytically active bismuth vanadate. *Applied Catalysis A: General*, 140–148.

Modelo de Innovación y Calidad para la industria del cartón, en el estado de Tabasco

LÓPEZ-VALDIVIESO, Leticia*†, ELISEO-DANTES, Hortensia, CASTRO-DE LA CRUZ, Jucelly y FUENTES-LÓPEZ, Mayra Edilia

Recibido Enero 3, 2017; Aceptado Marzo 6, 2017

Resumen

Investigar los parámetros que inciden en la productividad de la industria del cartón para generar un escenario integral del sector. Establecer indicadores que evalúen la productividad de la empresa. Evaluar periódicamente los índices de productividad de la empresa. Obtener un modelo de desarrollo para el sector industrial de interés. Con base en los principios de gestión de la calidad según la norma ISO 9001:2015 se diseña una herramienta de autoevaluación a las empresas del estado de Tabasco dedicadas a la industria del cartón para la identificación los factores que inciden principalmente en la productividad del sector. La herramienta tiene por objeto crear un escenario confiable el cual hace hincapié en la estructuración del modelo de desarrollo propuesto. Los actores expertos de los cuales se obtiene el escenario son seleccionados a través de la metodología Delphi, con la aplicación de la instrumentación necesaria para su identificación. Para las empresas es de vital importancia mantenerse en el mercado, cada vez mas competitivo y es por ello que surge la necesidad de estudios especializados a la productividad, ya que de estos resulta la propuesta adecuada a la situación del ente, objeto de estudio, que permite el desarrollo del mismo y, con ello, la competitividad deseada.

Productividad, competencia, industria del cartón, innovación

Abstract

Investigate the parameters that influence the productivity of the carton industry to generate an integral scenario of the sector. Establish indicators that evaluate the productivity of the company. Evaluate periodically the productivity indexes of the company.

Obtain a development model for the industrial sector of interest. Based on the principles of quality management according to ISO 9001: 2015, a self-assessment tool is designed for companies in the state of Tabasco dedicated to the carton industry to identify the factors that mainly affect the productivity of the sector. The tool aims to create a reliable scenario which emphasizes the structuring of the proposed development model. The expert actors from whom the scenario is obtained are selected through the Delphi methodology, with the application of the instrumentation necessary for its identification. For companies it is vital to stay in the market, increasingly competitive and that is why the need for specialized studies to productivity, because of these is the proposal appropriate to the situation of the entity, object of study, which Allows the development of the same and, with it, the desired competitiveness

Productivity, competition, carton industry, innovation

Citación: LÓPEZ-VALDIVIESO, Leticia, ELISEO-DANTES, Hortensia, CASTRO-DE LA CRUZ, Jucelly y FUENTES-LÓPEZ, Mayra Edilia. Modelo de Innovación y Calidad para la industria del cartón, en el estado de Tabasco. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017, 1-1: 11-18

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: llvaldivieso@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La importancia de evaluar los parámetros que inciden en la productividad de una empresa determina un proceso de cambio que traerá beneficios significativos para la empresa, dichos parámetros están representados por factores externos como terrenos y edificios, materiales, energía, maquinaria y equipo y recurso humano. O bien factores internos como: disponibilidad de materia prima, mano de obra calificada, políticas estatales relativas a tributación y aranceles e infraestructura existente.

La industria del cartón ha ido evolucionando a través del tiempo desde que fue inventado por Robert Gair en 1890 hasta volverse cada vez un material más resistente y de mayor calidad. Ha tomado un papel importante en la vida diaria de la sociedad en las actividades de la vida diaria.

Actualmente es uno de los envases y embalajes más utilizados para agrupar, almacenar, transportar, exponer y vender productos de consumo en el mundo.

La venta a granel anónima a la comercialización de productos envasados y embalados con marcas comerciales impresas es la base de la actual demanda de envases y embalajes.

Además de ser un material más barato y que se puede manipular con mayor facilidad al grado de poder hacerse a la medida requerida de modo que ocupe menos espacio; es "*environmentally friendly*" ya que su impacto medioambiental es menor en comparación de otros materiales puesto que es reciclable.

En las organizaciones se vive una intensa necesidad de desarrollo de calidad, de productividad y competitividad, pero no necesariamente a través de los procesos técnicos, sino de los factores humanos, que son el punto clave y estratégico de toda organización, ya que está comprobado que para que se promueva el conocimiento, se requiere de la disposición de las personas que lo poseen, el compartir dicho conocimiento y estar en la búsqueda de más, permite y garantiza un crecimiento multiplicativo en las organizaciones, y esto habla de personas que están abiertas al cambio, que tienen enfoques integrales, que observan el ritmo y del contexto global y detallan el contexto interno para adaptarlo a las necesidades de la organización.

A pesar de ser una empresa líder a nivel nacional (la cual por motivos de privacidad ha decidido mantenerse en el anonimato durante el desarrollo del presente trabajo) en el estado de Tabasco, en todas las líneas que produce, y contar con la infraestructura y la tecnología básica para cubrir la demanda de la región, la permanencia de este sector por más de 15 años en el mercado no ha logrado un proceso de cambio significativo en su productividad, de aquí que se muestra un interés especial por conocer los factores que afectan la productividad de la empresa y con ello modificar su proceso interno (tecnológico, humano, material, etc.), cabe señalar que no existen antecedentes de haber realizado un estudio de esta línea de investigación en la empresa y por lo tanto se reconoce la importancia de los resultados que se obtengan de esta investigación.

Con base en lo anterior se establece como objetivo general del presente trabajo el “analizar la productividad de la industria del cartón en el estado de Tabasco, para la generación de un modelo de desarrollo”, del cual se derivan cuatro objetivos específicos para el alcance de la investigación, enlistados a continuación:

- Investigar los parámetros que inciden en la productividad de la industria del cartón para generar un escenario integral del sector.
- Establecer indicadores que evalúen la productividad de la empresa.
- Evaluar periódicamente los índices de productividad de la empresa.
- Obtener un modelo de desarrollo para el sector industrial de interés.

De igual manera cabe mencionar que la investigación en dicho sector se llevo a cabo en un periodo de dos años, la cual finalizo en el año en curso.

Descripción del método

Para llevar a cabo el estudio de la productividad en la industria del cartón en el Estado de Tabasco, se desarrolló la metodología siguiente:

- a) Localizar a las empresas vinculadas con este sector para realizar estrategias de recopilación de información.
- b) Gestionar las estrategias de vinculación que permitan realizar el estudio.
- c) Detectar a los actores expertos de la empresa de este sector, a través del método Delphi.

- d) Recopilar de los actores expertos, información directa sobre los factores que inciden actualmente en el desarrollo de la empresa, así como la interrelación entre los mismos, esto a través de entrevistas presenciales y/o cuestionarios validados.
- e) Procesar y analizar la información a través tablas y graficas que permitan identificar el comportamiento de las variables estudiadas.
- f) Determinar, de los factores encontrados, aquellos que inciden en las variables del contexto (político, económico, social, cultural, tecnológico y ambiental).
- g) Interpretar el escenario de desarrollo que propicie el mejoramiento de la productividad integral en las empresas de procesamiento del cartón en el Estado de Tabasco.
- h) Construir el modelo de desarrollo de la productividad que permita una mejora en este sector.

Análisis a partir del método

El estudio de la productividad mediante herramientas validadas, permitió emigrar hacia una Organización más competitiva, logrando asegurar el desempeño mínimo requerido, reconociendo el desempeño excepcional al mejorar hábitos de trabajo, incentivando el trabajo en equipo, el desarrollo personal, enseñando y transmitiendo los conocimientos a los compañeros de trabajo, para ofrecer mejoras y cambios significativos en los procesos, tecnología, control y en los programas de medición, así como las mejoras en la forma, nivel y estilos de supervisión.

Aplicando la metodología que incluye una serie de entrevistas a cada Jefe de área, se integra de manera gráfica cada uno de los resultados que se obtuvieron en la aplicación del Modelo de Innovación y Calidad, siendo estos por área lo que permitió definir el Perfil General de la Empresa.

Las áreas que fueron consideradas para el desarrollo de la investigación fueron: Plásticos, Crédito y Cobranza, producción, Embarques, Recursos Humanos, Mantenimiento, Productividad y Ventas.

Resultados

Se presentarán solamente aquellos resultados que observaron una variación significativa y que por lo tanto inciden en la productividad de la industria del cartón.

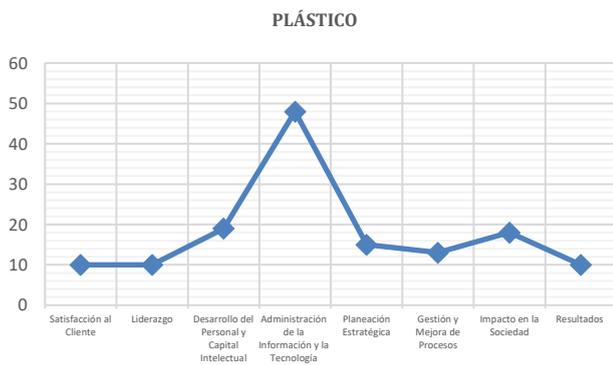


Gráfico 1 Resultado del área de plásticos

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

El área de plásticos se encuentra debajo de lo aceptable y aunque presente un porcentaje mayor de estabilidad en el criterio de Administración de la Información y la Tecnología, es necesario el apoyo de los otros criterios, porque los resultados son ineficientes.

CRÉDITO Y COBRANZA

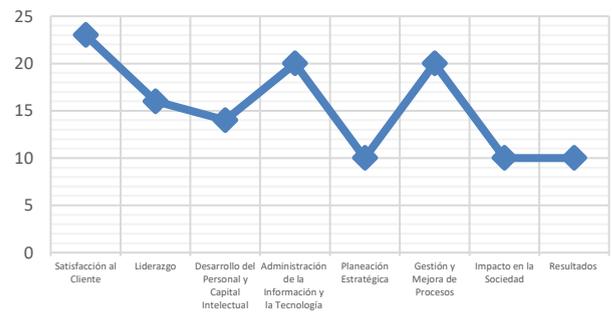


Gráfico 2 Resultado del área de crédito y cobranza

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

En esta gráfica se observa que el criterio que engloba la inestabilidad del área, es la planeación estratégica, donde, por consiguiente, si presenta fallas, provoca directamente cambios en los demás criterios, se observa nuevamente que los resultados tienen un porcentaje del 10%.



Gráfico 3 Resultado del área de producción

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

El área de producción solo cumple con dar la meta establecida (tangible), así como con el uso de cierta forma correcta de la tecnología que implementa; pero hay que saber que la planeación estratégica y el desarrollo del personal y Capital Intelectual es básico para obtener los resultados deseados.

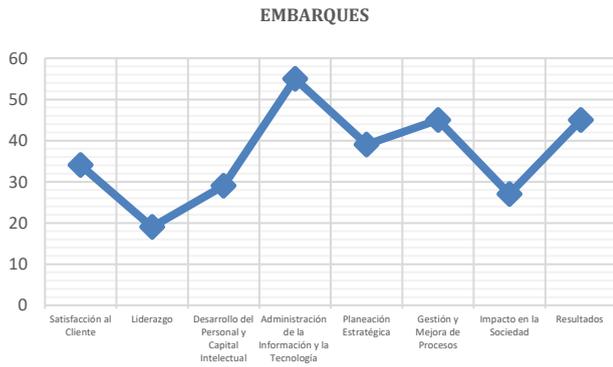


Gráfico 4 Resultado del área de embarques

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

El área de embarques presenta resultados aceptables y hasta el momento tiene el porcentaje mayor en comparación a las demás áreas. El cumplimiento de este criterio muestra que implementa correctamente la tecnología y hace buen uso de la información, y control en sus procesos, pero el liderazgo se ve demasiado insuficiente, en pocas palabras, apenas existe.

Se define por consiguiente que en el personal está centralizado la mayor parte del trabajo y aunque los resultados son relativamente altos, aun así, se encuentran en un nivel de aceptabilidad muy bajo.



Gráfico 5 Resultado del área de recursos humanos

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

El área de Recursos Humanos presenta estrategias para el desarrollo del personal, pero se presentan dificultades en los resultados debido al poco liderazgo que existe; se reconoce el esfuerzo porque en esta área esta es su fortaleza, lo cual no se aprovecha de manera adecuada debido a que los resultados van en descenso.



Gráfico 6 Resultado del área de mantenimiento

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

De manera general, en esta área todos los criterios se encuentran en niveles bajos, solo muestran un quehacer cotidiano de las actividades en los procesos, de manera inadecuada.



Gráfico 7 Resultado del área de contabilidad

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

En el área de contabilidad se observa que cada persona realiza la actividad que le corresponde, logrando el resultado que se le pide, pero se puede visualizar que no existe un equipo de trabajo como tal, razón por la cual los resultados por los criterios varían notablemente.

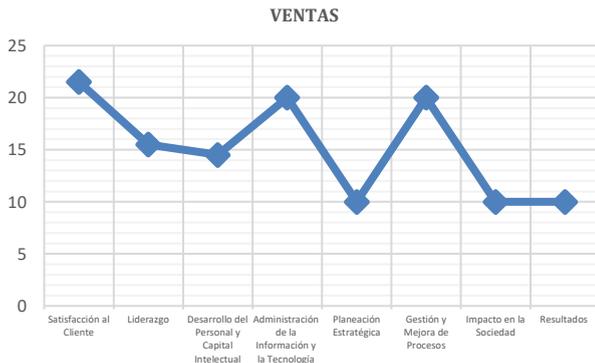


Gráfico 8 Resultado del área de ventas

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

El área de Ventas muestra un resultado muy bajo, ubicándolo en un 3er lugar junto con Mantenimiento seguido por Crédito y Cobranza, áreas que como todas las anteriores son importantes para el funcionamiento eficiente de la empresa. Los criterios antes mencionados se encuentran por debajo del 25% de aceptabilidad, mostrando la falta de trabajo estratégico en todas las áreas.

Los resultados obtenidos se integraron en un grafica general para conocer el perfil general de la industria del cartón estos resultados se muestran en la Grafica 9, se recomienda no realizar un análisis particular de esta gráfica, pues estos resultados deben ponderarse para conocer el nivel en el que se encuentra la industria del sector estudiado.

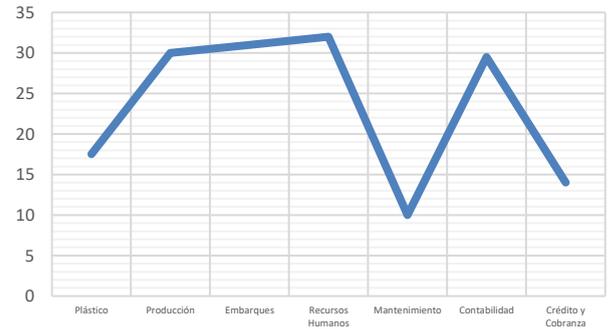


Gráfico 9 Perfil general de la industria del cartón en el estado de Tabasco

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la ponderación realizada para cada área integrada en el estudio, y finalmente al estimar el promedio general se ubica dicho resultado en su nivel correspondiente. De acuerdo al cuestionario de auto diagnóstico se establece una ponderación que va del 0 al 100, esta ponderación denota el porcentaje de avance en cada criterio, y establece de manera predeterminada la fase de crecimiento en que se encuentra cada criterio dentro de la empresa.

Esa tabla de ponderación se muestra en la Tabla 2.

Resultado Generales por área	
Jefe de plástico	17.81%
Jefe de Producción	30.13%
Embarques	36.38%
Recursos Humanos	34.50%
Mantenimiento	10.44%
Contabilidad	36.00%
Crédito y cobranza	15.56%
Ventas	19.33%
TOTAL	200.15%
PROMEDIO GENERAL	25.02%

Tabla 1 Perfil general de la industria del cartón en el estado de Tabasco

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

80 - 100	Clase Mundial
65 - 80	Competente
46 - 60	Confiable
25 - 40	En desarrollo
0 - 20	Inicial

Tabla 2 Tabla de ponderación de resultados

Propuesta

De acuerdo a los resultados analizados en las gráficas, es necesario un compromiso para generar y desarrollar al capital intelectual, cambiar como primer paso la cultura organizacional, ya que sin duda esto fundamenta el desarrollo, mejora y crecimiento de toda organización, para lograr esto es necesario contar con un líder participativo que juegue realmente el papel que se debe con cada elemento de la organización, por lo que es necesario un cambio inmediato en este sentido, dado lo anterior, los resultados, en cuanto a meta propuesta para la producción, se alcanzan, aunque no se usan los medios apropiados para llegar a esos resultados.

En el caso de la industria del cartón en el estado de Tabasco y de acuerdo a lo que detectado a través de este estudio es necesario mejorar la productividad dentro de los procesos productivos e impactar notablemente la gestión global de la organización, por lo tanto, el incremento de la productividad de este sector adquiere un valor real estratégico para su competitividad y supervivencia dentro del sector industrial en el cual esta se ubica.



Figura 1 Modelo propuesto para el desarrollo de la Productividad en la Industria del Cartón

Fuente: Percepción de los autores (2017)

En este modelo se exponen los fundamentos de un plan de acción que requiere este sector industrial para optimizar el desarrollo en todos los niveles dentro de la organización, basado en la adopción de la mejora continua como camino para incrementar la productividad el sector industrial del cartón.

La propuesta de este modelo es un plan de acción que surge de la necesidad de aplicar medidas estratégicas para incrementar la productividad logrando de esta manera un incremento en los niveles de producción.

Un aumento de productividad dentro de las operaciones de la industria del cartón, impactará favorablemente en la competitividad del mismo, lo cual permitirá afianzar el posicionamiento de la misma en el mercado local e internacional, así como también la rentabilidad de sus operaciones.

Agradecimientos

El presente trabajo es el producto del esfuerzo y la dedicación de varias personas, que a lo largo del desarrollo del mismo dieron su apoyo al autor y a sus colaboradores.

Este documento surgió como parte de una tesis de maestría, la cual involucró a un estudiante de posgrado al cual se le agradece su dedicación y la motivación para su elaboración; así como a estudiantes de licenciatura que desarrollaron sus proyectos de residencia profesional durante el desarrollo de la misma y que de igual forma dieron su apoyo con la recabación de la información así como el procesamiento de la misma.

Se da gracias igualmente a los compañeros del núcleo académico que se dieron el tiempo para la revisión del material, así como el apoyo que brindaron con sus recomendaciones con el fin de obtener una retroalimentación del trabajo.

De igual modo a la institución de origen el Instituto Tecnológico de Villahermosa por su apoyo al área de investigación.

Al jefe del departamento de posgrado e investigación por su apoyo incondicional y aliento para con la realización del mismo.

Al departamento de ingeniería industrial por promover la investigación dentro de la formación de los alumnos de licenciatura.

Conclusiones

El modelo propuesto para el desarrollo de la productividad en el estado de Tabasco integra los factores y las acciones a seguir para la mejora de la Productividad en la industria del cartón. Son los mecanismos que implementan las estrategias para vencer las barreras que impiden el desarrollo de la misma; están relacionadas con los Objetivos, la Visión y las prioridades. Constituyen el instrumento a través del cual se concretan en la práctica las Estrategias concebidas para alcanzar los Objetivos aprobados y en el que se manifiesta o proyecta el vínculo planificación-ejecución. Los pasos de este modelo sugieren un Plan de Acción integrado por 4 etapas fundamentales: medición, formulación, implementación y resultados.

De manera particular, el desarrollo de esta investigación permitió analizar los factores que inciden en la productividad de la industria del cartón en el estado de Tabasco, los resultados reflejan que es importante dar continuidad con este estudio hasta alcanzar la consolidación de este sector, no solo con los clientes potenciales, debe considerar también los procesos, insumos, productos, pero de manera significativa a su personal. Se recomienda, además: Implantar el Modelo de mejora de manera escalonada, es decir es necesario que los líderes reconozcan sus funciones principales, objetivos y metas.

Referencias

BUENO, E. MORCILLO, P. Y SALMADOR, M. P. (2006). *Dirección Estratégica. Nuevas Perspectivas Teóricas*. Madrid: Editorial Pirámide.

BRIONES, G. (1995). *Métodos y Técnicas de Investigación para las Ciencias Sociales*. 2ª. reimp., México: Editorial Trillas.

CANTÚ, D. H. (2001). *Desarrollo de una Cultura de Calidad*. México: Editorial McGraw Hill.

CROSBY – PHILIP. (1996). *Reflexiones sobre la Calidad*. 2da Edición. México: Editorial McGraw – Hill.

FRED R., DAVID. (1999). *“Conceptos de Administración Estratégica”*. 5ta Edición. México: Editorial Pearson Educacion.

KOONTZ, HAROLD. (2008). *Administración: una perspectiva global y empresarial*. México, D.F.: Editorial McGraw-Hill Interamericana.

FLEITMAN. (2007). *Evaluación integral para implementar modelo de calidad*. México: Editorial Pax.

Diseño, simulación y control de un sistema eólico

LINARES-ENRIQUEZ, Alejandro*† y ROMERO-PASARÓN, Samuel

Departamento de Ingeniería Mecánica, Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco

Recibido Enero 12, 2017; Aceptado Marzo 6, 2017

Resumen

Se presenta una propuesta de abastecimiento a través de energías renovables, se desarrolla con el diseño y la simulación para llevar a cabo un prototipo y análisis de control de un aerogenerador, estableciendo que las energías renovables son una alternativa de generación de energía limpia y eficiente. Se analiza la conversión de energía mecánica de los elementos del sistema para definir las variables que intervienen y los parámetros a controlar. Se analiza desde el eje de baja velocidad, hasta el generador, considerando la potencia útil que se obtiene del viento al eje a una velocidad angular inicial. Se establece la mecánica de materiales, la dinámica, cinética y el sistema de control especificando la forma y el intervalo de control. Se simula el sistema para obtener un prototipo y se desarrolla el control para conocer su respuesta en estado estable y en estado transitorio, estableciendo el funcionamiento del sistema y su estabilidad a través de estrategias de control moderno y redes neuronales artificiales, con estos análisis determinar el comportamiento del sistema, control y operación, conociendo el proceso de aprendizaje y adaptación. Se establecen las ventajas de cada modelo de control, su respuesta para definir su implementación.

Diseño, Simulación, Control, Sistema Eólico, Sistema Mecánico**Abstract**

It presents a proposal of supply through renewable energies, is developed with the design and simulation to carry out a prototype and control analysis of a wind turbine, establishing that renewable energy is an alternative of generating clean and efficient energy. The mechanical energy conversion of the elements of the system is analyzed to define the variables involved and the parameters to be controlled. It is analyzed from the low speed axis, to the generator, considering the useful power that is obtained from the wind to the axis at an initial angular velocity. It establishes the mechanics of materials, dynamics, kinetics and the control system specifying the shape and the interval of control. It simulates the system to obtain a prototype and develops the control to know its response in steady state and in a transient state, establishing the operation of the system and its stability through modern control strategies and artificial neural networks, with these analyzes determine the System behavior, control and operation, knowing the process of learning and adaptation. It establishes the advantages of each control model, its response to define its implementation.

Software, programming, electricity, kilowatt

Citación: LINARES-ENRIQUEZ, Alejandro y ROMERO-PASARÓN, Samuel. Diseño, simulación y control de un sistema eólico. *Revista del Desarrollo Tecnológico* 2017, 1-1: 19-29

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: alejandroing06@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La energía eólica es hoy en día una de las tecnologías renovables más competitivas y nos brinda los mayores beneficios y posibilidades. Su empleo produce impactos en el medio ambiente y a su vez tiene poca afectación por los cambios que el hombre provoca a su entorno. Un aerogenerador convierte la energía mecánica en energía eléctrica través de la energía cinética del sistema. Se determina la potencia y el torque que se transmite al aerogenerador, se establece el diseño, la simulación del sistema y forma de control, el cual es determinante para el funcionamiento y operación del sistema eólico, por lo que el sistema pretende autoabastecer energía en el sector de baja potencia.

La producción de energía eléctrica generada en un determinado sitio, depende de diferentes variables como la velocidad del viento en el sitio y las características de las aspas, además dentro del diseño se considera el análisis del tren de engranajes para la relación de velocidades y las características de funcionamiento, como la potencia, la velocidad angular y el torque que no cuentan actualmente los equipos. Así mismo, el modelo desarrollado es un medio mecánico de transformación para la relación de velocidad angular, el torque y la potencia con los mismos parámetros para la caracterización de las diferentes velocidades. Los parámetros a seleccionar dependerán de la potencia eléctrica que es necesaria en el lugar de la instalación y el consumo de energía kWh que se establezca, por lo que es importante obtener el máximo rendimiento de la potencia.

Con base a este último propósito, la propuesta analiza los componentes de un aerogenerador dentro del diseño, la simulación y la conversión de energía, para obtener la potencia mecánica que se transforma en energía eléctrica.

Se analizan los elementos de diseño, se establece el movimiento rotacional y la transmisión de potencia. Se definen las variables que intervienen en la transformación de parámetros dentro del modelado del sistema.

Además, se determinan los parámetros para el desarrollo del modelo del sistema eólico, se analiza la energía cinética y la energía potencial. Se definen las variables que intervienen en el sistema mecánico, con estas variables se determinan los parámetros a controlar.

Al controlar el sistema no se presentan variaciones en la potencia con la velocidad angular, además de fallas por esfuerzo cortante están controladas al controlar el torque. Se presenta la estructura para el control del sistema, comparando esta respuesta, entre control moderno y control inteligente, se desarrolla la simulación para establecer la respuesta de control del sistema y los parámetros a controlar.

México dispone de un potencial renovable indiscutible, con un amplio porfolio de recursos eólicos como los parques eólicos ya instalados. De acuerdo al estudio sobre el potencial eólico, México cuenta con un potencial eólico superior a los 50 GW. Esto de acuerdo a lo que comenta el estudio de la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) y otras entidades, en el plan integral de desarrollo de las energías renovables en México 2013-2018 [1].

Dos aplicaciones que ha tenido la energía eólica a través del tiempo son: la navegación de vela y los molinos de viento. La primera de estas aplicaciones es la navegación de vela, es casi tan antigua como la propia humanidad. La otra aplicación son los molinos de viento, cuyo origen ubican algunos autores también antes de nuestra era, permitiendo la producción de cereales, donde prácticamente no existía la posibilidad de empleo de energía hidráulica.

La propuesta establece un aerogenerador con incremento de velocidad para el tipo de generador, ya que actualmente no se tiene este parámetro de incremento de velocidad angular, conservando la potencia lo que permita proporcionar una parte importante de la energía requerida en los hogares principalmente en las áreas rurales, pequeñas fábricas y comercios.

Las turbinas para aplicaciones de baja potencia pueden estar en el rango de 1kW hasta los 100 kW, dependiendo de la cantidad de electricidad que se desee generar que se plasma en un diagrama unifilar. Para aplicaciones residenciales o comerciales, es recomendable definir las necesidades de energía para establecer el tamaño adecuado del equipo que se requiere. Adicional al equipo eólico, podemos apoyarnos de nuevas tecnologías en iluminación tipo led, refrigeradores eficientes y motores de alta eficiencia, para el aprovechamiento de la energía generada. Debido a que la eficiencia energética apoya en la producción de energía. Con un diagrama unifilar podemos determinar el tamaño que se requiere de acuerdo a sus consumos de electricidad y al recurso eólico de su localidad, además del tamaño del aerogenerador a utilizar.

Metodología a desarrollar

Estos sistemas por lo general están compuestos por el rotor, multiplicador, freno, generador, cola, torre, cableado, controladores y las baterías, como se establece en la simulación y se modela el equipo de acuerdo a la Figura 1. A través del giro de los alabes la turbina se convierte la energía cinética del viento en un movimiento rotatorio que acciona el generador. La energía disponible del viento es básicamente la energía cinética de las masas de aire moviéndose sobre la superficie de la tierra.

La energía cinética del aire moviéndose a una velocidad v está dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Considerando un rotor con un área seccional A expuesta a una ráfaga de aire, la energía cinética de la ráfaga de aire disponible para una turbina es:

$$E_c = \frac{1}{2}\rho_a v^2 \quad (2)$$

La potencia disponible en una corriente de aire está dada por la ecuación (2), donde una turbina no puede extraer esta potencia completamente del viento.



Figura 1 Componentes de un Aerogenerador

Fuente: Elaboración propia

Esta eficiencia es llamada comúnmente como coeficiente de potencia (C_p), dando:

$$C_p = \frac{2P_T}{\rho_a A_T v^3} \quad (3)$$

Una turbina eólica no es capaz de extraer la potencia total que se encuentra en una masa de aire, sino que solo es capaz de extraer una fracción de está.

Mediante la ley de la conservación de la masa, el flujo de la masa de aire debe ser igual en todo el tubo de flujo y el gasto másico constante, por lo cual:

$$\dot{m} = \rho_a A_1 V_1 = \rho_a A V_w = \rho_a A_2 V_2 \quad (4)$$

Donde la variación de la energía cinética del viento por unidad de tiempo es:

$$P_{util} = \frac{d(E_c)}{dt} = \frac{1}{2} \rho_a A V_w (V_1^2 - V_2^2) = \rho_a A V_w^2 (V_1 - V_2) \quad (5)$$

Estableciendo que la potencia útil máxima que proporciona el rotor considera el coeficiente de potencia que se conoce como el límite teórico de Betz, no es mayor al 59.5%. [2].

Dentro del diseño el movimiento de rotación es importante para el análisis del sistema eólico, por lo que el análisis del movimiento rotacional considerando la velocidad angular w y, la aceleración angular, α . El par T , que depende de la fuerza aplicada, de la distancia entre el eje de rotación y la línea de acción de la fuerza.

La ley de Newton de rotación considera la relación entre el par aplicado y su aceleración angular resultante y establece que la suma algebraica de los momentos o pares alrededor de un eje fijo es igual al producto de la inercia por la aceleración angular alrededor del eje, la ecuación es:

$$\sum T = J\alpha = J \frac{dw}{dt} = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (6)$$

Donde J es la inercia, α es la aceleración angular, T es el par, w es la velocidad angular y θ es el desplazamiento angular [3, 4, 5, 6].

Si se tiene un par constante en el movimiento rotacional, la potencia está dada por:

$$P = Tw \quad (7)$$

Para el diseño de la transmisión de potencia, esta debe considerar los requisitos de potencia, las especificaciones de engranes, el diseño del eje, el análisis de fuerzas, la selección de cojinetes y el análisis final dentro del diseño para obtener el sistema real [3,6].

Un tren de engranes es un dispositivo mecánico que transmite energía desde una parte del sistema a otro, de tal forma que se altera el par, la velocidad y el desplazamiento. Las relaciones entre los pares T_1 y T_2 , los desplazamientos angulares θ_1 y θ_2 , los radios r_1 y r_2 , las velocidades angulares w_1 y w_2 y los números de dientes N_1 y N_2 del tren de engranes, deben ser consideradas para realizar el análisis de los engranes.

De esta manera, que se obtienen las siguientes relaciones del sistema de engranes:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{N_1}{N_2} = N \quad (8)$$

Modelo del Sistema Eólico

La potencia disponible en la turbina es la potencia de entrada y se encuentra a partir de:

$$P_{util} = P_w C_p = \frac{1}{2} C_p \rho_a A V_w^3 \quad (9)$$

La potencia que extrae la turbina eólica, se puede ver de acuerdo a la ecuación (7).

Para el análisis del modelo dinámico es importante considerar el movimiento de rotación y del tren de engranes, que se muestra en la Figura 2, donde el modelo dinámico está formado por los elementos que se encargan de transmitir la energía del eje de baja velocidad hasta el eje de alta velocidad.

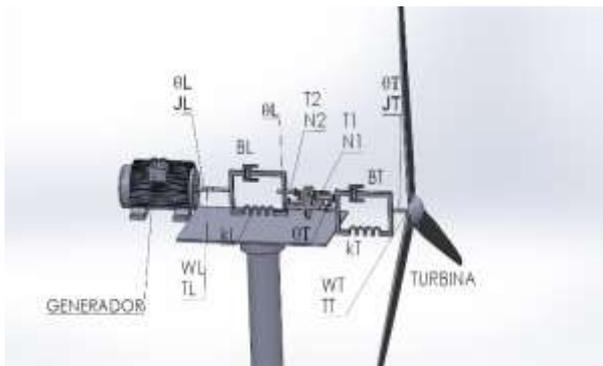


Figura 2 Modelo Dinámico

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la segunda ley de Newton para el movimiento rotacional, se tiene:

$$\sum T = J\dot{\omega} \quad (10)$$

Para el eje de baja velocidad, es decir, para el eje de la turbina se tiene:

$$T_T - B_T \frac{d(\theta_T)}{dt} - k_T \theta_T - T_1 = J_T \frac{d^2 \theta_T}{dt^2} \quad (11)$$

Para el eje de alta velocidad, es decir, para el eje de la carga se tiene:

$$T_2 - B_L \frac{d(\theta_L)}{dt} - k_L \theta_L - T_L = J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} \quad (12)$$

Igualando las ecuaciones para T_2 , se obtiene:

$$\frac{T_T}{N} = J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + \frac{J_T}{N} \frac{d^2 \theta_T}{dt^2} + B_L \frac{d(\theta_L)}{dt} + \frac{B_T}{N} \frac{d(\theta_T)}{dt} + k_L \theta_L + \frac{k_T}{N} \theta_T + T_L \quad (13)$$

Agruparse términos, se obtiene:

$$\frac{T_T}{N} = J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + \frac{J_T}{N^2} \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + \frac{d(\theta_L)}{dt} \left(B_L + \frac{B_T}{N^2} \right) + \theta_L \left(k_L + \frac{k_T}{N^2} \right) + T_L \quad (14)$$

El modelo obtenido es un sistema existente con tres elementos como parámetros a controlar

Se puede analizar el sistema equivalente obteniendo el modelo en variables de estado, al apoyarse en la ley de Newton para el movimiento rotacional.

El sistema equivalente se obtiene con las relaciones obtenidas y se tiene:

$$\frac{J_T}{N^2} \dot{\omega}_E = \frac{T_T}{N} - B_e \omega_E + B_e \omega_L - k_e \theta_e \quad (15)$$

$$J_L \dot{\omega}_L = B_e \omega_E - B_e \omega_L - k_e \theta_e - T_L \quad (16)$$

Al despejar $\dot{\omega}_E$ y $\dot{\omega}_L$ de la ecuación (15) y (16) se tiene:

$$\dot{\omega}_E = -\frac{B_e N^2}{J_T} \omega_{Te} + \frac{B_e N^2}{J_T} \omega_L - \frac{k_e N^2}{J_T} \theta_e + \frac{T_T N}{J_T} \quad (17)$$

$$\dot{\omega}_L = \frac{B_e}{J_L} \omega_{Te} - \frac{B_e}{J_L} \omega_L + \frac{k_e}{J_L} \theta_e + \frac{T_T}{N J_L} \quad (18)$$

y

$$\dot{\theta}_e = \omega_E - \omega_L \quad (19)$$

De manera que la representación en variables de estado del sistema es de la forma:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (20)$$

$$y = Cx \quad (21)$$

El modelo dado representa el sistema dinámico del sistema eólico en variables de estado. En el cual al analizar el torque se obtiene el esfuerzo cortante con los parámetros del sistema mecánico [7,8].

Además el seguimiento de la potencia eléctrica se realiza después de determinar los parámetros mecánicos del aerogenerador en el eje primario o eje de baja velocidad, con la velocidad angular y el torque, se obtiene la potencia a la entrada. Los parámetros de entrada se transforman en el sistema de engranajes, desarrollando una velocidad angular y torque en el eje de alta velocidad o en el eje del generador, obteniéndose la potencia mecánica que será la entrada al generador eléctrico [9].

Control Moderno y Redes Neuronales Artificiales

Para los sistemas de generación de energía eólica uno de los problemas característicos es el control del equipo, por lo que es determinante analizar los diferentes modos de operación del sistema eólico a velocidad variable. Se analiza el sistema de acuerdo al diseño, a la simulación y al modelado desarrollado, se establecen los parámetros mecánicos a controlar y establecer la comparación del desempeño del equipo. La simulación permite definir el sistema, modelarlo, desarrollar las pruebas dentro del diseño y la formulación de un prototipo. El control establece reconocer las variables para mantener el sistema dentro de los parámetros de operación. Este control es la comparación del sistema por control moderno y el control a través de Redes Neuronales Artificiales (RNA).

El sistema se describe en función del tiempo con sus entradas, su proceso o estado transitorio y estable y, sus salidas, las cuales pueden ser elegidas con base al resultado que se quiere lograr en el sistema. También con el sistema lineal en variables de estado se puede establecer la representación en una matriz de transferencia. La matriz $G(s)$ como estado, $Y(s)$ como estrada y $U(s)$ como la salida, en el dominio de Laplace, que se denomina matriz de transferencia. La matriz de transferencia $G(s)$ en términos de Laplace está relacionada con las matrices A B C y D en variables de estado [10, 11, 12].

Para tener un control del sistema, se deben conocer que variables intervienen para la obtención de parámetros de operación y la generación de la matriz de estados. Para ello, se determinan los elementos del sistema eólico que serán las variables de inicio para poder desarrollar el estudio del sistema, estos valores se muestran en la Tabla 1. Estas variables determinan y establecen las características del sistema mecánico del aerogenerador.

Concepto	Valor	Unidad
Densidad del aire ρ_a	1.2	kg/m ³
Radio del Rotor de la Turbina	3	m.
Radio del eje de Baja Velocidad	0.025	m.
Radio del eje de Alta Velocidad	0.025	m.
Velocidad del viento	0-25	m/s
Constante de rigidez del eje de baja velocidad k_e	150	N.m/rad
Constante de rigidez del eje de alta velocidad k_c	15	N.m/rad
Coefficiente de fricción viscosa del eje de baja velocidad	0.24	N.m.s/rad
Coefficiente de fricción viscosa del eje de alta velocidad	0.055	N.m.s/rad
Relación de engranajes del sistema N	8	

Tabla 1 Variables del sistema eólico

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3 se muestran los parámetros para el desarrollo del modelo realizado, se establece el sistema de transmisión, con la relación del tren de engranajes.

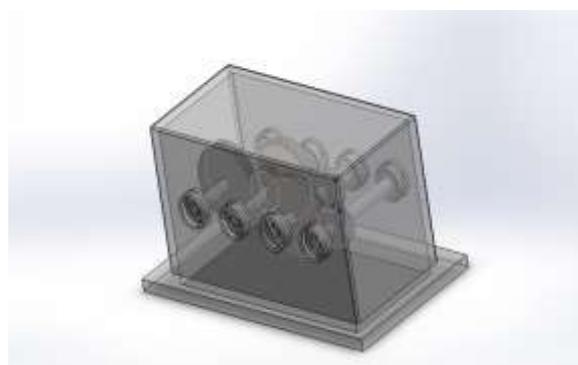


Figura 3 Sistema Mecánico

Fuente: Elaboración propia

Resultados

El análisis considera conocer los siguientes parámetros de funcionamiento, en la gráfica 1, se muestra el comportamiento de la potencia que se genera con la velocidad del viento en el intervalo de 5 a 10 m/s. La potencia útil se establece para una potencia de 2 kW a 10 kW. Esta potencia útil determina el torque que se generará en el eje de baja velocidad con base a la velocidad angular obtenida.

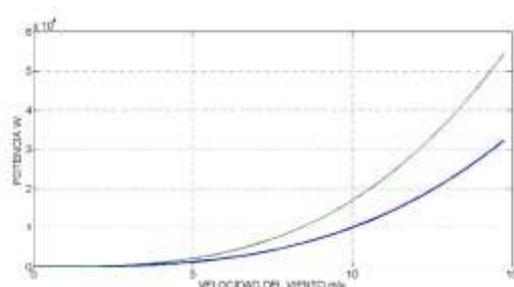


Gráfico 1 Potencia nominal y la potencia útil con base a la velocidad del viento

Fuente: Elaboración propia

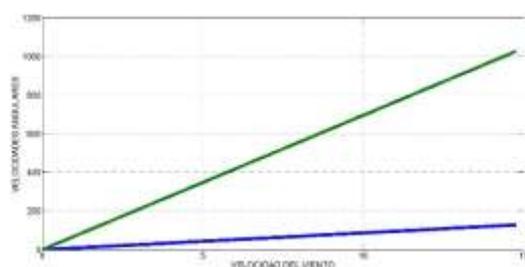


Gráfico 2 Velocidades angulares en el tren de engranajes

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 2, se muestra el comportamiento de la velocidad angular en el tren de engranajes, con este resultado, la velocidad en el eje de alta velocidad proporcionará la potencia solicitada y a su vez, que el torque no provoque fallas en el sistema eólico de acuerdo a la mecánica de materiales. En la gráfica 3, se muestra el comportamiento de la potencia mecánica en el eje de baja velocidad y en el de alta velocidad.

La potencia de salida es la que se transmitirá al generador eléctrico para su aprovechamiento. De esta manera para una potencia de 5kW la velocidad del viento está en el orden de los 6 a 8 m/s. Con esta potencia, se garantiza el correcto funcionamiento del consumo de energía, generando un abastecimiento de 12 kWh al día, con un consumo promedio de 360 kWh al mes.

Con él análisis del sistema mecánico del aerogenerador podemos conocer la velocidad angular y la potencia. Además el torque es un parámetro dentro del diseño y la resistencia de materiales, que debe ser calculado correctamente. Se debe analizar el torque para que no se provoquen fallas en el sistema. Asimismo se debe tener el funcionamiento adecuado para lograr controlar tanto el torque como los demás parámetros en él sistema, como se muestra en la gráfica 4, donde el torque está en el intervalo de 90 N-m a 720 N-m.

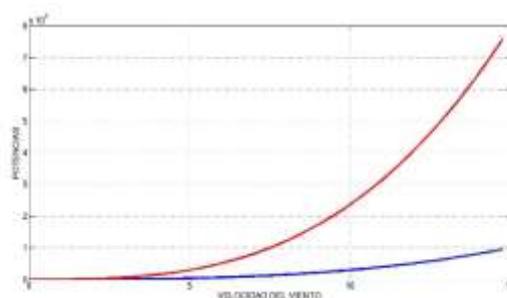


Gráfico 3 Potencia del eje de baja velocidad y en el eje de alta velocidad

Fuente: Elaboración propia

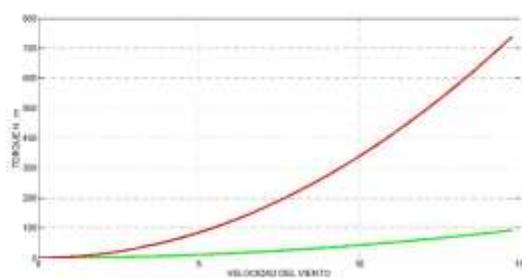


Gráfico 4 Torque en el eje de baja y alta velocidad

Fuente: Elaboración propia

Para determinar el control del sistema eólico establecemos la capacidad del sistema de tal forma que se comporte de la manera que se desea, al diseñar un sistema de control, se debe tener la capacidad de predecir su comportamiento dinámico a partir del conocimiento de los componentes, para nuestro análisis del sistema eólico desde el eje de baja velocidad al generador de energía, donde la característica más importante del comportamiento dinámico del sistema de control es la estabilidad.

Al analizar un sistema de control, se debe examinar el comportamiento de la respuesta transitoria y en estado estable. Esta información proporciona los elementos necesarios para el diseño de una estrategia y algoritmo de control. Las estrategias se basan en la estructura y acomodo de los componentes que interactúan con la planta, mientras que los algoritmos se diseñan una vez que se ha elegido la estrategia y se basan en la dinámica del sistema y la dinámica deseada [8, 11, 13].

Control de un aerogenerador basado en control moderno por variables de estado (VE).

Para el análisis del sistema mecánico en variables de estado se obtiene realizando el programa de la función de transferencia e introduciendo los valores a la simulación de Matlab dando como resultado el programa siguiente:

$$A_g = \begin{bmatrix} -(B_e * N^2) / J_e & (B_e * N^2) / J_e \\ (k_e * N^2) / J_e & B_e / J_c - B_e / J_c k_e / J_c \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_g = [N / J_e; 1 / (N * J_c); 0]$$

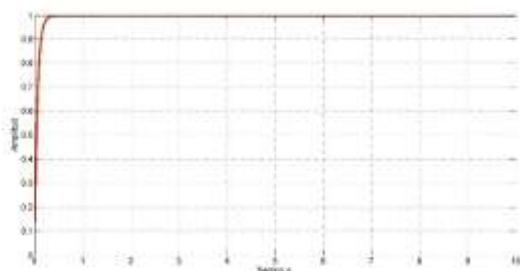
$$C_g = [1 \ 0 \ 0]$$

$$D_g = [0]$$

Con la obtención de la matriz en variables de estado obtenemos las ganancias para la estabilidad en la respuesta del equipo, además de la función de transferencia para obtener los polos y ceros que tiene el sistema mecánico para su controlabilidad y observabilidad.

Al estructurar el sistema en variables de estado obtenemos la matriz de estados y todos los parámetros que intervienen en el control, entre los que están el torque y que no existan cambios en la velocidad angular, analizando su comportamiento.

En la gráfica 5, se muestra la respuesta del sistema de las variables de estado donde se establece su estabilidad, el control de la velocidad angular y el par motor. Con estos parámetros se controla la potencia y el esfuerzo cortante para que funcione correctamente. Al introducir las variables y los parámetros a la simulación, se determina cómo se comporta el sistema, siendo una alternativa de solución considerar el control por variables de estado de acuerdo a las matrices A, B, C y D para obtener la respuesta deseada. Al analizar la planta y controlar los parámetros como la velocidad angular y el par, también se controla el torque, la potencia y el esfuerzo cortante, siendo una solución al sistema [15,16].



Gráfica 5 Respuesta del sistema mecánico del aerogenerador por VE

Fuente: Elaboración propia

Control de un aerogenerador basado en Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Este sistema de control considerado en su conjunto, debe responder con la exactitud, estabilidad y rapidez necesaria ante la variabilidad y aleatoriedad del viento. La relación entre sus variables de salida y la de entrada en la velocidad del viento que sea capaz de aprovechar la máxima potencia disponible en el viento en una zona de trabajo y de limitarla en otra, cuando se supere un valor máximo que se comparará en la velocidad angular que alcanzará el eje primario, y que no sobrepase la capacidad mecánica considerando el esfuerzo constante, con par torsional y la potencia [13,14].

Para un aerogenerador el método de control es por reconocimiento de patrones y de valores de la velocidad del viento que se analizaran y serán plasmados en la velocidad angular del eje primario, su par torsional y su potencia, que serán las variables de entrada. Se recolectan los datos como serie de tiempo, actualizándose dato tras dato. Al tener un conjunto de datos entonces se procesan en el módulo de reconocimiento de patrones, donde la topología adecuada de la RNA Backpropagation interpretará a los datos y hará la mejor clasificación del mejor patrón. Así, la forma de control del aerogenerador dependerá del tipo de patrón presentado y de la predicción de sus valores futuros.

Para el control de un sistema eólico se tienen dos estrategias de control que son: El control a potencia constante y control a torque constante, se optó por el control a torque constante, donde el sistema de control tiene como objetivo mantener constante el torque producido por la turbina para velocidades del viento arriba de la velocidad nominal. La ventaja principal del control de torque es que se reducen los esfuerzos mecánicos de los componentes del tren de potencia, reduciendo el número de fallas y costos de mantenimiento.

La red neuronal multicapa que se analiza es una red neuronal de 3 entradas, 4 capas en su primera capa oculta, 4 capas en su segunda capa oculta y 1 capa de salida determinando el torque que se mantenga en los valores establecidos para su control, teniendo como funciones de entrenamiento:

$$P = [T; w; P_u];$$

```
net= newff([0 720;0 900;0 5000],[4,4,1],
{'tansig','logsig','purelin'},'traingdm');
```

La respuesta por la red neuronal establece que los valores son concretos y que no existen pequeñas variaciones en los valores de entrada, que son la velocidad angular, el torque y la potencia.

En la gráfica 6, se desarrolla la simulación del sistema eólico, se analiza a través de redes neuronales, dando solución a los parámetros a controlar y considerando el parámetro de salida deseado, generando el funcionamiento adecuado en él comportamiento del control del sistema eólico. Se obtiene la representación para el control del sistema mecánico en el cual se analiza el comportamiento del aerogenerador y su control por RNA.

Se establece la respuesta del sistema para su estabilidad considerando la función “satlin” que es una función de transferencia lineal positiva, generando el valor de salida como el torque en el eje de alta velocidad, manteniendo los valores hasta los 720 N-m como parámetros para su observación, determinando que los parámetros se estabilizaran en la red neuronal, generando que los elementos de salida que es el torque se mantenga en el valor de estabilidad.

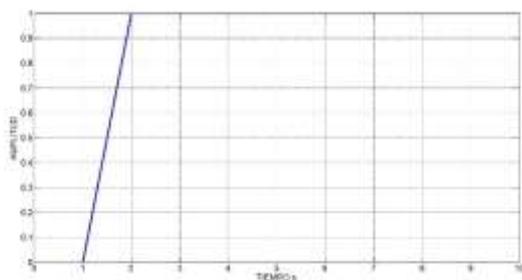


Gráfico 6 Respuesta del sistema mecánico del aerogenerador por RNA

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

El analizar el sistema mecánico permite establecer los parámetros y las variables a controlar, siendo de suma importancia los elementos de diseño y la ingeniería para conocer todas las características que hacen funcionar, mover y estructurar al aerogenerador. Además de los mecanismos y la estructura, se debe analizar el comportamiento del equipo para que no ocurran fallas mecánicas que se contemplan en el proyecto y las alternativas de solución.

Se establecen las técnicas de control comparando las respuestas en los diferentes casos para determinar cuál de estos sistemas de control darán un mejor funcionamiento al sistema eólico y su estabilidad. Estableciendo que no existan cambios en la aceleración del sistema y en la velocidad angular, dando como resultado el controlar el torque y la potencia.

Con la realización de programas y de la simulación obtenemos el comportamiento del sistema eólico y la respuesta de control en Variables de Estado, estableciendo una primera solución de la respuesta deseada del sistema con todos los parámetros a considerar, logrando los argumentos para el correcto funcionamiento del aerogenerador mostrado en el proyecto.

Con el desarrollo de programas y simulación de la red neuronal artificial a través de MATLAB obtenemos como los datos de entrenamiento y los datos de activación establecen el modelo neuronal, la forma de aprendizaje y la arquitectura que darán como salida el control del sistema eólico que presenta un mejor resultado de control.

El proyecto establece, desarrolla y muestra la importancia del diseño, la simulación y el control dentro de la ingeniería para los sistemas eólicos, por lo que los resultados obtenidos demuestran la estabilidad, el funcionamiento y la operación del aerogenerador.

Referencias

- [1]. PwC en colaboración con Climate Works Foundation, Iniciativa Mexicana para las Energías Renovables (IMERE) y el World Wildlife Fund (WWF), Plan integral para el desarrollo de las energías renovables en México 2013-2018 Propuesta de escenarios y acciones necesarias para su desarrollo.
- [2]. Raúl Garduño Ramírez, Marino Sánchez Parra, Roberto Hernández González, Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica de Sistema del Control de Aerogeneradores, Boletín IIE, Abril – Junio - 2012.
- [3]. Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley, Ed. Mc Graw Hill, Novena Edición.

- [4] Ferdinand P.Beer, E Russell Johnston, Jr. Mecánica de Materiales, Tercera edición, Mc Graw Hill, 2004.
- [5] Ferdinand P.Beer, E Russell Johnston, Jr. Mecánica Vectorial para Ingenieros, Octava edición, Mc Graw Hill, 2007.
- [6] Hamilton H. Mabie, Charles F. Reinholtz, Mecanismos y Dinámica de Maquinaria, editorial Limusa Wiley, segunda edición.
- [7] Benjamin C. Kuo, Sistemas de Control Automático, Séptima Edición, Prentice Hall Hispanoamericana.
- [8] Norman S. Nice, Sistemas de Control para Ingeniería, Tercera Edición, Editorial Continental.
- [9] William H. Hayt, Jr., Jack E. Kemmerly, Análisis de Circuitos en Ingeniería, cuarta edición, Mc GrawHill.
- [10] Jean Jacques E. Slotine Weiping Li, Applied Nonlinear Control, Editorial Prentice Hall.
- [11] Katsuhito Ogata, Dinámica de Sistemas, Editorial Prentice Hall Hispanoamericana SA, primera edición, 1987.
- [12] William Bolton, Mecatrónica, Sistemas de Control Electrónico en la ingeniería Mecánica y Eléctrica, editorial Alfaomega, cuarta edición.
- [13]. Simon Haykin, Neural Networks a Comprehensive Foundation, Segunda Edición, Prentice Hall, 1999
- [14]. Antonio J. Serrano, Emilio Soria, José D. Martín. Redes Neuronales Artificiales, 2009.
- [15]. Fernando Reyes Cortes, MATLAB, Aplicado a la Robotica y Mecatronica, Editorial Alfaomega, 2012.
- [16]. S.N. Sivanandam, S.Sumathi and S.N. Deepa, Introduction to Fuzzy Logic Using Matlab, Springer, 2007.

Laboratorio virtual de robótica basado en Matlab®/Simulink®/RobotStudio

LORETO-GÓMEZ, Gerardo*†, MORALES-MORFIN, Marcela, SÁNCHEZ-SUAREZ, Isahi' y VÁZQUEZ-INFANTE, J. Jesús

Instituto Tecnológico Superior de Uruapan

'Universidad Politécnica de Uruapan.

Recibido Enero 13, 2017; Aceptado Marzo 15, 2017

Resumen

Las herramientas de simulación han demostrado ser un mecanismo importante tanto para la enseñanza como para la investigación en el campo de la robótica industrial. El uso de estas herramientas proporciona múltiples funcionalidades no sólo en la teoría a nivel de conceptos, sino también a nivel de implementación. En este trabajo se propone un Laboratorio virtual de robótica basado en los programas de Matlab®/Simulink®/RobotStudio que tiene por objetivo vincular un sistema de programación real de robots industriales y un programa de simulación general que permita diseñar nuevos algoritmos de control. En el presente trabajo se desarrolló la aplicación de organización de objetos por color y forma que son detectados en el área de trabajo de un robot industrial a través de un sistema de visión integrado por el sensor Kinect. La información visual es enviada al simulador de ABB RobotStudio para genera automáticamente cada uno de los objetos en su entorno virtual, para finalmente, implementar la tarea de organización de los objetos por medio de un robot previamente configurado, lo anterior permite validar el potencial que tendría esta plataforma de simulación basada en los programas Matlab®/Simulink®/RobotStudio.

RobotStudio, Control visual, Robótica

Citación: LORETO-GOMEZ, Gerardo, MORALES-MORFIN, Marcela, SANCHEZ-SUAREZ, Isahi y VAZQUEZ-INFANTE, J. Jesús. Laboratorio virtual de robótica basado en Matlab®/Simulink®/RobotStudio. Revista del desarrollo Tecnológico 2017, 1-1: 30-40

Abstract

Simulation tools have proven to be an important mechanism for both teaching and research in the field of industrial robotics. The use of these tools provides multiple functionalities not only in theory at the concept level, but also at the implementation level. In this paper we propose a Virtual Robotics Laboratory based on Matlab®/Simulink® /RobotStudio programs that aim to link a real programming system of industrial robots and a general simulation program that allows the design of new control algorithms. In the present work it was developed the application of organization of objects by colour and shape that are detected in the work area of an industrial robot through a vision system integrated by a sensor Kinect. The visual information is sent to the simulator of ABB RobotStudio to automatically generate each of the objects in the virtual simulator, finally, implement the task of organizing these objects by means of a robot previously configured; this allows validating the potential that would have this simulation platform based on Matlab®/Simulink®/ RobotStudio programs.

RobotStudio, Visual control, Robotic

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: gerardoloreto@tecuruapan.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La simulación ha sido reconocida como una herramienta importante en el campo de la robótica industrial, diferentes herramientas son utilizadas para el análisis cinemático y dinámico de los robots industriales, para su programación fuera de línea, para el diseño de diferentes algoritmos de control, para el diseño de las estructuras mecánicas de los robots, para el diseño de celdas robóticas y líneas de producción, entre otras (Žlajpah, L., 2008), (Lázaro-Arvizu, Y., 2015).

La mayoría de los robots industriales disponibles comercialmente están soportados por sistemas de simulación especializados. El uso de herramientas de simulación profesional desarrolladas por los fabricantes de robots mezcla la riqueza de modelar con precisión los robots industriales físicos y los controladores reales. Por lo tanto, permiten trabajar con un modelo que está más cerca del comportamiento real del robot. Este es el caso del *Software* de simulación *RobotStudio*TM de *ABB Robotics* que es una herramienta que puede utilizarse con los robots disponibles de *ABB* y permite crear estaciones robóticas complejas al incorporar componentes y mecanismos creados por el usuario, un aspecto importante, es que permite obtener un ambiente de programación fuera de línea exacto a través de un controlador virtual que ejecuta el mismo código del controlador físico del robot (Connolly, C., 2009).

Por otro lado, existen diferentes herramientas de simulación que permiten el estudio de los temas relacionados con la Robótica. La librería denominada "*Robotics Toolbox for Matlab*" es tal vez una de las contribuciones más importantes en este ámbito desarrollada por Peter Corke (P. Corke, 1996). La librería se ejecuta bajo el entorno de *Matlab*[®] y ofrece un conjunto de herramientas muy completas que incluye una gran cantidad de algoritmos básicos y avanzados para el análisis de diferentes tipos de robots manipuladores.

Sin embargo, una de sus principales limitaciones desde el punto de vista para su aplicación con fines educativos con respecto a otras librerías, es que no tiene una representación realista de los robots y sólo utilizan una representación tipo alambre. Vila y Dominguez, analizan esta librería y sus limitaciones, presentando algunas sugerencias para hacerla más robusta y complementarla (Vila Rosado, D. N., & Dominguez López, J. A., 2005). Por otro lado Gil y colaboradores, desarrollan una librería denominada ARTE (*A Robotics Toolbox for Education*) basada en *Matlab* en la cual se pueden crear representaciones más realistas de los robots (Gil, Arturo, et. al, 2015). González y colaboradores, presentan el software de simulación SnAM, que consiste en un paquete de dominio público escrito en C++. La representación gráfica es manejada por bibliotecas *OpenGL*. Como resultado, SnAM proporciona una herramienta para simular con flexibilidad la cinemática de cualquier tipo de robot serial (González-Palacios, M. A., et. al, 2013).

Otra herramienta similar es presentada por López y colaboradores que permite simular la cinemática de varios robots industriales, desarrollada bajo *Microsoft Visual C++* y que se denominada *RobotScene* (López-Nicolás, et. al., 2009). Damić y colaboradores, proponen un procedimiento para crear modelos visuales en 3D de robots y su exportación al programa *BondSim* (Damić, Vjekoslav; Carića, Ćira; Husić, Maida Ćohodar, 2014).

El presente trabajo describe una aplicación de laboratorio virtual de robótica basada en el programa de Matlab® y *RobotStudio*™ que permite implementar un sistema de visión para la detección de objetos en el área de trabajo de un robot industrial, a partir de esta información se generan los elementos correspondientes en el simulador de *RobotStudio*™ y que son organizados por color y forma por el robot, lo anterior permite validar el potencial que tendría esta plataforma para la enseñanza de la teoría de robots industriales.

Descripción general de la plataforma

La plataforma está compuesta de tres elementos principales que son el sistema de visión, la estación de RobotStudio y finalmente el programa en Matlab, los cuales se describen a continuación:

Sistema de visión

En la robótica, la visión artificial es utilizada para que el robot pueda interactuar fácilmente con su entorno de trabajo. En el presente trabajo se utilizó el sensor Kinect que es un dispositivo desarrollado por la compañía Microsoft para la consola de videojuegos Xbox 360. El sensor Kinect contiene una cámara RGB (Rojo Verde Azul); un sensor de profundidad constituido por un emisor y una cámara de infrarrojos, ver figura 1.



Figura 1 Microsoft Kinect.

Fuente: Elaboración propia

El sensor RGB es una cámara de video de 3 colores que se puede utilizar en dos configuraciones, la primera permite la captura de imágenes con una resolución de 640 x 480 píxeles a una velocidad de captura de 30 fotogramas por segundo, la segunda configuración obtiene imágenes de 1280 x 1024 píxeles a una velocidad de 15 fotogramas por segundo. El emisor de infrarrojos, emite una luz infrarroja que al pasar a través de un difusor genera un patrón de puntos que se proyectan sobre los objetos que se encuentren en el rango visible de 50 cm a 400 cm de profundidad. La cámara infrarroja, recibe la luz infrarroja proyectada y puede configurarse en tres modos; el primero, obtiene imágenes infrarrojas de 640 x 480 píxeles pero sin la profundidad de los objetos a una velocidad de 30 fotogramas por segundo; el segundo, tiene una resolución de 1280 x 1024 píxeles a una velocidad de 15 fotogramas por segundo; el tercer y último modo de funcionamiento adquiere tanto imágenes infrarrojas como de profundidad de 640 x 480 píxeles a una velocidad de 30 fotogramas por segundo.

La adquisición de imágenes se realiza en el entorno de Matlab; el primer controlador que se necesita instalar es el Kinect SDK (del inglés *Software Development Kit*) para Windows, en este caso se utiliza la versión 1.7 descargada de manera libre de la página de Microsoft. Una vez instalado el controlador, el LED del Kinect comienza a parpadear, esto significa que está correctamente instalado. Específicamente se requiere esta versión ya que versiones posteriores a la 1.8 no detecta los componentes del Kinect en Windows. A continuación, se debe instalar las librerías *Kinect for Windows Sensor*, además de la *OS Generic Video Interface*.

Para lograr la adquisición de imágenes en Matlab se utiliza la librería *Image Acquisition Toolbox* de Matlab. Antes de activar los sensores, se deben configurar los parámetros de captura de la imagen.

La activación de los sensores del Kinect se hace mediante la función *start*. El sensor RGB del Kinect tiene como nombre predeterminado *Kinect 1* y el sensor de profundidad *Kinect 2*; para obtener una vista previa de las imágenes que está recibiendo el Kinect se usa la función *preview*. Una vez iniciados los sensores solamente se necesita capturar las imágenes que cada sensor está detectando, esto mediante la función *getsnapshot*.

El objetivo de la detección de objetos por el sistema de visión es el de simular el movimiento que deberá realizar un robot manipulador industrial para clasificar cada uno por color y por forma. Para eso es necesario conocer la posición y orientación en que se encuentra cada objeto, así como su altura, color y forma. Al realizar el procesamiento de la imagen, se obtiene los datos de posición en píxeles, por lo cual primero se realiza una calibración de tamaño entre píxeles y milímetros. Posteriormente, con la información visual obtenida se realizará la creación de los objetos virtuales en RobotStudio.

Para enviar la información de los objetos capturados por el sistema de visión a RobotStudio se debe construir un vector de información con la siguiente estructura: [IdentificadorID, TipoFigura, Color, Orientación, Posición]. El *IdentificadorID* es un dato que indica el tipo de información que se envía, para el caso de la información visual tendrá un valor de cuatro. El *TipoFigura* representa dos posibilidades 1 para círculo y 2 para rectángulo. El *Color* corresponderá a 1 para rojo, 2 para verde y 3 para azul. La *Orientación* se indicará con respecto a los ángulos de Euler y la *Posición* corresponderá a las coordenadas X,Y,Z. Para el caso de la coordenada *Z* se consideran dos posibilidades, la primera considera una altura constante para todos los objetos y el segundo caso, consiste en enviar la altura obtenida por el sensor Kinect.

RobotStudio interpreta este vector y dibuja los objetos en el entorno de trabajo, sin embargo, presenta la desventaja de que, al extrudir los objetos con la altura obtenida por el sensor Kinect no es posible representar el color en el simulador, por lo que todas las figuras quedan construidas de color gris, sin embargo, el robot las clasifica de acuerdo a los colores reales.

En la figura 2 se pueden observar las imágenes obtenidas con el comando *getsnapshot*, en este caso se procesa la imagen para identificar los rectángulos y los círculos de los colores rojo, azul oscuro y verde. Primeramente se realiza el aislamiento de cada color, se etiquetan los objetos y se procede a la identificación de rectángulos y círculos. Este procedimiento se aplica para cada color que se necesite identificar.



Figura 2 Objetos a clasificar, Izquierda: Captura RGB. Derecha: Captura Infrarrojos

Fuente: Elaboración propia

El caso cuando se trabaja con el sensor de infrarrojos del Kinect para obtener la altura de los objetos, se procede a acceder a las coordenadas de los centroides de los objetos que hemos identificado en la imagen RGB, pero ahora en la imagen de profundidad. El valor que se encuentra en cada una de las celdas de la matriz que se genera a partir de la imagen de profundidad representa directamente la distancia en milímetros medida desde el plano del sensor hasta el plano del objeto deseado. La figura 3 muestra el resultado de la detección de objetos.

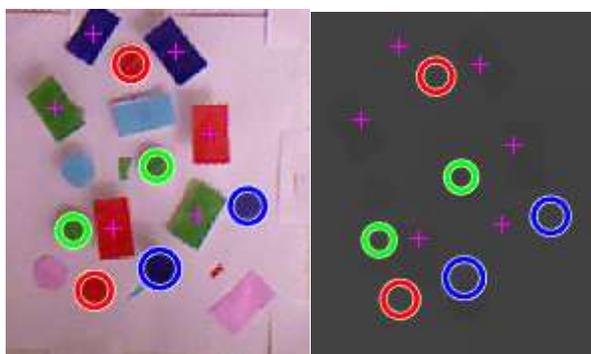


Figura 3 Objetos clasificados, Izquierda: Captura RGB. Derecha: Captura Infrarrojos

Fuente: Elaboración propia

Estación de RobotStudio

La estación robótica en RobotStudio debe poder realizar varias tareas para la aplicación a realizar, en este caso, desde la programación, el robot debe simular el movimiento de sus articulaciones a partir de los datos recibidos desde un software externo, que en este caso es Matlab, por lo cual, es requerido establecer la comunicación entre Matlab y RobotStudio. Además, la estación de trabajo tiene que crear los objetos capturados con la cámara en el ambiente de RobotStudio y crear la simulación de sujeción de los objetos a través de una herramienta con ventosa.

Primeramente, para lograr el envío y recepción de datos entre Matlab y RobotStudio se hace uso del protocolo de comunicación TCP/IP (del inglés *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*). RobotStudio se programa como servidor para el envío y recepción de datos y Matlab será programado como el cliente (Frydrysiak M., 2014).

Para que se realice la comunicación para el envío y recepción de datos, se programan dos módulos en el código RAPID denominados *ConexionTCPIP* e *InterpretacionDatos*. En el módulo de *ConexionTCPIP* se crean los elementos necesarios para establecer la conexión, a través del comando *SocketCreate* se crea un nuevo zócalo para comunicación. Después de haber creado el zócalo, se le asignan una dirección IP y un puerto mediante el comando *SocketBind*. Con estas instrucciones el zócalo queda configurado para ser utilizado como medio de comunicación con dispositivos externos al controlador del robot. Para lograr una correcta conexión se utiliza las funciones *SocketListen* y *SocketAccept*, estos comandos son ejecutados y pueden permanecer activos hasta que se detecte una solicitud de conexión externa. Una vez enlazados servidor y cliente, se utilizan los comandos *SocketReceive* y *SocketSend* para recibir y enviar datos respectivamente.

El código utilizado es el siguiente:

MODULE ConexionTCPIP

!Definición de variables

```
VAR socketdev ServidorRobotStudio;
VAR socketdev ClienteMatLab;
VAR bool ConexionActual := FALSE;
LOCAL VAR string Ip:= "127.0.0.1";
LOCAL VAR num Puerto := 1024;
```

!Procedimiento para la conexión TCP/IP

```
PROC Conexion()
SocketCreate ServidorRobotStudio;
```

```

SocketBind ServidorRobotStudio, Ip,
Puerto;
SocketListen ServidorRobotStudio;
SocketAccept ServidorRobotStudio,
ClienteMatLab, \ClientAddress:=Ip,
\Time:=WAIT_MAX;
ConexionActual := TRUE;
ENDPROC

```

ENDMODULE

En el módulo *InterpretacionDatos* a partir del primer elemento del vector de información enviado por el cliente y que ha sido denominado *IdentificadorID*, se seleccionará un caso para decodificar la información y poder ejecutar alguna de las tareas disponibles como son la creación de objetos (ID=4) a partir de la información proveniente del sistema de visión, la activación de ventosa (ID=3), el movimiento cartesiano (ID=2) o articular (ID=1) del robot.

La estructura que tiene el vector de información para realizar un movimiento de tipo articular es [IdentificadorID, SignoJunta_1, ValorJunta_1, ..., SignoJunta_6, ValorJunta_6], los seis campos *ValorJunta* corresponden a los ángulos de las articulaciones expresados en grados y los seis campos *SignoJuntas* son utilizados para indicar los signos de cada valor articular, un cero identifica un dato negativo y uno identifica un dato positivo.

La estructura que tiene el vector de información para realizar un movimiento de tipo cartesiano es [IdentificadorID, Orientación, Posición], la información de la *Orientación* corresponde a tres datos con la siguiente estructura: [Signo, RZ, S, RY, S, RX] y de la *Posición* tiene la siguiente estructura: [S, X, XR, S, Y, YR, S, Z, ZR]. La posición es dividida en dos datos: (X, Y, Z) contiene la información correspondiente a la cantidad de centenas de milímetros y (XR, YR, ZR) contiene la información de las unidades y decenas de milímetro.

Los seis campos (S) son utilizados para los signos de la orientación y de la posición (0 - negativo, 1 - positivo).

Por otro lado, los componentes inteligentes se utilizan dentro de la estación de trabajo de RobotStudio para simular un gran número de acciones y movimientos de los elementos en el entorno de trabajo que no son parte del robot, en el presente trabajo se utilizaron los componentes para simular la succión de una ventosas y otro para la creación de los objetos que son captados por el sistema de visión.

Para la creación de los objetos detectados por el sistema de visión es necesario crear un componente inteligente *Crear Objeto*. Este componente es capaz de crear un objeto de una cierta altura, color y forma. La creación de estos se logra a partir de la generación de copias de los mismos objetos que están prediseñados y ocultos en la estación de trabajo. En el caso de los objetos a una altura estándar, se crean tres cilindros, uno rojo, uno azul y uno verde, y tres tetraedros de los mismos colores, están ocultos y sus centroides en el plano XY se encuentran en la posición (0,0).

Cuando se reciben los datos de Matlab, el código RAPID se encarga de interpretarlos y enviar las instrucciones para copiar y posicionar los objetos. En el caso de los objetos de altura variable, se tienen dos formas de 1mm de altura, un cilindro y un tetraedro. Cuando se reciben las instrucciones, las formas son extruidas, una vez extruidas son copiadas, y las copias son manipuladas para posicionarse en el lugar deseado. La figura 4 muestra un ejemplo de una forma de cilindro construida como componente inteligente.

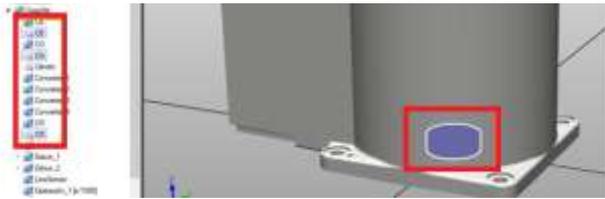


Figura 4 Componente inteligente objeto Cilindro

Fuente: Elaboración propia

En la figura 5 se muestran algunas de las señales de entrada y salida creadas para los componentes inteligentes de los objetos. Además de las señales digitales, también se utilizan señales analógicas, esto se debe a que se necesitan dimensionar los valores de las diferentes alturas y posiciones de los objetos.

Nombre	Tipo de señal
CI	DigitalInput
CG	DigitalInput
CB	DigitalInput
FR	DigitalInput
PG	DigitalInput
PE	DigitalInput
X	AnalogInput
Y	AnalogInput
ROT	AnalogInput
Reinciar	DigitalInput
Cilindro	DigitalInput
Aluna	AnalogInput
Mover	DigitalInput

Figura 5 Señales para el componente inteligente crear objeto

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para que el robot pueda manipular los objetos se construye una herramienta que simula la sujeción por vacío a través de utilizar los componentes inteligentes de *LineSensor*, *Attacher* y *Detacher*, se agregan dos señales digitales de entrada, una para activar la succión y la otra para desactivarla.

Programa en Matlab

Para lograr el envío y recepción de datos entre MATLAB y RobotStudio inicialmente se crea un programa de inicio en el cual se realizara la activación del sensor Kinect y se establece la conexión, el código de instrucciones es el siguiente:

```
%% Iniciar Kinect
imaqreset
vid = videoinput('kinect',1);
vid2 = videoinput('kinect',2);
vid.FramesPerTrigger = 1;
vid2.FramesPerTrigger = 1;
vid.TriggerRepeat = 1;
vid2.TriggerRepeat = 1;
triggerconfig([vid vid2],'manual');
start([vid vid2]);

%%
robot=ControlRobot('127.0.0.1',1024);
robot.conectar;
robot.CI([180 0 180 300 1 350])
```

El código anterior hace uso de la clase *ControlRobot* que permiten generar la comunicación con RobotStudio (Gutiérrez Corbacho, A., 2014). La clase es creada con el fin de simplificar el uso de comandos para realizar la conexión y envío de información, realiza el cálculo de la cinemática inversa del robot a partir de los datos de las imágenes, y crea los valores de cada junta del robot, parte del código que permite la conexión es el siguiente:

```
classdef ControlRobot < handle
    %% Propiedades
    properties
        IP;
        puerto;
        conexion;
    end
    %% Métodos
    methods
        %% Función para Acceder a la
        Dirección
        function r=ControlRobot(ip,puerto)
```

```

r.IP=ip;
r.puerto=puerto;
end
%% Funcion para Conectar con
RobotStudio
function conectar(r)
r.conexion=tcPIP(r.IP, r.puerto);
fopen(r.conexion);
P=uint8([1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 90 1 0]);
fwrite(r.conexion, P);
out=fread(r.conexion,12);
assignin('base','out',out);
end .....

```

Mediante el comando *tcPIP* se crea un objeto que representa al cliente de la red, y con el comando *fopen* se abre la comunicación, a partir de la utilización de estos comandos se puede manipular el envío y recepción de datos a través del puerto creado. Para escribir datos en el objeto creado se utiliza la función *fwrite*, y para leer los datos que existan se utiliza la función *fread*. Estas dos funciones permiten un envío y recepción de datos entre el servidor y el cliente. Los datos que se utilizan en estas funciones son enteros de 8 bits sin signo. Para enviar la información de los datos provenientes del sistema de visión se crea una clase denominada *ElementosAlt*, parte del código es el siguiente:

```

%% Eliminación de Objetos Actuales en
RobotStudio
pos=[4 1 1 1 1 1 1];
robot.ElementosAlt(pos);

%% Creación y Posicionamiento de Cilindros
Rojos en RobotStudio
for n=1:circlesR
pos=[4 1 double(eval(['CircleObjR'
num2str(n)]))];
robot.ElementosAlt(pos);
end
%% Creación y Posicionamiento de Cilindros
Verdes en RobotStudio
for n=1:circlesG
pos=[4 2 double(eval(['CircleObjG'
num2str(n)]))];

```

```

robot.ElementosAlt(pos);
end ....

```

Finalmente, se crea la clase *MovimientoAltCI*, la cual contiene la información correspondiente a la posición que deberá tener cada objeto en función de su forma y color, el siguiente es parte del código de la clase:

```

%% Movimiento de Cilindros Rojos en
RobotStudio
alt=0;
for n=1:circlesR
pos=double(eval(['CircleObjR'
num2str(n)]));
a=double(eval(['CircleObjR'
num2str(n)]));
a(6)=pos(6)+10;
c=pos(6)+alt;
robot.CI(a);
pause(1)
robot.Ventosa(0)
robot.CI(pos);
pause(1)
robot.Ventosa(1)
robot.CI(a);
pause(1)
robot.CI([180 0 180 300 1 350]);
pause(1)
robot.CI([180 0 180 150 -200 10+c]);
pause(1)
robot.CI([180 0 180 150 -200 c]);
pause(1)
robot.Ventosa(0)
robot.CI([180 0 180 150 -200 10+c]);
pause(1)
robot.CI([180 0 180 300 1 350]);
pause(1)
alt=alt+pos(6)+1;
end

```

Resultados experimentales

En esta sección, se analiza cómo puede utilizarse la plataforma para abordar el tema de la cinemática inversa de manera experimental a través del uso de la plataforma utilizando la aplicación de tomar y colocar objetos ordenándolos por color y forma en una posición deseada previamente programada en el código RAPID en RobotStudio. Inicialmente, el sistema de visión captura la información del entorno real donde se encuentran los objetos, obteniendo su posición y orientación como se explicó en la sección anterior. Posteriormente, la información del sistema de visión se utiliza únicamente para crear estos objetos en el entorno de simulación a través de ejecutar el programa *ElementosAlt*, ver figura 6.

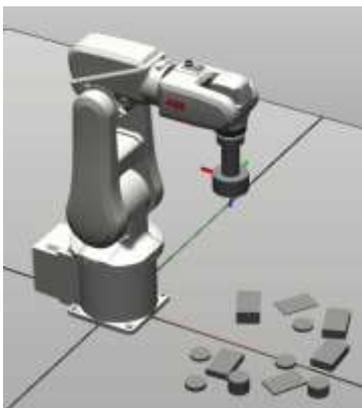


Figura 6 Objetos creados en RobotStudio

Fuente: Elaboración propia

Para finalizar, se ejecuta el programa de *MovimientoAltCI*, en el cual se ha implementado el cálculo de la cinemática inversa del robot que permite obtener el valor de cada articulación necesario para alcanzar los objetos y colocarlos en la posición deseada. En las figura 7 a la 10 se muestra el movimiento de los objetos que tiene un orden predeterminado, primeramente, se posicionan los cilindros rojos, después los verdes y por último los azules; una vez terminado, se comienza con los tetraedros, comenzando por el rojo, después el verde y para finalizar el azul.

Las imágenes muestran el caso donde la altura es variable por tal motivo se pierde el color de los objetos en el simulador.

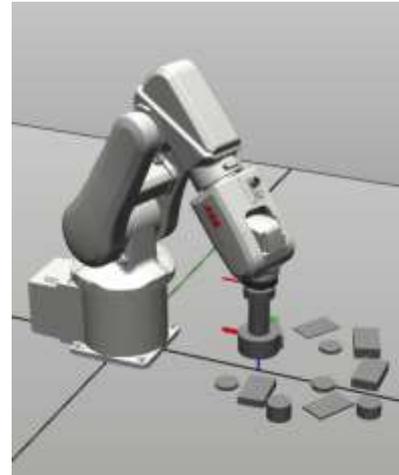


Figura 7 Inicia con cilindros rojos

Fuente: Elaboración propia

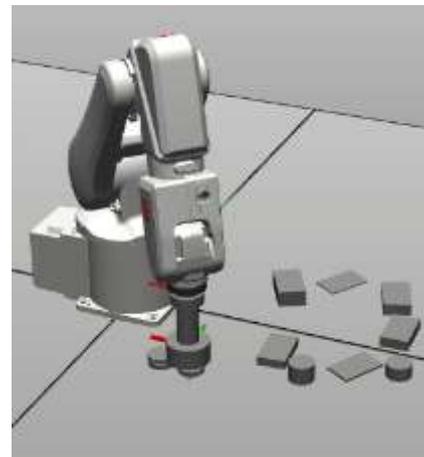


Figura 8 Continúa con cilindros verdes

Fuente: Elaboración propia

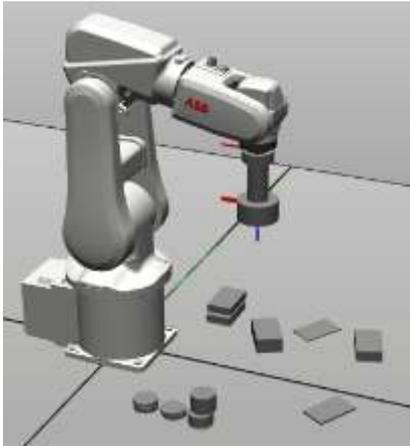


Figura 9 Continúa con Tetraedros rojos

Fuente: Elaboración propia

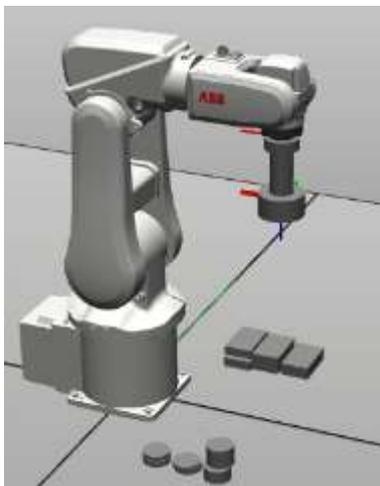


Figura 10 Finalmente Tetraedros verdes y azul

Fuente: Elaboración propia

Para comprobar experimentalmente que los valores articulares de cada articulación obtenidos de la cinemática inversa son correctos se realiza su monitoreo a través del ambiente de Simulink graficándolos junto con la información de la posición articular real que se obtiene de RobotStudio, en la figura 11, se muestra únicamente la gráfica correspondiente a la primera articulación del robot. La línea azul punteada corresponde a la posición articular teórica y la línea negra continua corresponde a la posición real de cada articulación. Inicialmente, el robot parte de la posición de home, posteriormente se mueve a la posición donde está el objeto para finalmente moverse a la posición deseada pasando por la posición de home.

Como puede observarse la posición articular calculada teóricamente (línea azul punteada) y la posición real del robot (línea negra continua) coincide, lo cual permite concluir que el análisis teórico realizado es correcto, la diferencias mostradas en la curvas durante los transitorios es debida al tiempo de muestreo entre Simulink y RobotStudio.

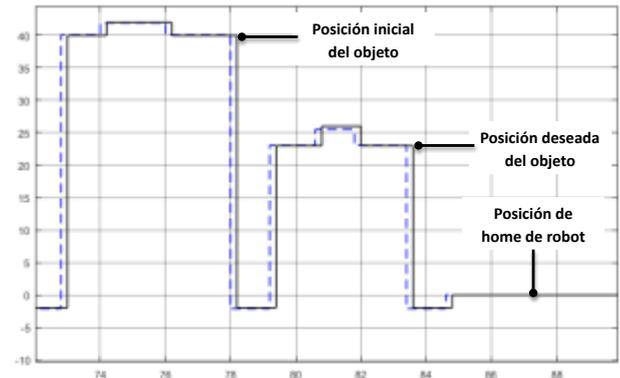


Figura 11 Movimiento de la primera articulación

Fuente: Elaboración propia

Agradecimiento

Los autores desean agradecer al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento otorgado para la realización del proyecto. Así mismo, agradecer al Instituto Tecnológico Superior de Uruapan y a la Universidad Politécnica de Uruapan por las facilidades otorgadas para la realización del mismo.

Conclusiones

En este trabajo se propone un Laboratorio virtual de robótica basado en los programas de Matlab y RobotStudio su potencial como módulo didáctico es evaluado a través de la aplicación de organización de objetos por color y forma que pueden ser detectados en el área de trabajo de un robot industrial a través de un sensor Kinect. Este módulo didáctico permite desarrollar distintas capacidades sobre temas como visión artificial, programación y control de robots articulados, comunicación por distintos protocolos, modelado matemático de brazos robóticos, entre otros temas.

La comunicación desde Matlab está planeada para ser compatible con el controlador de cualquier robot ABB, ya sea físico o simulado. La implementación de este módulo permite la creación de distintas aplicaciones, y genera la posibilidad de crear distintos módulos virtuales, lo que llevaría a la implementación de un laboratorio virtual más complejo, que incluya una gran gama de aplicaciones. Esto nos permite concluir que con la ayuda de la plataforma de simulación se refuerza la comprensión de los conceptos fundamentales en robótica ya que resulta ser un mecanismo de realimentación para que los estudiantes detecten las posibles desviaciones hechas en sus análisis teóricos cuando los implementan en la plataforma propuesta.

Referencias

Žlajpah, L. (2008). Simulation in robotics. *Mathematics and Computers in Simulation*, 79(4), 879-897.

Connolly, C. (2009). Technology and applications of ABB RobotStudio. *Industrial Robot: An International Journal*, 36(6), 540-545.

Vila-Rosado, D. N., & Dominguez-Lopez, J. A. (2005). A matlab toolbox for robotic manipulators. In *Computer Science, 2005. ENC 2005. IEEE Sixth Mexican International Conference on*, 256-263.

Gutiérrez Corbacho, A., (2014). Trabajo de Fin de Grado: "Desarrollo de una interfaz para el control del robot IRB120 desde MATLAB", Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá.

Frydrysiak M., Trabajo de Fin de Grado: "Socket based communication in RobotStudio for controlling ABB-IRB120 robot. Design and development of a palletizing station", Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá.

Lazaro-Arvizu, Y., Morales-Caporal, R., Ordoñez-Flores, R., Quintero-Flores, P. Y., Leal-López, M., (2015). Desarrollo de un software para la simulación y control de un robot industrial. *Revista de Tecnología e Innovación*, 2-5, 958-967.

Corke P., (1996). A robotics toolbox for Matlab, *IEEE Robotics and Automation Magazine* 3, 24-32.

Gil Arturo, Oscar Reinoso, José Maria Marin, Luis Paya and Javier Ruiz, (2015). Development and deployment of a new robotics toolbox for education. *Computer Applications in Engineering Education*, 23(3), 443-454.

González-Palacios, M. A., González-Barbosa E. A. and L. A. Aguilera-Cortés, (2013). SnAM: A simulation software on serial manipulators, *Engineering with Computers Springer* 29, 87-94.

López-Nicolás, G.; Romeo, A.; Guerrero, J. J., (2009). Project based learning of robot control and programming. En *International Conference on Engineering Education and Research*, Korea.

Damić, Vjekoslav; Carića, Ćira; Husić, Maida Ćohodar, (2014). Procedure for Visualization and Dynamic Analysis of Robot Manipulator, *Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, 18(1), 127-130.

Diseño de un inversor de puente H con tecnología multinivel utilizando la técnica de Eliminación Selectiva de Armónicos

BERNAL-GUERRERO, Erick†, LÓPEZ-MONTEAGUDO, Francisco Eneldo* y DE LA TORRE-Y RAMOS, Jorge

Universidad Autónoma de Zacatecas

Recibido Enero 27, 2017; Aceptado Marzo 21, 2017

Resumen

En este artículo se realizó un análisis del estado del arte de los inversores fotovoltaicos (FV) multinivel, concluyéndose que, de las diferentes configuraciones, el puente H en cascada es la más utilizada. En el presente trabajo se diseñó un inversor FV de 11 niveles de control utilizando una topología de puentes H en cascada para aplicaciones de interconexión a la red. Para el control de los puentes H se utilizó la estrategia de modulación por Eliminación Selectiva de Armónicos (SHE). Esta estrategia se sustenta en el análisis de series de Fourier para obtener un sistema de ecuaciones que al resolverse con un algoritmo basado en el método de Newton-Raphson, el cual permite obtener los ángulos óptimos de conmutación. Con los cuales, se pueden eliminar algunos armónicos de orden inferior, minimizando de esta forma la distorsión armónica total (THD) manteniéndose el voltaje fundamental requerido y aumentando la calidad de la potencia. Esta estrategia de modulación puede ser aplicada a inversores multinivel con cualquier número de niveles de control. Mediante el análisis de simulaciones se verifica que los niveles de THD en la tensión y corriente de salida, cumplen los estándares establecidos para interconexión por la CFE en su especificación técnica L0000-45.

Inversor Multinivel, Puente-H en Cascada, Eliminación Selectiva de Armónicos, Distorsión Armónica Total, Newton-Raphson

Abstract

In this article, an analysis of the state of the art of multilevel PV inverters was performed, concluding that of the different configurations available, the cascaded H bridge is the most widely used. In this work, a PV inverter was designed with 11 levels of control using a cascaded H bridge topology to interconnect applications to the grid. For controlling the H bridges, the Selective Harmonic Elimination (SHE) modulation strategy was used. This approach is based on the analysis of Fourier series to obtain a system of equations that when solved with an algorithm based on the Newton-Raphson method, allows the estimation of the optimal switching angles. Once the angles are known, some harmonics of lower order can be eliminated, thus minimizing total harmonic distortion (THD) while maintaining the required fundamental voltage and increasing the quality of power. This modulation strategy can be applied to multilevel inverters with any number of control levels. By analyzing the data obtained through simulations, it is verified that the total harmonic distortion in the output voltage and current comply with the standards established for interconnection by the Federal Electricity Commission (CFE) in its technical specification L0000-45.

Multi-level inverter, cascaded h-bridge, selective harmonic elimination, Newton-Raphson, total harmonic distortion

Citación: BERNAL-GUERRERO, Erick, LÓPEZ-MONTEAGUDO, Francisco Eneldo y DE LA TORRE-Y RAMOS, Jorge. Diseño de un inversor de puente H con tecnología multinivel utilizando la técnica de Eliminación Selectiva de Armónicos. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017, 1-1: 41-54

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: eneldolm@uaz.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El desarrollo de la electrónica de estado sólido en los últimos años ha hecho posible la evolución de todas las ramas de la electrónica, y de entre ellas la electrónica de potencia se ha beneficiado con la aparición de conmutadores de estado sólido que permiten reducir el volumen y prestaciones de los equipos de conversión de energía eléctrica imprescindibles en la mayoría de las aplicaciones domésticas e industriales actuales.

Las nuevas tecnologías basadas en convertidores multinivel se han ido abriendo paso en el campo de las aplicaciones fotovoltaicas con conexión a la red, y actualmente se presentan en el área de las aplicaciones de media y alta tensión como una alternativa de los convertidores de dos niveles tradicionales.

La tecnología multinivel se basa en la síntesis de la tensión alterna de salida a partir de la obtención de varios niveles de tensión del bus de continua. (Pietzsch, 2004). Cuanto mayor es el número de niveles de tensión de entrada continua, más escalonada es la forma de onda de la tensión de salida, de modo que tiende cada vez más a una onda senoidal, permitiendo que se minimice el porcentaje de distorsión armónica total (THD), el cual es un requerimiento indispensable para la inyección de la energía eléctrica generada a la red eléctrica.

De las diferentes topologías que han surgido con la tecnología multinivel cada una tiene ventajas sumamente variadas, y que de las cuales todas comparten las más importantes, como son el manejo de medias y altas potencias, menos pérdidas por conmutación de los dispositivos semiconductores ya que estos trabajan a frecuencias relativamente bajas y por supuesto un muy bajo o casi nulo porcentaje del contenido armónico total (%THD) de las señales de voltaje y corriente de salida.

Por lo que se debe analizar cuidadosamente las topologías más importantes de esta clase, así como las diferentes técnicas de modulación que puedan ofrecernos en conjunto un mayor rendimiento, así como un menor porcentaje de Distorsión Armónica Total para que de acuerdo a la especificación técnica de la CFE L-000045 cumpla con los requerimientos de interconexión a la red eléctrica. La cual indica que, en instalaciones menores a 1 kW, los niveles de Distorsión Armónica Total para voltaje deben de ser inferior a 8% mientras que para corriente debe de ser inferior ó igual al 5% (Comisión Federal de Electricidad, 2005).

En el presente trabajo, se presenta el diseño e implementación de un convertidor CC/CA (corriente continua – corriente alterna) utilizando una topología para el inversor de puentes H en cascada con fuentes CC independientes en una configuración multinivel de 11 niveles de voltaje de control. Y aplicando la técnica de modulación de Eliminación Selectiva de Armónicos que permite mediante el análisis de Series de Fourier seleccionar apropiadamente los ángulos de conmutación para la eliminación de los armónicos de baja frecuencia más significativos.

En la sección 1 se hace una descripción de los inversores multinivel y las topologías más aplicadas. En la sección 2 se analizaron las diferentes técnicas de modulación más aplicadas para el control de dichos inversores. En la sección 3 se realiza el diseño y análisis del inversor multinivel y en la sección 4 se presentarán las simulaciones computacionales que validarán los cálculos de diseño.

Inversores Multinivel

Las nuevas tecnologías basadas en convertidores multinivel se han ido abriendo paso en el campo de las aplicaciones fotovoltaicas con conexión a la red, y actualmente se presentan en el área de las aplicaciones de media y alta tensión como una alternativa de los convertidores de dos niveles tradicionales. La tecnología multinivel se basa en la síntesis de la tensión alterna de salida a partir de la obtención de varios niveles de tensión del bus de continua. Cuanto mayor es el número de niveles de tensión de entrada continua, más escalonada es la forma de onda de la tensión de salida, de modo que tiende cada vez más a una onda senoidal, minimizándose así el porcentaje de distorsión armónica total.

La Figura 1 muestra el diagrama esquemático de una fase de inversores con diferentes números de controles, en los cuales los semiconductores están representados por interruptores ideales con varias posiciones. Un inversor de dos niveles generara un voltaje de salida con dos valores con respecto a la terminal negativa de la fuente (ver Figura 1(a)), mientras que el de tres niveles generara tres niveles de voltaje y así sucesivamente.

Un convertidor multinivel tiene diferentes características como alcanzar altos rangos de potencia, también permite el aprovechamiento y uso de fuentes de energía renovables, como son, aplicaciones fotovoltaicas y eólicas en sistemas interconectados o aislados. Dentro las ventajas de una topología de inversor multinivel a una de dos niveles son:

- Menores voltajes de bloqueo de los dispositivos semiconductores.
- Bajas frecuencias de conmutación.
- Reducción de los armónicos más altos de salida.

Debido a las diversas características que poseen los inversores multinivel, numerosas aplicaciones industriales han surgido de requerir aparatos de potencia más elevada en recientes años. Algunos controladores de motores de medianos voltajes y aplicaciones de utilidad requieren medios voltajes y niveles de potencia de mega watts. Para un voltaje medio de red, es problemático conectar directamente solo un semiconductor de potencia. Como resultado, se ha introducido una estructura de un convertidor de potencia multinivel como alternativa a la necesidad de medios voltajes y altas potencias. Subsecuentemente, varias topologías de convertidores multinivel han sido desarrolladas. (Singh et al., 2012)

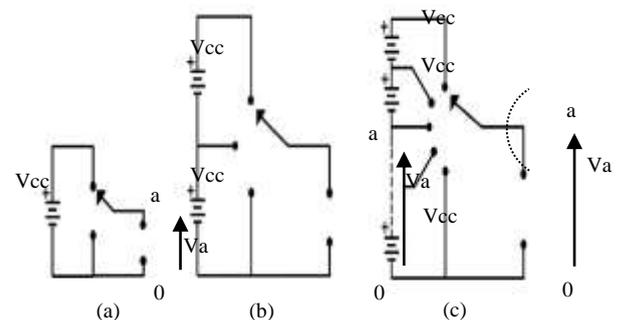


Figura 1 Una fase de un inversor con: (a) dos niveles, (b) tres niveles y (c) N niveles

Fuente: Elaboración propia

De las diferentes topologías multinivel que han sido propuestas durante el paso de las últimas décadas, han destacado tres diferentes estructuras de Inversores multinivel, las cuales son:

- Inversores en cascada de puentes H con fuentes separadas de cd.
- Inversores con diodo anclado.
- Inversores con capacitores flotantes.

Inversores con diodo anclado

En esta topología, el diodo es usado como el dispositivo de anclaje para dirigir el bus del voltaje de cd y lograr escalones en el voltaje de salida, así que el concepto principal de este convertidor es usar diodos para limitar el estrés de voltaje de los dispositivos de potencia. La Topología de este tipo de inversor puede observarse en la figura 2. El voltaje en cada capacitor y cada conmutador es V_{cc} . Un inversor de n niveles necesita $(n - 1)$ fuentes de voltaje, $(2n-1)$ dispositivos conmutadores y $(n-1)(n-2)$ diodos. Los diodos de enclavamiento permiten fijar los niveles de tensión en la salida y pueden llegar a manejar el voltaje de más de un nivel, a pesar de que los interruptores principales sólo manejan la tensión de uno de ellos. (Loranca, 2013). Conforme incrementa el número de niveles de voltaje se mejora la calidad del voltaje de salida y la forma de la onda de voltaje se asemeja a una onda senoidal.

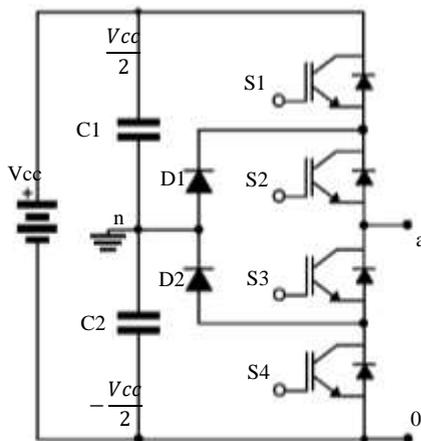


Figura 2 Topología de inversor con diodo anclado de tres niveles de control

Fuente: Elaboración propia

Inversores con capacitores flotantes

La estructura de este inversor es similar a la de diodo anclado, excepto que en vez de usar diodos se usan capacitores.

Esta emplea celdas conmutadas de capacitores en conexión serie, esta topología tiene una estructura de escalera de capacitores, donde el voltaje en cada capacitor difiere del voltaje del siguiente. (Prabaharan&Palanisamy, 2017). El incremento de voltaje entre dos brazos de capacitores adyacentes da como resultado el tamaño de los escalones de voltaje en la forma de onda de salida. La figura 3 muestra una fase de un inversor capacitor flotante de n -niveles, un inversor de n -niveles requerirá un total de $(n - 1) ((n-2) / 2)$ capacitores anclados por fase además de $(n-1)$ capacitores del bus de cd.

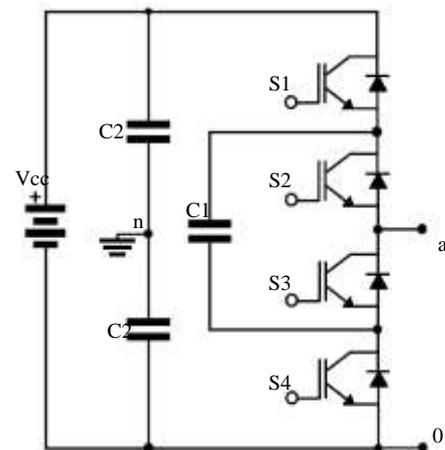


Figura 3 Topología de inversor con capacitores flotantes de n -niveles de control

Fuente: Elaboración propia

Inversores en cascada de puentes H

El concepto de este inversor está basado en conectar puentes H en serie (cascada) para obtener una salida de voltaje senoidal, en las cuales las fuentes de CC son independientes de cada inversor conectado. (Jiménez, 2012). En esta la salida de voltaje es la suma de los voltajes que se generan en cada celda, estas sumas de voltaje conforman una onda de salida cuasi-senoidal mediante los arreglos de conmutación, que son controlados por una técnica de modulación.

Debido a que cada puente H es alimentado por fuentes independientes surgen dos clasificaciones de esta topología: inversores con fuente simétrica e inversores con fuente asimétrica, esto quiere decir que, si las fuentes son del mismo valor o no, por ejemplo en un inversor con 2 puentes H con fuentes simétricas (Figura 4(a)) donde el número de niveles esta dado por $(2n+1)$, se pueden alcanzar hasta 5 niveles de voltaje (Figura 4(b)), mientras que en un inversor con fuentes asimétricas (Figura 5(a)) se pueden alcanzar hasta 7 o 9 niveles de voltaje dependiendo de la configuración de las fuentes de CC, como se aprecia en la Figura 5(b). (Rodriguez et. al, 2009).

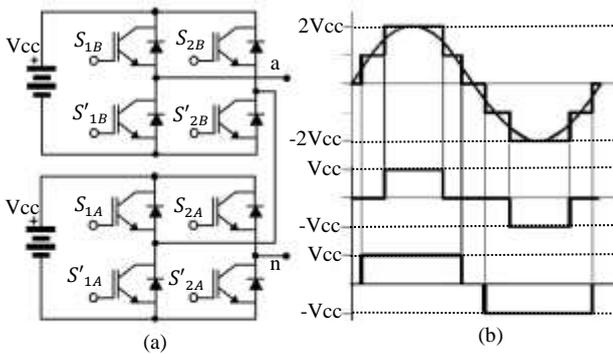


Figura 4 Topología de inversor de puentes H en cascada con fuentes simétricas (a), forma de onda generalizada para 5 niveles

Fuente: Elaboración propia

La tabla 1 muestra las secuencias de conmutación para un inversor de fuentes simétricas de 5 niveles (Figura 4(a)), donde 1 indica que el conmutador se encuentra encendido y 0 apagado, para obtener la onda de salida que se observa en la Figura 4(b).

V_{out}	S_1 A	S'_{1A}	S_2 A	S'_{2A}	S_1 B	S'_{1B} B	S_2 B	S' $2B$
$0V_{cc}$	0	1	0	1	0	1	0	1
V_{cc}	1	0	0	1	0	1	0	1
$2V_{cc}$	1	0	0	1	1	0	0	1
$-V_{cc}$	0	1	1	0	0	1	0	1
$-2V_{cc}$	0	1	1	0	0	1	1	0

Tabla 1 Secuencias de conmutación para obtener 5 niveles de tensión

Fuente: (Hernández, 2014)

La tabla 2 indica la proporción de componentes que utiliza un inversor multinivel según su topología puede llegar a utilizar. Donde n es el número de niveles del inversor. Por ejemplo, para un inversor de 5 niveles. En un inversor con diodo anclado se utilizará un total de 18 componentes entre los que se encuentran: 8 conmutadores, 6 Diodos de anclaje, y 4 capacitores del bus de CD. Mientras que para un inversor en Cascada de Puente H se utilizan solo 10 componentes: 8 conmutadores, 2 capacitores del bus de CD. Esta característica de los inversores de puentes H de un bajo número de componentes lo que representa un ahorro en la fabricación de un prototipo, es su principal característica. Otra característica es que su diseño por módulos al ser celdas conectadas en serie, se puede aumentar el número de éstas para poder obtener más niveles de Tensión.

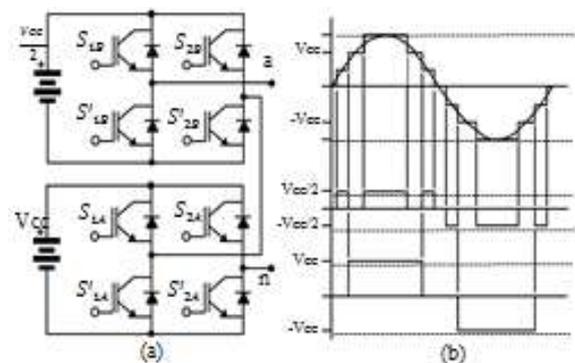


Figura 5 Topología de inversor de puentes H en cascada con fuentes asimétricas (a), forma de onda generalizada para 7 niveles

Fuente: Elaboración propia

Mientras que la principal desventaja de esta topología es que se necesitan tantas fuentes de CC aisladas como puentes H, en donde las tierras de las fuentes no pueden ser comunes.

Componentes/Topología	Diodo Anclado	Capacitor Flotante	Cascada Puente H
Conmutadores	$2(n-1)$	$2(n-1)$	$2(n-1)$
Diodos de anclaje	$2(n-2)$	0	0
Capacitores flotantes	0	$(n-1)(n-2)/2$	0
Capacitores del bus CD	$(n-1)$	$(n-1)$	$(n-1)/2$

Tabla 2 Comparación de topologías de acuerdo al número de componentes por fase

Fuente: (Prabaharan&Palanisamy, 2017)

Estrategias de modulación y control

Las estrategias de modulación aplicados a inversores multinivel, pueden ser clasificadas de acuerdo a la frecuencia de conmutación, de acuerdo a esto las principales estrategias se indican en la Figura 6.

Como se observa en la figura 6 existen dos clasificaciones principales de estrategias de modulación que son las de control a través de la Frecuencia de conmutación fundamental y a través de PWM de alta frecuencia; ambas clasificaciones se describen a continuación.



Figura 6 Clasificación de estrategias de modulación

Fuente: Elaboración Propia

Modulación en espacio vectorial (SVM)

Dentro de las estrategias que utilizan la modulación por ancho de pulso (PWM) alta frecuencia se encuentran dos tipos de estrategias que destacan, como es la de **PWM Senoidal (SPWM)**, y la de **Modulación en Espacio Vectorial (SVM)**, en esta estrategia la tensión de salida requerida se expresa como un vector de referencia dentro del diagrama vectorial de tensiones, cuya longitud está relacionada con la amplitud y la velocidad de giro del vector, la cual es igual a la frecuencia deseada de la tensión de salida (Rashid&González Pozo, 2004).

La SVM utiliza directamente la variable del algoritmo de control de la parte del sistema de control e identifica cada vector de conmutación como un punto en el espacio complejo de (α, β) (Prabaharan&Palanisamy, 2017). Debido a la gran complejidad para la identificación de los vectores y las secuencias de conmutación esta técnica no es adecuada para inversores con un alto número de niveles. Para un inversor con “n” número de niveles se requieren seis sectores, por cada sector $(n-1)^2$ combinaciones vectoriales y m^3 secuencias de switcheo.

PWM senoidal (SPWM)

El principio de la modulación por ancho de pulsos (PWM) senoidal consiste en generar pulsos de ancho proporcional a la amplitud de una señal de referencia o moduladora. Esta última consiste en una señal sinusoidal típica que es comparada con una señal portadora cuya forma es triangular (Figura 8) (Hernández, 2014). Los puntos donde se interceptan, indican el momento que ocurren los costados de subida y de bajada de los pulsos de ancho variable; esta señal pulsante contiene implícitamente las características de la onda moduladora (amplitud y frecuencia) y el objetivo es poder transmitir estas características hacia la etapa de potencia.

Entonces se tiene que para un inversor de “m” niveles, se necesitan (m-1) señales triangulares portadoras.

Control en espacio vectorial (SVC)

Las estrategias de modulación de frecuencia de conmutación fundamental, es decir, aquellas trabajan a una frecuencia de conmutación relativamente baja, en otras palabras, a la frecuencia nominal de la red del sistema eléctrico. Dentro de este tipo de estrategias destacan dos que son las más comúnmente empleadas, las cuales son **Eliminación Selectiva de Armónicos (SHE)** y la de **Control en Espacio Vectorial**, esta última, es un método de modulación con un concepto diferente para su aplicación en inversores del tipo multinivel basado en la teoría de vector espaciales. En el control en espacio vectorial se trabaja a bajas frecuencias de conmutación y no se genera el valor medio del voltaje deseado de la carga en cada intervalo de conmutación como en el principio del SVM. La principal idea principal de este tipo de estrategia consiste en entregar a la carga un vector de voltaje que minimice el error del espacio o distancia al vector de referencia. La alta densidad de vectores producidos por un inversor de once niveles, genera solo pequeños errores en relación al vector de referencia, entonces, no es necesario usar esquemas de modulación más complejos envolviendo los tres vectores adyacentes a la referencia (Singh et al., 2012).

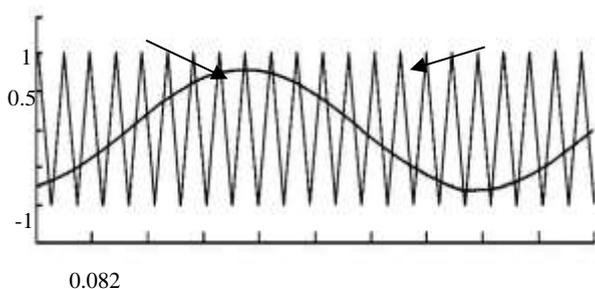


Figura 7 Modulación PWM senoidal

Fuente: Hernández, 2014

Eliminación selectiva de armónicos (SHE)

La técnica eliminación selectiva de armónicos es una estrategia de modulación que opera a frecuencia fundamental, esta estrategia elimina armónicas de bajo orden, lo que permite reducir las pérdidas por conmutación, la distorsión armónica total, y de esta forma aumenta la calidad de la potencia suministrada (Shehu, Yalcinoz & Kunya, 2014). Para emplear esta estrategia se aplica el principio de simetría de cuarto onda, donde se calcula por medio de la expansión de las series de Fourier ciertos ángulos para generar el 1er. cuarto (90°) del ciclo de la onda de salida; y los demás se encuentran sumándole o restándole un cuarto de onda (90°) o media onda (180°). Y donde el número de ángulos a ser disparados dependerá del número de niveles requeridos (Bakhshizadeh, Iman-Eini & Blaabjerg, 2015).

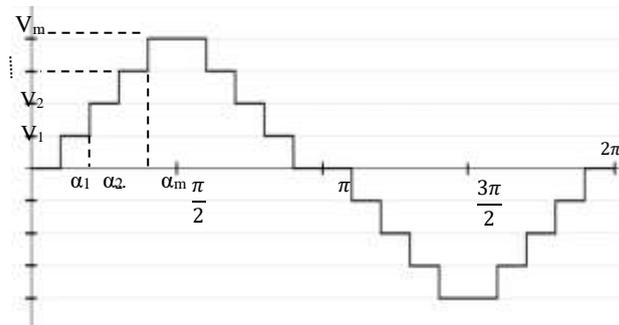


Figura 8 Forma escalonada generalizada

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8 se muestra una forma de onda escalonada generalizada, sintetizada por un inversor de $(2m + 1)$ niveles, donde m es el número de ángulos de conmutación. Analizando dicha señal representada en la Figura 8, a través de las series de Fourier se tiene que la tensión de salida del inversor puede expresarse como:

$$V_0 = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

Donde:

$$a_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\omega t) d(\omega t) \quad (2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (4)$$

Entonces si se considera un α_i para la señal periódica de la Figura 8 el cual debe estar comprendido entre

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_i < \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

Recordando que la serie de Fourier se empleara para el análisis del primer cuarto de onda. Entonces se resuelve la integral de la ecuación (4) de forma generalizada, aplicando los límites establecidos en la ecuación (5), obteniéndose:

$$b_n = \frac{4V_{cc}}{\pi n} \sum_{i=1}^m \cos(n\alpha_i) \quad (6)$$

Sustituyendo la ecuación (6) en la ecuación (1) y considerando $a_o = 0$ y $a_n = 0$, esto debido a que por la simetría de la onda del voltaje de salida solo se manejan armónicos de orden impar (Chauca, Llerena & Chico, 2014), se tiene que:

$$V_o = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \frac{4V_{cc}}{\pi n} \left[\sum_{i=1}^m \cos(n\alpha_i) \right] \sin(n\omega t) \quad (7)$$

Entonces de la ecuación (7) se tiene que para la amplitud de cualquier n^{mo} armónico impar de la forma de onda escalonada, esta puede ser expresada como:

$$H_n = \frac{4V_{cc}}{\pi n} \sum_{i=1}^m [\cos(n\alpha_i)] \quad (8)$$

Donde H es la función de la onda de voltaje en términos de Fourier. V_{cc} es el voltaje de las fuentes considerado como constante. "n" es el número de los armónicos impares. "m" es el número de ángulos de conmutación y α_i es el ángulo de disparo de cada nivel de voltaje.

Para minimizar la distorsión armónica y conseguir una amplitud ajustable de la componente fundamental, arriba de (m - 1) del contenido armónico puede ser eliminado de la forma de onda del voltaje. En general, los armónicos de baja frecuencia más significativos son elegidos para la eliminación seleccionando los ángulos apropiadamente, y las componentes armónicas de alta frecuencia pueden ser eliminadas usando filtros adicionales (Nápoles et. al, 2013).

De acuerdo a la ecuación (8), para mantener el número de armónicos eliminados a un nivel constante, todos los ángulos de conmutación deben ser menores a $\pi/2$.

Como resultado, esta estrategia de conmutación provee un rango estrecho del índice de modulación, por lo que es su principal desventaja, el índice de modulación (M) puede ser obtenido de la ecuación (7) para $(n = 1)$, siendo la relación entre amplitud de la componente fundamental y el Voltaje en el enlace de CC

$$M = \frac{V_1 * \pi}{4V_{cc}} \quad (9)$$

Análisis y diseño del inversor multinivel

Del análisis del estado del arte de las diferentes topologías de inversores multinivel y de las diferentes estrategias de modulación y control.

Se selecciono la topología de puentes H en cascada, así como la estrategia de modulación de eliminación selectiva de armónicos, para el diseño y simulación de un inversor multinivel con 11 niveles.

La topología representada en la Figura 9, es la de un inversor multinivel de puentes H en cascada con fuentes asimétricas, cada puente H esta alimentado con fuentes de CC de tres diferentes valores con una relación de 1, 3 y 6 la fuente de CC.

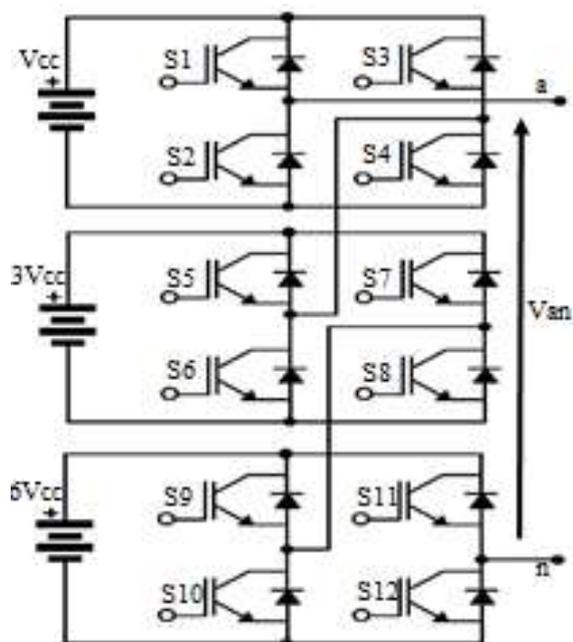


Figura 9 Inversor con fuentes asimétricas de 11 niveles

Fuente: Elaboración propia

De dicha topología se puede obtener una onda de voltaje cuasi-senoidal con 11 niveles de voltaje diferentes, como la que se presenta en la Figura 10, como el voltaje presente entre a (línea) y n (neutro) es decir Van es el voltaje que existe entre línea neutro, como ya se mencionó la relación de las fuentes de voltaje V_{cc} , $3V_{cc}$ y $6V_{cc}$, donde V_{cc} es igual a 18, por lo que $3V_{cc}$ equivale a 54V y $6V_{cc}$ a 108V como alimentación de cada puente H.

La adición de V_{cc} , $3V_{cc}$ y $6V_{cc}$ da como resultado la forma de onda cuasi senoidal de V_{an} de 11 niveles de voltaje, por lo que, para lograr obtener estos 11 niveles, se analizó las secuencias de conmutación en cada transistor de potencia para formar un periodo de la onda de voltaje de salida. Estas secuencias de conmutación se encuentran en la Tabla 3, donde “1” significa que el transistor esta encendido y “0” que el transistor se encuentra apagado.

Una vez que se obtuvo las secuencias de disparo es necesario determinar los ángulos de disparo ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$) descritos en la Figura 10 y los tiempos correspondientes a dichos ángulos en donde la señal de salida cuasi senoidal cambia su nivel de voltaje, todo esto con el fin de obtener un porcentaje de Distorsión Armónica Total (THD) muy reducido.

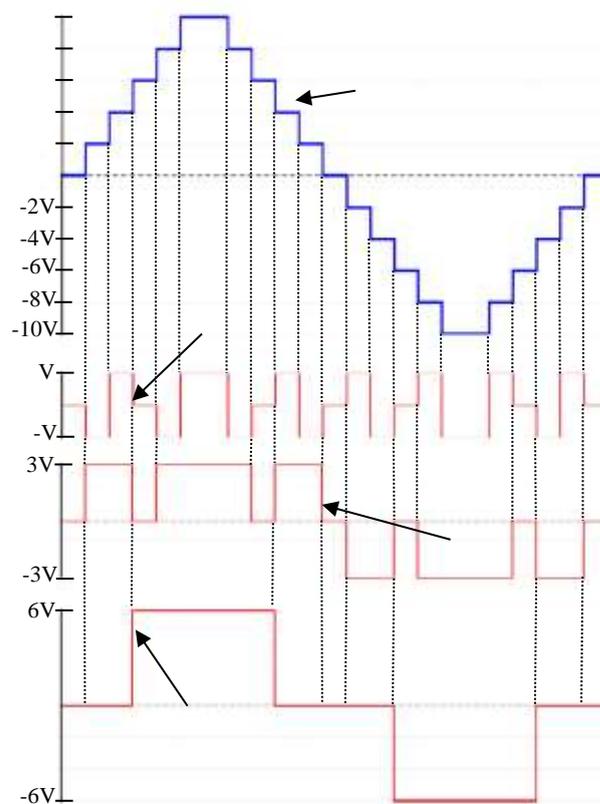


Figura 10 Forma de onda generalizada para inversor multinivel de 11 niveles

Fuente: Elaboración propia

Para determinar los ángulos de disparo, se desarrolló el análisis aplicando la estrategia de modulación llamada Eliminación Selectiva de Armónicos (SHE), que se revisó en la **sección 2.4**, debido a que, si se tiene la forma de onda de la Figura 10, se puede analizar por medio de series de Fourier (Ecuación (1)) y utilizando la Ecuación (8) se tiene que, para un inversor multinivel de 11 niveles, se obtiene:

$$H_n = \frac{4V_{cc}}{\pi n} (\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) \dots + \cos(n\alpha_3) + \cos(n\alpha_4) + \cos(n\alpha_5)) \quad (10)$$

Vo lts	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	1	1
0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
2	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0
4	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0
6	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1
8	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
10	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
8	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
6	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1
4	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0
2	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0
0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
-2	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
-4	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0
-6	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
-8	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
-10	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
-8	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
-6	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
-4	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0
-2	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0

Tabla 3 Secuencias de conmutación ara inversor multinivel de 11 niveles

Fuente: Elaboración propia

Entonces a partir de la ecuación (10) se obtiene la ecuación de la componente fundamental con un índice de modulación M (ver ecuación 9):

$$M * s = (\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) \dots + \cos(n\alpha_3) + \cos(n\alpha_4) + \cos(n\alpha_5)) \quad (11)$$

Donde M es el índice de modulación, “s” es el número de fuentes, “n” es el número del armónico impar, para la componente fundamental n=1. “αi” es el ángulo de conmutación. De igual forma de la ecuación 10 se obtiene el sistema de ecuaciones no lineales para los armónicos impares, en este caso se seleccionó para su eliminación los armónico 3^{ro}, 5^{to}, 9^{no} y 11^{vo} resultando el sistema de ecuaciones siguientes:

$$\cos(3\alpha_1) + \cos(3\alpha_2) + \cos(3\alpha_3) \dots + \cos(3\alpha_4) + \cos(3\alpha_5) = 0 \quad (12)$$

$$\cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) \dots + \cos(5\alpha_4) + \cos(5\alpha_5) = 0 \quad (13)$$

$$\cos(7\alpha_1) + \cos(7\alpha_2) + \cos(7\alpha_3) \dots + \cos(7\alpha_4) + \cos(7\alpha_5) = 0 \quad (14)$$

$$\cos(11\alpha_1) + \cos(11\alpha_2) + \cos(11\alpha_3) \dots + \cos(11\alpha_4) + \cos(11\alpha_5) = 0 \quad (15)$$

Como las ecuaciones SHE son no lineales trascendentales en forma, sus soluciones consisten en raíces simples, múltiples e incluso sin raíces para un valor particular del índice de modulación (M).

El método seleccionado para el cálculo de los ángulos de conmutación fue el de Newton-Raphson, este es un método iterativo el cual comienza con una iteración y una aproximación inicial, y generalmente converge en un cero, del sistema de ecuaciones dado. Este método se utiliza para calcular los ángulos de conmutación para el sistema de ecuaciones de la SHE utilizando las mejores soluciones (Karthika, Rajalakshmi, Deepika & Shalini, 2016). Los valores de dichos ángulos deben encontrarse en un intervalo comprendido entre 0 y $\pi / 2$.

Los ángulos de conmutación producen el voltaje fundamental deseado junto con la eliminación de los componentes armónicos seleccionados, de orden inferior.

Utilizando la versión para estudiantes del software PTC MathCad se creó un algoritmo para la resolución del sistema de ecuaciones no lineales, mediante el método de Newton-Raphson se obteniéndose los ángulos de conmutación que se muestran en la tabla 4, así como los tiempos en milisegundos correspondientes para cada ángulo.

	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
Grados	10.31°	16.30°	30.51°	42.32°	69.18°
Tiempo	0.47	0.75	1.41	1.95	3.20

Tabla 3 Ángulos y tiempos de conmutación (ms)

Fuente: Elaboración propia

Una vez que se obtuvieron los tiempos adecuados para los ángulos de conmutación para el primer cuarto de onda, recordando que se busca una frecuencia fundamental de 60 Hz, es decir un período de 16.66mS, Se extrapolaron dichos ángulos de conmutación para obtener todos los tiempos de conmutación necesarios para formar un ciclo completo como el que se observa en “Van” de la Figura 10.

Simulación del sistema

En esta sección se validaron los cálculos del diseño y análisis realizados en la sección anterior, la validación se llevó a cabo mediante el software Orcad PSpice de Cadence en su versión libre para estudiantes.

Una vez que fueron obtenidos los ángulos de conmutación adecuados para obtener un ciclo completo de la forma de onda escalonada como la que se observa en la Figura 10, se adecuaron las secuencias de conmutación obtenidas, (ver Tabla 3), para la obtención de los 11 diferentes niveles de voltaje del inversor multinivel.

La Figura 11 muestra las diferentes secuencias de conmutación para los conmutadores S1, S3, S5, S7, S9 y S11, de la topología propuesta para el inversor de 11 niveles propuesto (Figura 9), donde el valor 0 de la señal representa que el conmutador está apagado y el valor 1 que se encuentra encendido.

Las secuencias de conmutación para los conmutadores S2, S4, S5, S6, S7 y S12 son las complementarias de las secuencias mostrada en la Figura 11, es decir, la secuencia para S2 será la secuencia complementaria de S1, de igual manera de S4 será la complementaria de S3 y de esta manera sucesivamente

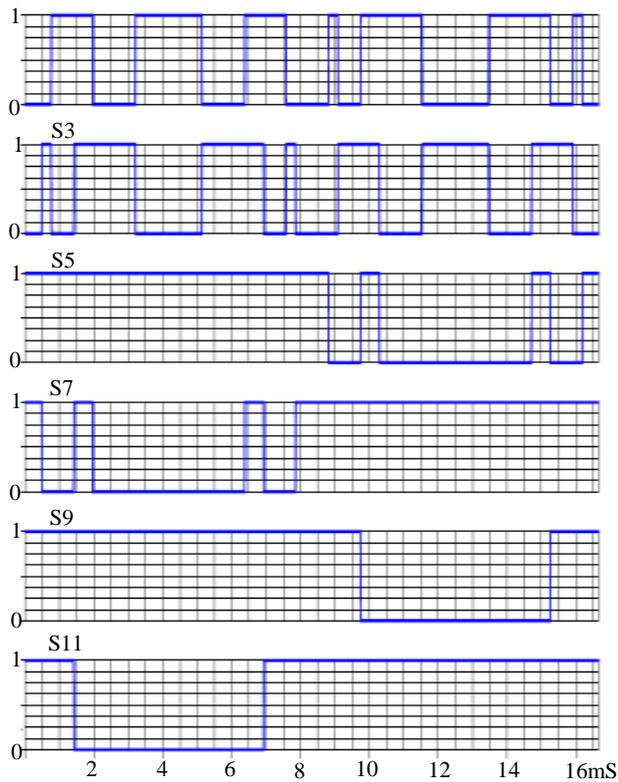


Figura 11 Secuencias de conmutación para S1, S3, S5, S7 y S11

Fuente: Elaboración propia

THD = 8.89%

La Figura 12 presenta la onda de voltaje generado por el inversor multinivel, resultado de las simulaciones con el Software Orcad PSpice, teniendo como resultado una onda casi senoidal de niveles, con una amplitud de 180 volts pico a pico y un voltaje eficaz de 128 volts comparada contra una onda senoidal pura con la misma amplitud de voltaje. En la Figura 13 se presenta la gráfica obtenida al aplicar la transformada rápida de Fourier a la onda de voltaje generado por el inversor, para la obtención del porcentaje de la distorsión armónica total, considerándose el análisis de Fourier hasta la 50va. armónica, obteniéndose un porcentaje de THD de 8.89%



Figura 12 Onda generada por el inversor de 11 niveles de voltaje

Fuente: Elaboración Propia

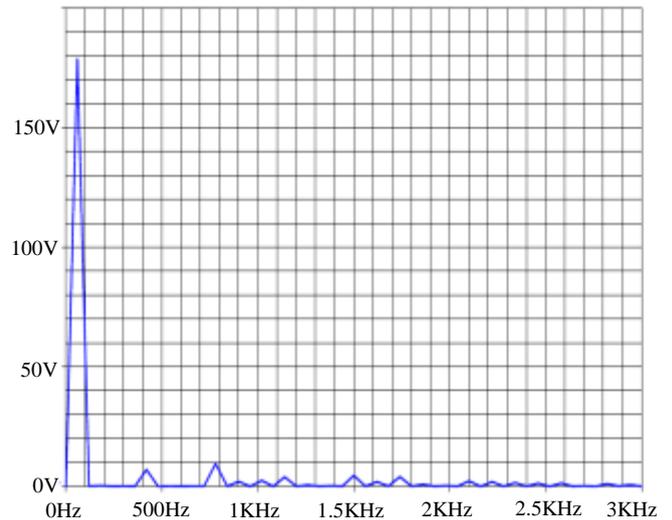


Figura 13 Análisis mediante transformada rápida de Fourier (FFT)

Fuente: Elaboración Propia

Agradecimientos

Se hace un extenso agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el otorgamiento de la beca para realizar mis estudios de maestría, y a la Universidad Autónoma de Zacatecas por el apoyo económico para la compra de material para el desarrollo de esta investigación,

Además se agradece al Programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto. Y a sus los docentes adscritos, Dr. Francisco Eneldo López Monteagudo y Dr. Jorge de la Torre y Ramos, por el asesoramiento otorgado durante el desarrollo del proyecto “Diseño de un inversor de puente H con tecnología multinivel utilizando la técnica de eliminación selectiva de armónicos”.

Conclusiones

Del análisis del estado del arte de las topologías de inversores multinivel se concluyó que la más conveniente para aplicaciones de media y alta potencia es la de puentes H en cascada, debido a su eficiencia y pocas pérdidas por conmutación dentro de sus principales características. Aunque el inconveniente de esta topología es que requiere tantas fuentes de CD como módulos de puentes H.

Del análisis de las estrategias de modulación se dedujo que las más efectivas son aquellas que trabajan a una frecuencia de conmutación fundamental, las cuales permiten obtener un bajo porcentaje de THD, mantener el voltaje fundamental requerido y mínimas pérdidas por conmutación, lo que implica una mayor calidad y eficiencia en la generación de potencia

Para la obtención de los ángulos de conmutación a partir del sistema de ecuaciones no lineales de la SHE, se utilizó el método iterativo de Newton-Raphson, el cual, con un principio bastante simple de aproximaciones, permitió obtener un porcentaje de THD de 8.89%. Dicho valor se encuentra en un nivel aproximado a los estándares requeridos por CFE. Dichos resultados podrían mejorarse con la aplicación de algunos filtros.

Para trabajo a futuro podría analizarse la utilización de algoritmos alternativos y más complejos para el cálculo de los ángulos de conmutación como son el algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO), a fin de obtener mejores resultados en la disminución de la THD, lo que implica una mejor calidad en la generación de electricidad.

Referencias

- Comisión Federal De Electricidad. (2005). *Desviaciones Permisibles En Las Formas De Onda De Tensión Y Corriente En El Suministro Y Consumo De Energía Eléctrica Especificación CFE L0000-45*.
- Pietzsch, M. (2004). Convertidores CC/CA para la conexión directa a red de sistemas fotovoltaicos: comparación entre topologías de 2 y 3 niveles. *Bachelor thesis, UPC*.
- Singh, B., Mittal, N., Verma, K. S., Singh, D., Singh, S. P., Dixit, R., ... & Baranwal, A. (2012). Multilevel inverter: A literature survey on topologies and control strategies. *International Journal of Reviews in Computing, 10*.
- Loranca, J. (2013). *Análisis de Técnicas de Modulación en Convertidores Multinivel en Cascada Asímetro* (Tesis de Maestría). Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Jiménez, O. (2012). *Estudio de Técnicas de Modulación para el Inversor Multinivel en Cascada Híbrido (Simétrico-Asimétrico)* (Tesis de Maestría). Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Ricaurte, N. & Sarzosa, D. (2014). *Diseño y construcción de un prototipo didáctico de inversor multinivel en cascada, monofásico de tres etapas para el Laboratorio de Control Eléctrico ESPE-Latacunga* (Tesis de Licenciatura), Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de Ingeniería Electromecánica.

Rodríguez, J., Franquelo, L., Kuro, S., León, J., Portillo, R., Martín, M., & Pérez, M. (2009). Multilevel Converters: "An Enabling Technology for High-Power Applications". *Proceedings of the IEEE*, 97(11), 1786-1817.

Prabaharan, N., & Palanisamy, K. (2017). A comprehensive review on reduced switch multilevel inverter topologies, modulation techniques and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1248-1282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.121>

Rashid, M., & González Pozo, V. (2004). *Electrónica de potencia* (3rd ed., pp. 206-303, 408-420). México [etc.]: Prentice Hall Hispanoamericana.

Hernández, E. D. (2014). *Análisis y desarrollo de un inversor multinivel aplicado a fuentes alternas de energía para interconexión a la red* (Tesis de Maestría). UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS.

Shehu, G., Yalcinoz, T., & Kunya, A. (2014). Modelling and Simulation of Cascaded H-Bridge Multilevel Single Source Inverter Using PSIM. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 8(5), 756-761.

Bakhshizadeh, M., Iman-Eini, H., & Blaabjerg, F. (2015). Selective Harmonic Elimination in Asymmetric Cascaded Multilevel Inverters Using a New Low-frequency Strategy for Photovoltaic Applications. *Electric Power Components and Systems*, 43(8-10), 964-969. <http://dx.doi.org/10.1080/15325008.2015.1021058>

Chauca, F., Llerena, F., & Chico, P. (2014). Diseño y construcción de un inversor multinivel. *Revista EPN*, 33(1).

Nápoles, J., Watson, A., Padilla, J., Leon, J., Franquelo, L., Wheeler, P., & Aguirre, M. (2013). Selective Harmonic Mitigation Technique for Cascaded H-Bridge Converters with Nonequal DC Link Voltages. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(5), 1963-1971. <http://dx.doi.org/10.1109/tie.2012.2192896>

Karthika, N., Rajalakshmi, R., Deepika, S., & Shalini, T. (2016). Selective Harmonic Elimination Technique Based Cascaded Multilevel Inverter with Reduced Number of Switches. *International Journal Of Science And Research (IJSR)*, 5(3), 2177-2181.

Estudio de los factores que inciden en el uso de combustible, en un corporativo nacional de transporte terrestre, para un modelo de mejora general

ELISEO-DÁNTES, Hortensia*†, MADRIGAL-ELISEO, José Luis, CASTRO-DE LA CRUZ, Jucelly y DE LEÓN-DE LOS SANTOS, Brissa Roxana

Recibido Enero 4, 2017; Aceptado Marzo 7, 2017

Resumen

El Diagrama Causa-Efecto es una forma de organizar y representar las diferentes teorías propuestas sobre las causas de un problema. Se conoce también como diagrama de ishikawa ó diagrama de Espina de Pescado y se utiliza en las fases de Diagnóstico y Solución de la causa. Es una de las herramientas más eficaces y más utilizadas en acciones de mejoramiento y control de calidad en las organizaciones, ya que permite, de una forma sencilla, agrupar y visualizar las razones que han de estar en el origen de un cualquier problema o resultando que se pretenda mejorar. Generar un equipo de trabajo que reúna toda la información necesaria de todas las variables que están inmersas en el rendimiento, de acuerdo, al diagnóstico realizado y atacar cada variable de la mejor forma con el apoyo y retroalimentación de todas las áreas involucradas

Rendimiento, variables, modelo, equipo de trabajo

Abstract

The Cause-Effect Diagram is a way of organizing and representing the different proposed theories on the causes of a problem. It is also known as ishikawa diagram or Fish Spine diagram and is used in the Diagnostic and Solution phases of the cause. It is one of the most effective and most used tools in improvement and quality control actions in organizations, since it allows, in a simple way, to group and visualize the reasons that have to be at the origin of any problem or resulting. It is intended to improve. Generate a work team that gathers all the necessary information of all variables that are immersed in the performance, according to the diagnosis made and attack each variable in the best way with the support and feedback of all the areas involved

Performance, variables, model, work team

Citación: ELISEO-DÁNTES, Hortensia, MADRIGAL-ELISEO, José Luis, CASTRO-DE LA CRUZ, Jucelly y DE LEÓN-DE LOS SANTOS, Brissa Roxana. Estudio de los factores que inciden en el uso de combustible, en un corporativo nacional de transporte terrestre, para un modelo de mejora general. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017, 1-1: 55-63

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: hortensia.dantes@itvillahermosa.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Recientemente el país se ha visto afectado por la alza en el precio del combustible, lo que ha generado un gran impacto en el modus operandi de las organizaciones establecidas dentro del territorio nacional debido a que este es uno de los recursos principales que se encuentra presente en cualquier organización.

El combustible representa una parte significativa en los costos organizacionales, por ello es necesario contar con un control preciso del mismo para evitar la generación de pérdidas en un futuro para la empresa. Cabe mencionar que el contexto en los últimos años se ha visto inmerso en continuo y acelerado cambio que impacta en diferentes ámbitos debido a los diversos factores que influyen tanto de manera interna como externa, lo cual esboza en la necesidad de analizar el escenario de manera integral.

Levantamiento de la información

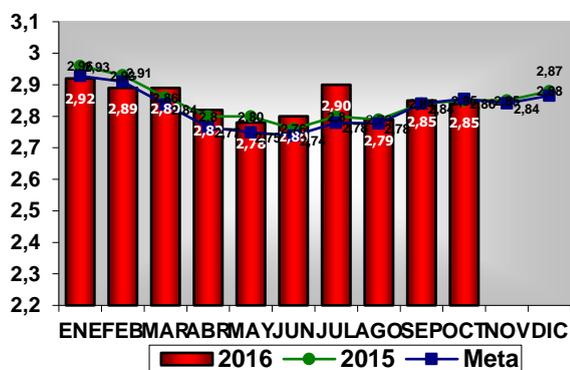


Gráfico 1 Comportamiento del rendimiento de combustible región Tabasco.

Fuente: Intranet de la empresa (2017)

En el grafico 1 se muestra el rendimiento que ha tenido el combustible en el año 2016 en comparación con el comportamiento que presento en el 2015 y la meta establecida, señalando un evidente sobrepaso de la meta en los meses de marzo a julio.

La empresa maneja la Region dividida en 3 marcas de las cuales se derivan los roles de autobuses.

Se hizo la inspección de cada rol para conocer el comportamiento del rendimiento de combustible en cada uno.

Marca Sur VHT:



Gráfico 2 Rendimiento del combustible en el rol ADV-TSV.

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

El grafico 2 muestra variaciones significativas del rendimiento real del combustible en contraste con el rendimiento meta establecida. Cabe señalar que la misma es generada a partir del plan estratégico del corporativo en estudio.



Gráfico 3 Rendimiento del combustible en el rol TPV

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

De igual manera se observa en el gráfico 3 que el rendimiento real queda muy por debajo del estimado.



Gráfico 4 Rendimiento del combustible en el rol Directo (Sur)

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

En este rol que se presenta en el grafico 4 se tiene una recuperación muy importante en los últimos meses, esto es debido a la incorporación de autobuses nuevos Irizar I5.

Marca Sur TRT



Gráfico 5 Rendimiento del combustible en el rol CRT-CNT.

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

Aunque es menor la diferencia en este rol, gráfico 5, se detecta una tendencia disminuir su rendimiento de combustible.



Gráfico 6 Rendimiento del combustible en el rol MIT

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

En este rol, gráfico 6, se presentan picos en donde se supera la meta de rendimiento de combustible establecido, aunque de igual manera presenta picos en caída del rendimiento, por lo que se deduce que podría estar incidiendo una variable que no sea constante.



Gráfico 7 Rendimiento del combustible en el rol CRT Corto

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

En el presente gráfico 7, no se presentan variaciones significantes, e incluso cuando ha quedado el rendimiento de combustible por debajo de lo esperado ha sido por mínimas diferencias.



Gráfico 8 Rendimiento del combustible en el rol Ríos

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

El rol Ríos, grafico 8, aunque en menor medida que otros roles, ha estado por debajo del rendimiento meta, cumpliendo con lo establecido únicamente en una sola ocasión.

Marca Sur TPV



Gráfico 9 Rendimiento del combustible en el rol TPV. Fuente: Elaboración de los autores (2017)

En el rol TPV, grafico 9, al igual que los roles de la marca VHT, son los que muestran un menor rendimiento de combustible.

Dada la información obtenida de la intranet de la empresa, es evidente la fuga de combustible que se ha presentado en el último año y que representa un gasto significativo para la organización.

Con base en lo anterior, surge la necesidad de realizar un estudio que identifique las variables que están incidiendo en el rendimiento de este recurso, para con ello diseñar una propuesta de mejora a dicha empresa con respecto a la problemática en cuestión.

Descripción del método

Para realizar un análisis detallado fue necesario hacer una evaluación por roles, que permitió conocer en datos reales y precisos, la cantidad de combustible que se está perdiendo a través de una muestra e identificar el grado de afectación del mismo.

Se diseñó un instrumento para evaluar sobre una muestra del 30% del parque vehicular disponible por rol. Los autobuses evaluados fueron seleccionados de acuerdo a los semáforos tomando en cuenta a los más bajos en rendimiento.

Se estableció los litros que debió consumir de acuerdo al kilometraje recorrido y se comparó con el que se registraba en los semáforos (litros que consumió realmente), dando como resultado cuanto combustible se consumió de más o en su caso, si existía un ahorro combustible. Los resultados arrojaron anomalías en el consumo de combustible real. Para una valoración de los factores que inciden en la problemática detectada se emplea el diagrama causa-efecto con el fin de identificar las posibles causas de la pérdida de combustible que se esta generando en la empresa.



Figura 1 Diagrama Causa-Efecto de variables internas y externas que afectan el rendimiento de combustible en la empresa ADO empresas coordinadas S.A. DE C.V. Región Golfo istm.

Fuente: Aportación de lo autores con la información obtenida de los expertos (2017)

Las variables identificadas surgieron a través de reuniones con los expertos los cuales fueron identificados a partir del método Delphi, entre los cuales se seleccionaron personal del departamento de operaciones variables y del departamento de Servicios, así como directivos y entrenadores.

De las variables planteadas se derivan los factores que son los que están incidiendo de manera significativa en la productividad de la empresa de lo cual resulta una deficiencia en el servicio ofrecido a los clientes. Un aspecto por de mas importante que afloraron los expertos es en el sentido de la actitud del personal a todos los niveles, lo cual se ve reflejado en las actividades, procesos, rentabilidad y productividad del corporativo. Implicando esto el que no puedan tener las actitudes correspondientes a los cargos ejercidos, y por ende no se genera el conocimiento necesario para el desarrollo de la organización.

Resultados

En la primera variable (taller), se detectaron anomalías en el mantenimiento de los autobuses, ya que algunas unidades salían del taller con las mismas fallas por las que habían sido ingresadas y en el caso de las unidades que ingresaban por mantenimiento preventivo no se les hacía las revisiones pertinentes, por lo que no se detectaban las fallas o desgaste de piezas o dispositivos que integran la unidad, que originan que estas de averíen durante el tiempo en que están en operación, afectando el servicio y los roles.

La segunda variable que simboliza “tráfico”, que es el departamento encargado de realizar la asignación y confirmación de viajes, llevar el control del rendimiento de combustible, verificar que las unidades reciban el mantenimiento correspondiente. Cabe mencionar que la tarea fundamental de dicha área es que se cumpla con los viajes establecidos que se han ofertado.

Dentro del estudio se detectaron diversos desfases en las unidades que ingresaban al mantenimiento preventivo, lo que generaba que trabajaran en malas condiciones. Aunque estas se reportaban no se ingresaban al taller debido a que su periodo de mantenimiento ya se había cumplido y causaría un desajuste en los roles establecidos que se debían cubrir.

Se procedió hacer una correlación entre el kilometraje desfasado en mantenimiento preventivo y los litros de combustible que la unidad consumía con el desfase. El análisis se hizo con una muestra del 30% del total del parque vehicular por rol.

La correlación se realizó con base en el desfase que existía en el mantenimiento preventivo en los autobuses de acuerdo con su clasificación, la cual esta basada en el kilometraje: autobuses viejos con una base de 10,000 km y autobuses Irizar I5 los cuales son nuevos, con base de 20,000 km.

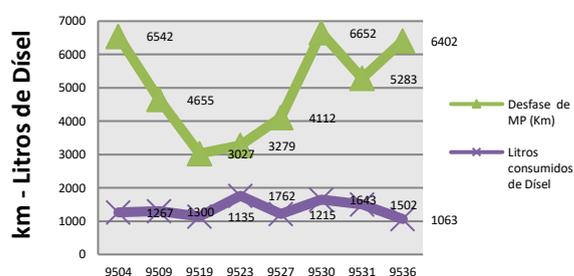


Gráfico 10 Correlación rol ADV-TSV

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

En el rol ADV-TSV se observa que los niveles de desfase son considerables, por lo cual al hacer la correlación entre el rendimiento del combustible del rol que se mostró en el gráfico 2 anteriormente, se detecta que el desfase incide significativamente en el rendimiento de dicho recurso.

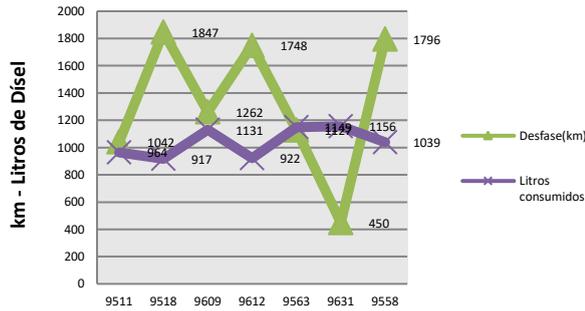


Gráfico 11 Correlación rol Sur Directo.

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

En el rol Sur Directo el desfase no se presenta en todas las unidades. Cabe mencionar que este rol cuenta con autobuses nuevos y se observa en el gráfico que el rendimiento es mas optimo en contraste con los roles con autobuses mas gastados.

El desfase en el rol CRT-CNT Corto es es muy variado entre las unidades pero el rendimiento de combustile ha sido optimo, por lo que no existe relación alguna, en este caso. Cabe mencionar que las unidades trabajan en distintas condiciones y puede haber otros factores que este incidiendo en ello.

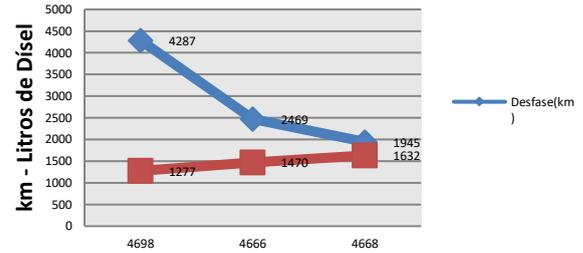


Gráfico 14 Correlación rol MIT

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

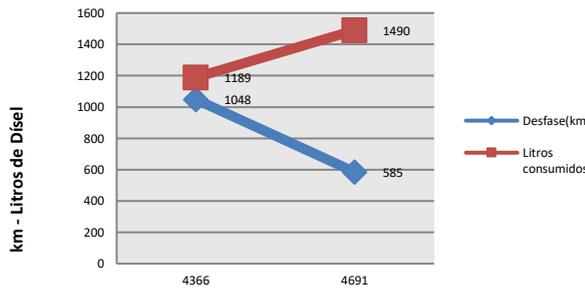


Gráfico 12 Correlación rol CRT-CNT

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

En el rol CRT-CNT el rendimiento es evidentemente mayor que en comparación con los otros roles lo cual se relaciona con un menor desfase en el kilometraje alcanzado antes recibir mantenimieto de las unidades.

El comportamiento del rendimiento del combustible en este rol va concorde con el desfase de las unidades.

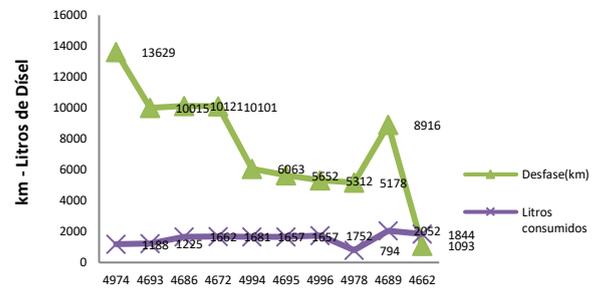


Gráfico 15 Correlación rol Ríos

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

En el rol de los Ríos el desfase se ha estado presentando de manera constante pero en contraste con el gráfico 8, donde se indica que dicho rol se ha mantenido por debajo del rendimiento meta exterioriza que es posible una correlacion entre estas dos variables, aunque, cabe mencionar que la diferencia entre el rendimiento real y el meta no es significativa.

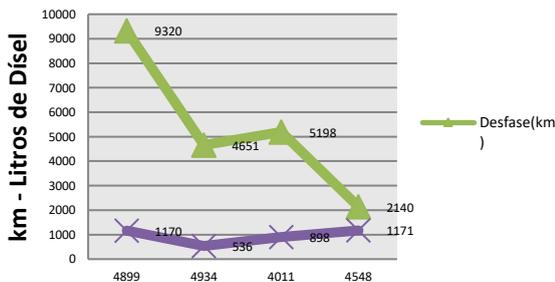


Gráfico 13 Correlación rol CRT-CNT Corto

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

Se hace énfasis en la premisa de que cada rol sigue un patrón distinto de comportamiento debido a que las unidades trabajan en diferentes condiciones dentro de las cuales algunas presentan problemas particulares, que influyen en el rendimiento del combustible.

En la siguiente variable que es el operario, se detectan irregularidades como son el exceso de velocidad y el uso inadecuado del aire acondicionado de las unidades (fuera del horario de trabajo), lo que es una de las causas identificadas del bajo rendimiento del combustible, ya que la velocidad máxima permitida es de 95 km/hr.

Tabla 1 Reporte de exceso de velocidad identificado en las unidades, periodo septiembre-octubre 2016.

Fuente: Intranet de la empresa (2016)

La cuarta variable es la de la isla. Esta involucra un factor conocido en la empresa como km+1, el cual representa la situación en que una unidad sale de recibir su mantenimiento preventivo en donde se le aumenta un kilometro que es el estimado que recorre, dicha unidad al momento de hacer las pruebas dentro del taller. Lo dicho anteriormente causa problemas al promediar el rendimiento de combustible porque se toma en cuenta este kilometro de mas para obtener el índice de rendimiento.

Carga(s) Encontrada(s)			26,009	10,509	2.47
Autobús	Documento	Fecha	Kms	Litros	Factor Rdto
4364	16524229	03/09/2016	728	273	2.67
4364	16528997	05/09/2016	647	221	2.93
4364	16530445	06/09/2016	537	200	2.69
4364	16536051	08/09/2016	536	215	2.49
4364	16541278	11/09/2016	144	256	0.56
4364	16542262	11/09/2016	1	21	0.05
4364	16550299	15/09/2016	391	158	2.47
4364	16561240	20/09/2016	1112	337	3.30
4364	16562212	21/09/2016	548	193	2.84
4364	16565652	22/09/2016	845	321	2.63
4364	16569480	24/09/2016	530	270	1.96

Tabla 2 Concentrado del km+1

Fuente: Intranet de la empresa (2017)

Otro problema que se genera en este registro es el de captura, ya que al momento de pasar los datos a la plataforma, se cometen errores en la captura de los datos, lo que produce que los datos no sean los reales al momentos de monitorear los índices establecidos.

Por ultimo se hace mención de la variable: desvío de combustible. Los reportes indican que el desvío que se genera varía por unidad y por rol en gran medida.

Existe falta de vigilancia a las unidades ya que se ha reportado el desvío de combustible incluso en turnos de paro de las unidades.

Propuesta

La propuesta es un modelo diseñado desde una perspectiva **sistémica**, que permite visualizar la organización integralmente con el fin de dar solución a los focos rojos que fueron detectados en el diagnostico.

El modelo esta estructurado en primer lugar por la sensibilización de la organización, ya que tanto los dirigentes como los subornidanos no muestran actitud positiva lo que propicia un ambiente laboral contaminado que interfiere en la realización eficiente de las tareas que se deben ejecutar.

En segundo término se necesita del desarrollo integral del personal, para lograrlo se requiere trabajar sobre las 4 áreas básicas del ser humano: física, emocional, mental y espiritual. Una de las estrategias para fomentarlo son las capacitaciones para desarrollar sus aptitudes, habilidades y conocimientos. Esto ayuda de manera directa en el manejo y control de las relaciones laborales.



Figura 1 Modelo de mejoramiento

Fuente: Elaboración de los autores (2017)

La tercera fase consiste en la integración laboral, en donde el individuo que ingresa a la empresa obtiene la información pertinente del puesto a desempeñar, las relaciones directas e indirectas que tendrá en él y las actividades a ejercer, así como también el acercamiento a los compañeros de trabajo.

El programa integral de ideas emprendedoras busca el emprendedurismo y compromiso del trabajador con la empresa, a través de la participación a la decisiones de esta, por medio de sugerencias y opiniones que le hagan sentir parte de la institución.

La cultura de calidad integral fomenta el desarrollo del empleado en el contexto de trabajo de forma integradora a través de los valores y los hábitos que complementados con el uso de prácticas y herramientas de calidad en el actuar diario permitirán la ejecución asertiva de las operaciones asignadas de modo que el trabajador tenga sentido de pertenencia a la institución.

Finalmente se debe realizar una retroalimentación de las áreas para dar lugar a una mejora continua a través de las experiencias y situaciones surgidas durante la implementación del modelo, tomando en cuenta las variables del contexto que envuelven el escenario en donde la empresa desarrolla sus actividades.

Conclusiones

El problema que presenta actualmente el corporativo es la falta de compromiso del personal, que no ejecuta sus tareas de forma óptima, esto debido a la falta de integración que tienen hacia la organización, lo que esboza en un mal servicio además de pérdidas para la empresa, ya que los empleados no cuidan los equipos de trabajo e incluso comenten irregularidades en cuanto a los recursos, como lo es el evidente caso del combustible.

Por ello es importante infundir una cultura de calidad a través de sensibilización del personal, quien toma un papel importante a desempeñar en las actividades de la empresa, puesto que los procesos claves dependen en gran medida del capital intelectual.

La empresa por su parte debe tomar una actitud integradora, para que genere la motivación de sus empleados, de tal modo que puedan eliminar las inconformidades que existen actualmente. Y que el modelo de mejoramiento propuesto pueda ser implantado exitosamente a corto plazo.

Referencias

CAMISÓN, C., CRUZ, S., GONZALEZ, T. (2006). *Gestión de la calidad: Conceptos, Enfoques, Modelos y Sistemas*. Madrid, España: Pearson.

CANTÚ, D. H. (2001). *Desarrollo de una Cultura de Calidad*. México: Editorial McGraw Hill.

CROSBY – PHILIP. (1996). *Reflexiones sobre la Calidad*. 2da Edición. México: Editorial McGraw – Hill,

DEMING, W. E. (1989). “*Calidad, Productividad y Competitividad*”. España: Ed. Días de Santos.

FLEITMAN. (2007). *Evaluación integral para implementar modelo de calidad*. México: Pax,

FRED R., DAVID. (1999). “*Conceptos de Administración Estratégica*”. 5ta Edición.

GALGANO, ALBERTO. (1998). *Calidad Total, clave estratégica para la competitividad de la Empresa*.

ISHIKAWA, K. (1988). *La calidad*. En ¿Qué es el control de la calidad? (261). Colombia: Norma.

KOONTZ, HAROLD. (2008). *Administración: una perspectiva global y empresarial*. México, D.F.: Mc GrawHill Interamericana.

TARÍ GUILLO, J. J. (2012). *Calidad total fuente de ventaja competitiva*. S.L. - Murcia: Espagrafic.

Prototipo funcional de prótesis transfemoral

ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, Ervin Jesús*†, ALDANA-FRANCO, Rosario, LÓPEZ-VELÁZQUEZ, Andrés y ABURTO-MENESES, Armando

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Región Xalapa, Universidad Veracruzana

Recibido Enero 5, 2017; Aceptado Marzo 8, 2017

Resumen

En este artículo se presentan los pasos necesarios para llevar a cabo el diseño de una prótesis transfemoral personalizada, que se adapte a cada uno de los pacientes que la requieran, así como las restricciones mecánicas angulares que debe cumplir para que sea funcional. También, utilizando el software especializado CAD 3D Inventor, se llevan a cabo los análisis mecánicos de esfuerzos, cargas y deformaciones a los que puede ser sometida la prótesis, con la finalidad de validar su posible uso de forma real, obteniéndose resultados que verifican la validez del diseño y del peso máximo permisible que la prótesis puede soportar. Además, se presentan las restricciones para llevar a cabo la construcción del prototipo funcional de la prótesis transfemoral, en donde la mayoría de las partes son de material rígido ABS, mientras que para el pie se utilizó un material flexible, mediante el cual se puede evitar el uso de un articulación extra, minimizando el peso total

Prótesis, prototipo, impresión 3D

Citación: ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, Ervin Jesús, ALDANA-FRANCO, Rosario, LÓPEZ-VELÁZQUEZ, Andrés y ABURTO-MENESES, Armando. Prototipo funcional de prótesis transfemoral. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017, 1-1: 57-67

Abstract

This article demonstrates the necessary steps to carry out the design of a personalized transfemoral prosthesis, adapted to each of the patients who require it, as well as the mechanical angular restrictions that must be met to be functional. As well, using the specialized software 3D CAD Inventor, the mechanical analyzes of stresses, loads and deformations to which the prosthesis can be committed are carried out, in order to validate their possible use in a real way, obtaining results that verify the validity of the design and of the maximum permissible weight that the prosthesis can support. Additionally, restrictions are presented to carry out the construction of the functional prototype of the transfemoral prosthesis, where most of the parts are of a rigid ABS material, while for the foot a flexible material was used, substituting the use of an extra joint, minimizing the entire weight

Prosthesis, prototype, 3D Printing

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Una de las problemáticas que tiene un mayor impacto social es el incremento en la cantidad de amputados que existen en el país (Gutiérrez-Carreño, A. R., 2014), ya que de acuerdo a la Academia Nacional de Medicina, en el año 2015 se registraban amputaciones a 75 personas por día, alcanzando un total de 780 mil amputados en esa fecha (Vázquez Vela, E, 2015).

Por otra parte, se ha identificado que la principal patología causante de amputaciones es la Diabetes Mellitus (Tapia-Rangel, J. C., 2015), ya que entre el 15% y el 25% de los pacientes que la padecen llegan a desarrollar pie diabético (Cisneros-González, N., 2016). Aunado a esto, se tiene un bajo índice que personal capacitado en el área que proporcione la atención adecuada y la rehabilitación requerida por los pacientes, ya que en el país solo existen 150 licenciados en el área de la rehabilitación a amputados (Vázquez Vela, E, 2015). Esto repercute en que solo 1 de cada 10 personas que tienen miembros amputados llegan a rehabilitarse y que de esos 10, solo el 30% aprende a utilizar la prótesis adecuadamente (Pérez Robles, B. A., 2014). Lo anterior indicaría que de los 780,000 amputados reportados, solo 78,000 se rehabilitan y que 23,400 son los únicos que aprenden a utilizar la prótesis.

La dificultad de aprender a utilizar la prótesis, muchas veces recae en el tipo de elementos que la componen, dentro de los cuales la de articulación de rodilla es uno de los componentes protésicos más complejos que existen, ya que imitar el comportamiento de una rodilla humana se dificulta por su estructura anatómica, además de que es de vital importancia para que el paciente vuelva a caminar. Es por esto, que es necesario el seleccionar la más adecuada, ya que existen distintas clasificaciones acorde a las necesidades del paciente.

Una de las clasificaciones es a través del movimiento cinemático que presenta el eje de rotación, ya que puede ser monocéntrico o policéntrico (Näder, M. and Näder, H. G., 2003). En el caso de las rodillas monocéntricas, estas presentan un movimiento similar al de una bisagra, es decir, la rotación se presenta solo en el plano sagital y su eje articular está ubicado atrás del eje de carga, con la finalidad de evitar que la rodilla se flexione cuando el pie toque el suelo por primera vez. Además este tipo de rodilla contiene un elemento que ayuda a absorber la energía durante la fase de apoyo y extender la prótesis durante la fase de balanceo. La geometría básica de este mecanismo es un triángulo con dos lados constantes, mientras que el tercero, que es el que generalmente realiza la tarea de extender la pierna, varía de forma proporcional al ángulo de flexo-extensión (Nájera Castrejón, J. A., 2013).

Esto se encuentra relacionado directamente con el ciclo de la marcha, el cual es un proceso cíclico en donde el centro de gravedad se mueve hacia adelante por efecto del movimiento armónico de las extremidades inferiores e indirectamente con ayuda de las extremidades superiores al balancear los brazos. El ciclo de la marcha puede dividirse en dos fases: apoyo y balanceo, o en tres intervalos sobre el plano sagital (Hernández Stengele, F., 2008), en los cuales se da a conocer el ángulo que logra la rodilla (Sánchez et al, 2006).

Los movimientos realizados por la rodilla durante la marcha requieren de una flexión-extensión que abarca un rango de 0° a 65° aproximadamente, sin embargo existen otros movimientos relacionados con las actividades cotidianas, los cuales requieren de otros ángulos de flexión para llevarse a cabo. El rango angular y la actividad que lo requiere se muestran en la tabla 1 (Nordin, M. y Frankel, V., 2001).

Actividad	Rango angular
Caminar	0° - 67°
Subir escalones	0° - 83°
Bajar escalones	0° - 90°
Sentarse	0° - 93°
Probarse un zapato	0° - 106°
Subir un obstáculo	0° - 117°

Tabla 1 Rangos angulares para la rodilla dependiendo de la actividad

Utilizando la información expuesta y estos rangos para la rodilla se propone un prototipo de prótesis transfemoral, para lo cual primero se expondrán los requerimientos que se deben tomar en cuenta para la prescripción de la prótesis. Posteriormente se mostrarán los resultados numéricos de esfuerzos que permiten validar el diseño propuesto y finalmente se mostrará el proceso de construcción de la prótesis transfemoral.

Requerimientos para la prescripción de una prótesis transfemoral

Para que a un paciente se le de la prescripción de una prótesis es indispensable contar con un equipo totalmente experimentado en el área (Thomas Passero, A.S, 2014). Este equipo debe estar conformado por un Médico Especialista en Ortopedia, un Fisioterapeuta y un Técnico en órtesis y prótesis, ya que cada uno tiene una tarea específica para reducir el tiempo de adaptación y mantener físicamente preparado al paciente.

El Médico Especialista en Ortopedia es el encargado de realizar la amputación y determinar el nivel de amputación. Los factores a considerar por parte del médico son: las condiciones preoperatorias, intraoperatorias y postoperatorias (Colciencias, 2015).

Preoperatorias

En esta etapa es donde se define si el miembro se salva o se amputa, debido a que es necesario tomar en cuenta la causa teniendo en cuenta el factor más importante: el lugar de amputación.

Intraoperatorias

Al momento de realizar una amputación es necesario obtener un muñón largo para disminuir el gasto energético en el paciente al momento de la ambulación. Se considera que un muñón es largo si su tamaño es el 50% del tamaño de la pierna sana, mediano si su tamaño se encuentra entre el 49% y el 26% y es corto si su tamaño es menor al 25%.

Condiciones postoperatorias

Inmediatamente después de la operación el muñón debe ser cubierto con una tablilla acojinada para prevenir contracturas en las articulaciones. El uso de una prótesis posoperatoria inmediata ha sido utilizado para acelerar la ambulación protésica, disminuir el edema del muñón y evitar la depresión postquirúrgica. Sin embargo en algunas ocasiones el uso de estas prótesis puede causar problemas en la herida. La decisión más importante después de la cicatrización es determinar si el paciente es candidato para una ambulación protésica apropiada. En resumen, una valoración completa tanto en el extremo amputado como en el paciente en general.

Una vez que se ha realizado la amputación, el siguiente especialista en ver al paciente es el Físico Terapeuta, ya que es el encargado de la preparación física del paciente. Para esta etapa, los expertos en el área mencionan que todos los pacientes son candidatos activos para una preparación física pero no para portar una prótesis.

Finalmente, el Técnico en órtesis y prótesis es el responsable no solo de llevar a cabo el ensamble y la adaptación de la prótesis al paciente, sino también es quien realiza el proceso de laminación de socket y la alineación estática y dinámica, lo cual repercute directamente en el confort del paciente.

Otros de los factores que deben tomarse en cuenta realizar la prescripción de una prótesis son un examen manual muscular, las áreas de apoyo, el nivel de amputación, el nivel de actividad que tiene el paciente y el costo de la prótesis.

Examen manual muscular

Por medio de este examen se determina el tipo de rodilla que se debe utilizar y consiste en palpar el muñón para determinar áreas de apoyo, si existen prominencias Oseas o alguna deformación anormal del miembro.

Áreas de apoyo

Las áreas de apoyo del socket son características muy importantes que se deben tomar en cuenta. Estas consideraciones afectan el diseño del socket, ya que se pueden utilizar materiales que absorben el impacto axial, así como hacer modificaciones al mismo diseño para liberar de estrés las áreas sensibles. Una de las técnicas que más se utiliza consiste en separar el área sobre la que el peso se apoya.

Niveles de amputación

Estos pueden ser 3, Distal, medial y proximal, mientras más distal el muñón, es más largo, por lo tanto es más fácil para el paciente manipular la prótesis mientras que si es proximal es más difícil que el paciente se adapte, tomando en cuenta que mientras más corto mayor esfuerzo y cantidad de oxígeno exigida por el cuerpo (Espinoza V. y García S, 2014).

Niveles de actividad

Están relacionados directamente con las actividades de cada paciente, ya que los requerimientos de una persona sedentaria son distintos a los de una persona activa. Muchos factores, como apoyo del peso, la suspensión, el material que se utiliza en el diseño de la prótesis entre otros, se ven afectados por el nivel de actividad del paciente (Andrews K.L, Nanos K.N. y Hoskin T.L, 2017). A continuación se listan los niveles que puede tener una persona.

- Nivel K0: Incapaz o sin potencial con o sin asistencia. El uso de prótesis no mejora su estilo de vida o su movilidad.
- Nivel K1: Puede utilizar una prótesis para trasladarse o moverse en superficies planas. La ambulación de una casa es limitada.
- Nivel K2: Posee potencial para ambular. Tiene la habilidad de superar pruebas de bajo nivel encontradas en la vida diaria, como curvas, escaleras y superficies dispares.
- Nivel K3: Habilidad o potencial de caminar a distinto ritmo. Es una persona capaz de superar casi cualquier obstáculo encontrado en la vida diaria. Normalmente utilizan prótesis que contiene componentes de alta tecnología.
- Nivel K4: sus habilidades ambulatorias exceden las características básicas. Normalmente realizan actividades que requieren mucha energía, alto impacto y estrés. Esta clasificación de niveles de energía es muy común encontrarla en niños, adultos muy activos o atletas.

Costos

El costo de una prótesis puede variar mucho, especialmente si cumple con los requerimientos del paciente, en donde se toma en cuenta peso, nivel de actividad y objetivos funcionales además de utilizar componentes ligeros y de alta tecnología. Los componentes ligeros son hechos con titanio y fibra de carbono, los cuales son materiales de alto costo. Existen también componentes con microprocesadores lo que junto con los materiales hacen que la prótesis aumente su costo significativamente.

Aunado a lo anterior, se deben tener en cuenta algunas consideraciones especiales, que usualmente son comunicadas por el paciente, éstas dependen directamente con las actividades y el medio ambiente en el que se desenvuelve en su vida cotidiana, para que pueda reintegrarse (CENETEC, 2009)

Análisis mecánico de la rodilla propuesta

La propuesta de diseño es una rodilla monocéntrica, la cual cumple con los requerimientos para los intervalos de marcha y rangos angulares, incluyendo las características mecánicas que deben cumplirse para un adecuado funcionamiento de la marcha.

Con la finalidad de llevar a cabo un adecuado diseño mecánico, se utilizó el software Inventor®, mediante el cual se pudo realizar el modelado de sólidos en 3D, utilizando las características que se requerían que tuviera la prótesis, así como el funcionamiento que realiza cada componente.

Para iniciar con la propuesta de diseño de la rodilla protésica, primero se tomó en cuenta la funcionalidad de la rodilla humana para lograr los movimientos tradicionales de caminar, bajar y subir escaleras y sentarse, por lo que el ángulo de flexión elegido fue de 0° a 105°.

Por otra parte, por cuestiones de seguridad para el futuro usuario de la prótesis, se limitó al movimiento en el plano sagital, proponiéndose además que la rodilla estuviera conformada por tres componentes: el flexor-extensor, la rodilla superior y la rodilla inferior.

Elemento flexor-extensor

Proporciona un amortiguamiento a los impactos y de tal forma que estos no se transmitían hacia el socket-muñón del paciente. Dimensionar este componente fue primordial, ya que mediante el mismo se establecieron los espacios que requieren los componentes inferior y superior.

Rodilla superior

Este componente tiene como finalidad emular la acción de flexión del fémur en la rodilla. Se diseñó para cumplir con las características requerida para la adaptación y funcionamiento de la rodilla, las cuales son pestañas para seguridad en el bloqueo, soporte para el componente flexor-extensor, eje articular y aditamento superior.

Rodilla inferior

Fue diseñado con la finalidad de emular la parte superior de la tibia, permitiendo uniones con el elemento superior y el elemento flexor-extensor. Este componente también presenta orificios para el eje articular y para el componente flexor-extensor. La forma en que se diseñó fue para darle mayor estética y reducir el peso total, además se incluyeron ranuras en la parte posterior para evitar que los pernos obstruyan la flexión total alcanzable.

Después de haber definido los elementos que componen la rodilla mecánica, se inicia el ensamble con los tres componentes, donde se utilizan pernos para las uniones, en la figura 1 se muestran la vista lateral y frontal del ensamble, donde con una línea azul se indica el eje de carga, observando que en la vista lateral esta adelante del eje articular y en la vista frontal se encuentra centrado.

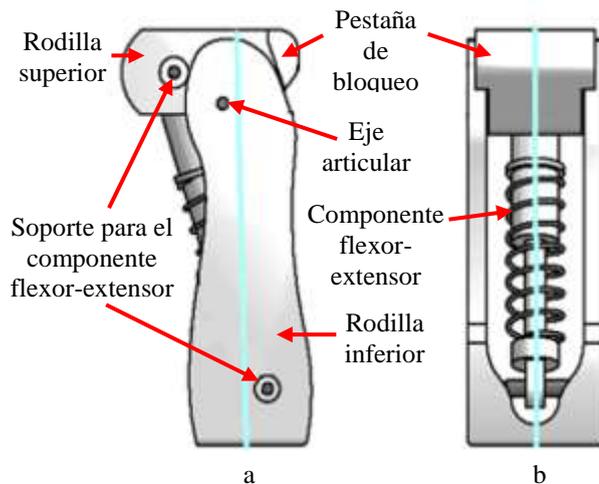


Figura 1 Ensamble de la rodilla. a Vista lateral, b Vista frontal

Una vez que ya se tiene el diseño de los componentes de la rodilla y su respectivo ensamble, lo siguiente es realizar simulaciones numéricas utilizando el software Inventor ®. La rodilla es sometida a una fuerza aproximada de 734 N, lo que sería equivalente a una persona cercana a los 75 kg. Se realiza el análisis de tensión aplicando la fuerza en el componente superior de la rodilla mientras se mantiene fijo el componente inferior. Cabe mencionar que el material utilizado para simular los pernos es acero.

Los resultados que arroja la simulación son: tensión de Von Mises, la tensión principal, 3a tensión principal y el desplazamiento.

Tensión de Von Mises

La figura 2 muestra que desde una vista lateral toda la superficie tiene una tensión de 0 MPa, mientras que en la vista posterior se aprecia que las zonas que se encuentran a mayor tensión son los pernos, lo cuales conectan el componente flexor-extensor con los componentes superior e inferior. Estas zonas en color azul claro se encuentran indicadas mediante círculos rojos.

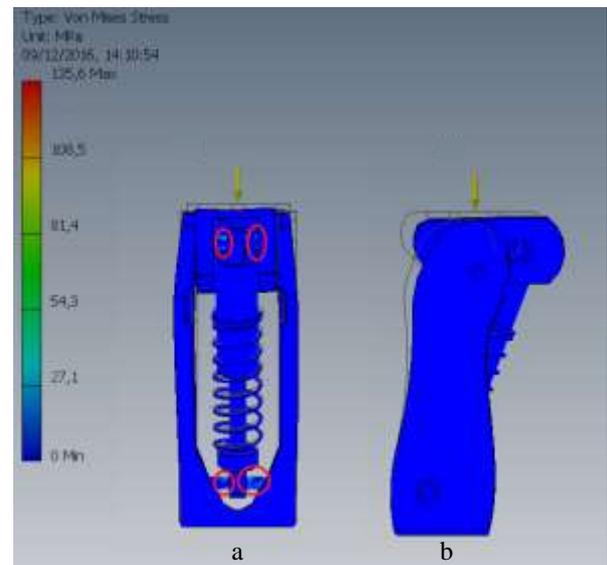


Figura 2 Tensión de Von Mises. Vista a. posterior, b. frontal

La tensión principal

La figura 3 muestra la rodilla en una vista posterior en donde la mayor parte de la rodilla se encuentra con tensión negativa (compresión), en las zonas marcadas con una circunferencia roja existe una mayor tensión ya que se encuentra de color azul claro.

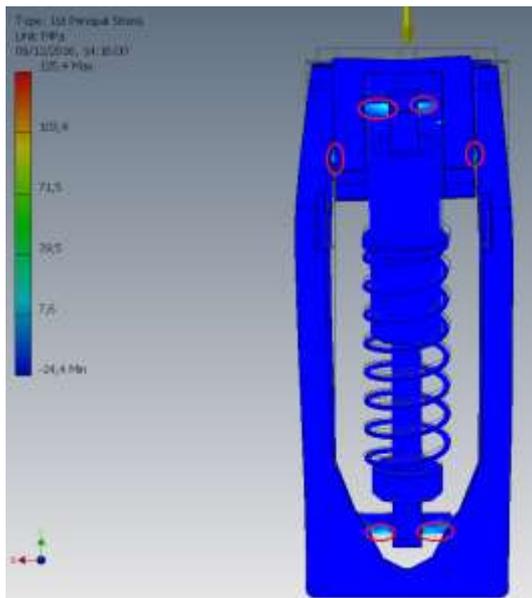


Figura 3 1a tensión principal.

3a tensión principal

En la figura 4 se observa que las zonas marcadas con un círculo y un rectángulo azul es donde se concentra la mayor compresión.

Desplazamiento

El desplazamiento es mostrado en la figura 5, en donde se observa que el mayor desplazamiento sucede en la parte superior de la rodilla, siendo los puntos más afectados las pestañas de bloqueo y la parte más elevada del componente inferior, mientras que en la parte inferior de la rodilla no se aprecia que exista desplazamiento.

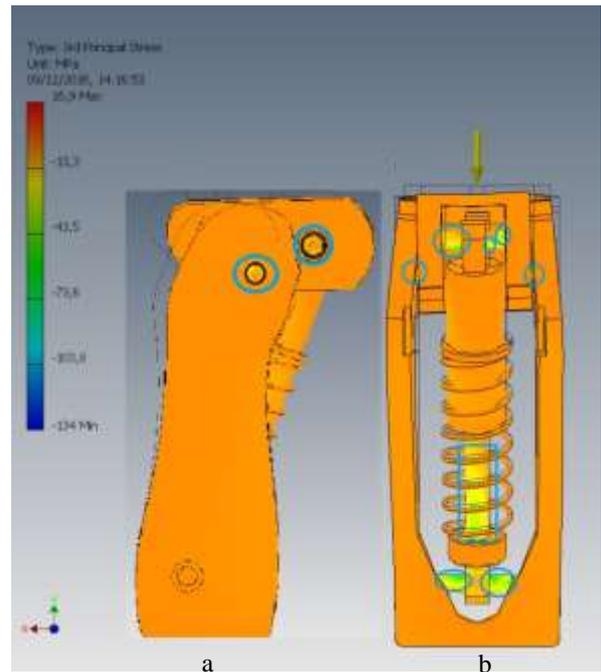


Figura 4 3a tensión principal. . a vista lateral, b vista posterior

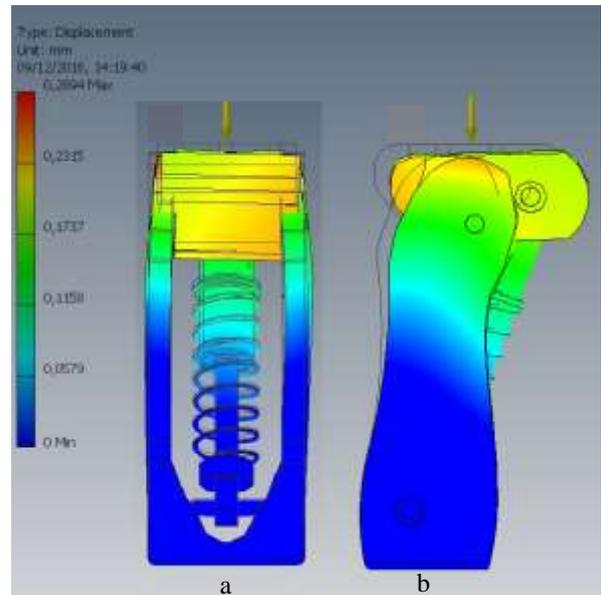


Figura 5 Desplazamiento. a vista frontal, b vista lateral

Una vez verificado los límites de seguridad que tendrá el diseño propuesto, lo siguiente es realizar la construcción del prototipo.

Construcción del Prototipo Funcional

Para la construcción del prototipo se utilizan elementos diseñados previamente en el software CAD Inventor ® y tomando en cuenta que la prótesis estará conformada por socket, conectores, rodilla, pie-tobillo y pilón tibial, los cuales se describen a continuación.

Socket

El socket es el elemento que se encuentra en la parte superior de la prótesis y tiene como función principal la de confinar al muñón al mismo tiempo que mantiene unida la prótesis al portador. Este elemento, es el que se diseña de forma más personalizada, ya que está en contacto directo con la piel del paciente, motivo por el cual es de suma importancia seleccionar adecuado, que no produzca rechazo ni ulceraciones. Además, en el diseño del socket, deben considerarse también los puntos en los cuales generará presión para llevar a cabo la retención, cuidando no producir daños cutáneos al portador.

Para llevar a cabo la conformación del socket, se debe realizar una serie ordenada de pasos, para lo cual se propone lo siguiente:

- Examen manual muscular para conocer el estado en que se encuentra el muñón. Consiste en una prueba de fuerza del muñón ante una fuerza de oposición, está la realiza el médico especialista en prótesis. Cabe recordar que la masa muscular de un amputado diabético es menor que la de un traumático.
- Toma de medidas para determinar las dimensiones del muñón tanto de longitud como circunferencia. Se toma la longitud desde el isquion hasta la punta del muñón (parte distal del muñón) y la medida de la circunferencia del muñón cada 5 cm partiendo de la punta.

- Es importante tomar en cuenta la posición de la cabeza del fémur, la cual es cubierta con el socket ayudando a la retención.

Una vez que ya se han obtenido las medidas del muñón, lo siguiente es realizar un molde negativo, utilizando vendas de yeso. Los pasos que se deben realizar son los siguientes:

- Colocar una media elástica de nilón que cubra todo el muñón, con la finalidad de evitar que el yeso se pegue a la piel del paciente.
- Mojar la venda de yeso, sumergiéndola completamente aproximadamente 10 segundos en un recipiente con agua.
- Exprimir la venda y comenzar a enrollar el muñón de arriba hacia abajo. La venda debe cubrir todo el muñón, en la parte interna en la zona del perineo y en la parte externa por arriba del trocánter mayor.
- Ubicar los huesos isquion y la zona del perineo ya que en esos puntos se realizara una presión extra para una mejor sujeción del socket. Debe tenerse cuidado de cubrir completamente la punta del muñón para evitar una fuga cuando se realice el vaciado para conformar el molde positivo.
- Esperar a que el yeso seque y se endurezca, para posteriormente realizar un corte al molde negativo, utilizando tijeras especiales, para extraerlo.
- Resanar el molde y cubrir el corte que se realizó utilizando otra venda de yeso, previniendo de esta manera fugas al momento de la construcción del molde positivo.

Lo siguiente es realizar un vaciado de yeso dentro del molde negativo para crear un molde positivo, mediante el cual se obtiene una copia del muñón del paciente en yeso, para conformarlo se debe hacer lo siguiente:

- Tomar la medida de la circunferencia de del molde en la parte más alta y ancha.
- Elaborar una pestaña de cartón con medidas mayores al diámetro del muñón y de aproximadamente 20 cm de ancho.
- Adherir el cartón alrededor de la parte ancha tratando de darle mayor altura.
- Colocar vaselina al molde negativo en toda su superficie interna.
- Verter sobre el molde negativo una mezcla de 60% yeso 40% agua, preparada previamente, hasta sobrepasar la altura del molde negativo y sin sobrepasar la pestaña de cartón.
- Insertar un tubo de acero galvanizado en el centro de la mezcla, hasta alcanzar aproximadamente $\frac{3}{4}$ partes de la profundidad de la mezcla. Este tubo servirá de soporte del molde y para poder manipular y fijar a una prensa.
- Cortar el molde negativo y extraerlo, una vez que el molde positivo está seco y se ha endurecido.
- Dar forma y una textura lisa, realizando un rebaje en la parte interior o frontal del molde, para colocar un domi de dimensiones similares a la válvula de succión. Esto se muestra en la figura 6.



Figura 6 Molde positivo transfemoral con acabado

Después de tener el molde positivo en las condiciones óptimas se procede a adaptarle el platillo de 4 perforaciones para socket transfemoral, el cual se debe alinear respecto a la postura natural de la pierna (5° de flexión y con una alineación del platillo 40-60). El platillo se coloca en la punta el molde positivo y se le agrega yeso en las orillas para cubrir y hacer que empate y recargue el platillo con el yeso del molde, como se muestra en la figura 7.



Figura 7 Conector tipo plato montado en molde positivo transfemoral de yeso

Para la laminación del socket se requieren realizar los siguientes pasos:

- Tomar medidas del molde positivo para dimensionar cuanto se necesita de polipropileno, se toma la longitud total del molde y se le agregan 5 cm extra de margen, de igual manera se toma la circunferencia en la parte de mayor volumen agregándole 5 cm extra.

- Calentar la lámina en un horno especial a 220°C hasta que cambie de color blanco a transparente, momento en el cual el polipropileno es maleable.
- Colocar el tubo galvanizado dentro del tubo adaptador de una boba de vacío.
- Cubrir todo el molde positivo con una media, realizar un amarre en la parte superior y rociarla con desmoldante para evitar que el polipropileno se pegue a la media o al molde positivo.
- Cubrir el socket completamente con la lámina de polipropileno, dejándola caer lentamente por gravedad, teniendo cuidado de unir los lados por la parte inferior con las manos (protegidas con guantes de asbesto) para conservar el molde en una burbuja de polipropileno.
- Cortar los excesos, procurando dejar el polipropileno lo más cercano al molde.
- Encender la bomba de vacío para provocar que el polipropileno se adhiera al molde positivo, tomando su forma. Esto es posible gracias a que el yeso al reaccionar con agua es moldeable, sólido y poroso.
- Colocar en la punta del socket más polipropileno para reforzar la zona del platillo, como se muestra en la figura 8.



Figura 8 Socket transfemoral con platillo

Es importante recalcar que el polipropileno es moldeable durante aproximadamente 2 minutos a temperatura ambiente después de haberse calentado a 220 °C, por lo que todo el proceso de laminación descrito previamente debe llevarse a cabo durante este lapso.

Una vez que se ha enfriado se extrae el socket del molde utilizando aire a presión, por medio de una perforación a un costado de donde se encuentra el orificio del domi. Lo anterior expulsa el socket, por lo que debe hacerse con mucho cuidado para evitar fracturarlo. En la figura 9 se muestra el socket de polipropileno con acabados después de ser esmerilado.



Figura 9 Socket de polipropileno con acabado final

La fabricación de la rodilla superior e inferior, diseñadas en la sección anterior, se realizó en plástico ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), el cual es un material resistente con un punto de fusión de 240°C. Para esto se utilizó una impresora 3D Airwolf HD.

Rodilla superior

Esta pieza cuenta con un área para el rango de movimiento del elemento flexor y el eje mecánico que en conjunto con la rodilla inferior y el elemento flexor realizara la flexión-extensión, también tiene el eje de rotación y traslación del elemento flexor extensor. Además se tienen los orificios donde se adaptará el conector tipo piramidal macho, junto con las pestañas que realizaran la función de tope mecánico al momento de realizar la extensión. La pieza tomó 15 horas de impresión con una calidad de relleno del 90%. En la figura 10 se muestra el prototipo de rodilla superior.

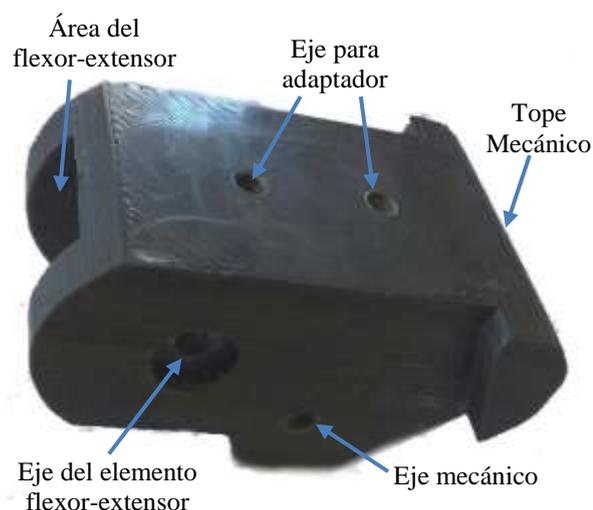


Figura 10 Prototipo de rodilla superior en ABS

Rodilla inferior

Este elemento se ubica debajo de la rodilla superior, tiene como función realizar el movimiento de flexión-extensión en conjunto con los elemento rodilla superior y el elemento flexor-extensor. Cuenta con el eje mecánico de giro, que en conjunto con el elemento flexor-extensor y rodilla superior realiza el movimiento de flexión-extensión.

También presenta el orificio a través del cual pasara un tornillo que permite unir a la rodilla con un conector, la contraparte de las pestañas del elemento rodilla superior, las cuales sirven como tope mecánico para restringir el movimiento de flexión. Además, en la parte inferior de están ubicados los orificios donde se colocara el eje de giro del elemento flexor-extensor y unas ranuras las cuales tienen como función evitar que la tornillería del elemento rodilla superior al realizar la flexión toquen el elemento rodilla inferior.

La rodilla inferior tuvo un proceso de impresión en plástico ABS de aproximadamente 30 horas, con un porcentaje de relleno de 90% para proporcionarle la rigidez suficiente. En la figura 11 se muestra el prototipo de rodilla inferior construido

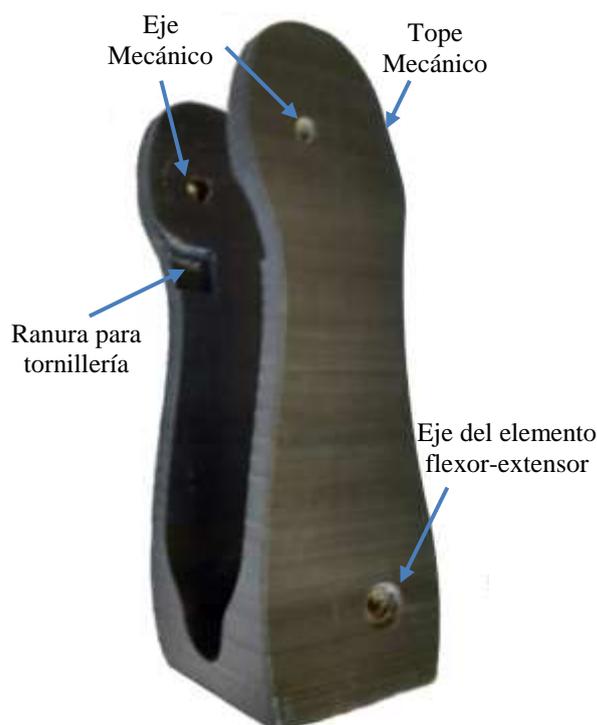


Figura 11 Prototipo de rodilla inferior en ABS

Elemento flexor-extensor

Este elemento está compuesto por un pistón de 5.2 cm de carrea, maquinado en aluminio, y un resorte de 10 cm de longitud sin deformar y 3 cm de compresión máxima.

El resorte cuenta con 10 espiras de 3 mm de diámetro cada una y tiene un diámetro interno de 3 cm. En la figura 12 se muestra el prototipo de elemento flexor-extensor de la rodilla mecánica.



Figura 12 Prototipo del elemento flexor-extensor

Las dimensiones de este elemento son las medidas base para los elementos rodilla superior y rodilla inferior.

Ensamble de la rodilla mecánica

En la figura 13 se muestra una vista sagital del prototipo de rodilla ensamblado con las 3 piezas que lo conforman, recordando que la forma natural del elemento es en extensión.



Figura 13 Vista sagital de la rodilla mecánica

En la figura 14 se presenta el prototipo de rodilla mecánica desde una perspectiva frontal. Se aprecia que el elemento flexor-extensor tiene el espacio suficiente para realizar su función.



Figura 14 Vista frontal de la rodilla mecánica

Conectores

Los conectores se diseñan de manera personalizada para una mejor adaptación, respetando las condiciones de funcionamiento y dimensiones de la semiesfera y la pirámide. Los conectores que se requieren son el tipo piramidal macho, el tipo piramidal hembra con adaptador de tubo y el tipo piramidal hembra con cuatro agujeros. La construcción de cada conector se llevó a cabo en un tiempo aproximado de 2 horas con una calidad de 90% en plástico ABS.

Piramidal macho

Para el prototipo se requieren tres conectores, el primero va ubicado en la parte superior de la rodilla y con ayuda de un socket hembra de cuatro agujeros se une al socket. El segundo conector se utiliza unir la parte inferior de la rodilla con un extremo del pión tibial a través de un conector piramidal hembra con adaptador de tubo. El tercer conector está ubicado en el tobillo y permite unirlo con el otro extremo del pión tibial a través de un conector piramidal hembra con adaptador de tubo. En la figura 15 se muestra el prototipo de este adaptador.



Figura 15 Conector piramidal macho

Piramidal hembra con adaptador de tubo

Para el prototipo propuesto se necesitan 2 conectores de este tipo, su función es unir el pilón tibial con la rodilla y con el tobillo con ayuda del conector tipo piramidal macho. En la figura 16 se muestra el diseño del conector tipo piramidal hembra donde se presentan los orificios a través de los cuales se colocaran tornillos para producir la alineación y en la parte inferior se presenta un orificio donde se colocara un tornillo para evitar el movimiento de traslación y rotación del pilón tibial.



Figura 16 Conector piramidal hembra con adaptador de tubo

Piramidal hembra con cuatro agujeros

Este conector se ubica debajo del socket para permitir la unión y alineación del socket con la rodilla. El prototipo propuesto solo necesita de una pieza de este tipo, la cual se muestra en la figura 17.



Figura 17 Conector piramidal hembra con cuatro agujeros

Pie-Tobillo

El Pie-Tobillo es la parte de la prótesis que realiza el movimiento de dorsiflexión, este elemento se ubica en la parte inferior de la prótesis y es el encargado de recibir el impacto al caminar y el peso del paciente al momento de apoyar toda la masa corporal, motivos por los cuales indispensable que sea resistente y que permita realizar el movimiento básico del tobillo y pie.

Este elemento se divide en dos piezas que son construidas de diferentes tipo de material utilizado en la impresora 3D. El tobillo se construye en plástico ABS para darle resistencia ante el peso del paciente, mientras que el pie se construye de poliuretano termoplástico o TPU, el cual es un material con un grado de flexibilidad mayor al del ABS y con memoria, lo cual lo hace ideal para llevar a cabo la dorsiflexión.

Tobillo

En la figura 18 se muestra el prototipo de tobillo, para el cual se necesitaron 12 horas de impresión con un 90% de relleno. Se observa que se tiene en la parte superior un orificio, que permite unir el tobillo con un conector piramidal macho mediante un tornillo. En la parte central se tiene un espacio que permite manipular el tornillo además de disminuir el peso de este elemento.



Figura 18 Prototipo del tobillo

Pie

Este elemento se encuentra situado en la parte inferior del prototipo de prótesis, es el que recibe el mayor impacto debido al efecto del peso del portador y además debe realizar la dorsiflexión. para hacer esta pieza se utilizó un TPU ya que dentro de las características de este material esta la flexibilidad y es lo necesario para realizar la flexión del pie. La construcción se tomó 22 horas con un 90% de relleno.

En la figura 19 se muestra el diseño propuesto para el prototipo, se muestran 2 orificios lo cuales mediante tornillos lo unirán con el tobillo. Cuenta con un aumento de volumen en la parte media del pie que va desde la punta hasta $\frac{3}{4}$ partes del pie antes de llegar al talón, con la finalidad de servir de tope con el tobillo y de apoyo para el mismo.



Figura 19 Prototipo de pie flexible

Ensamble pie-tobillo

En la figura 20 se muestra en una vista del ensamble del prototipo físico de Pie-Tobillo, en cuanto a dimensiones no sobrepasa el volumen de un pie, realiza la dorsiflexión sin deformarse, la alineación es similar a la de un pie, aproximadamente con 5° de abducción.



Figura 20 Prototipo Pie-Tobillo

Pilón tibial

Para el pilón tibial se utiliza tubo de aluminio de $\frac{3}{4}$ in de diámetro por 2mm de espesor por 20cm de longitud, en la figura 21 se muestra el pilón tibial utilizado para el prototipo.



Figura 21 Pilón tibial

Ensamble y pruebas funcionales

Teniendo todos los elementos que conforman el prototipo propuesto se procede a realizar el ensamble general, todas las uniones se realizaran mediante tornillos de diferentes tipos.

Ensamble

En la figura 22 se muestra el prototipo de prótesis transfemoral el cuenta con un socket cuadrilateral en polipropileno, con una sujeción de tipo platillo, una rodilla mecánica monocéntrica tipo resorte hecha en plástico ABS, la unión entre el socket y la rodilla es por medio de 3 conectores, un platillo hecho en aluminio, el cual se encuentra ubicado dentro del socket, un conector tipo piramidal hembra con 4 agujeros hecho en plástico ABS, el cual se coloca debajo del socket y un adaptador tipo piramidal macho hecho en plástico ABS, el cual se encuentra colocado sobre la rodilla.

Para unir la rodilla con el pilón tibial se utiliza un conector tipo piramidal macho hecho en plástico ABS, el cual se ubica debajo de la rodilla y un conector tipo piramidal hembra con adaptador de tubo hecho en plástico ABS.

La unión entre el pilón tibial y el Pie-Tobillo es mediante un adaptador tipo piramidal hembra con adaptador de tubo hecho en plástico ABS y un conector tipo piramidal macho hecho en plástico ABS el cual se encuentra colocado sobre el Pie-Tobillo.



Figura 22 Vista frontal del prototipo de prótesis transfemoral

Se observa que en la articulación del Pie-Tobillo se se presenta la aducción simulando un una extremidad real, si se traza una línea simétrica imaginaria se muestra la alineación del socket donde existe mayor área de la parte exterior que de la interior, aproximadamente la alineación es de un 60% (externa) a un 40% (interna).

En la figura 23 se presenta el prototipo de prótesis transfemoral desde una vista sagital, se muestra una ligera inclinación hacia atrás, efecto de la alineación del disco para simular la estructura ósea de la extremidad.



Figura 23 Vista sagital del prototipo de prótesis transfemoral

Pruebas funcionales

El prototipo de prótesis transfemoral fue sometido solamente a 2 pruebas de funcionalidad: flexión-extensión en la rodilla y dorsiflexión en el Pie-Tobillo. Para ello se aplicó una fuerza sobre el socket simulando el movimiento de pierna de una persona pero con una cantidad de peso reducida.

Flexión-extensión

La prótesis puede alcanzar una flexión de 105° aproximadamente, lo que permite realizar actividades como caminar, subir escalones, bajar escalones, sentarse, probarse un zapato y hasta subir un obstáculo.

En la figura 24 se presenta el prototipo realizando el movimiento de flexión al nivel de la rodilla desde una vista sagital.



Figura 24 Protótesis sometida a flexión

Dorsiflexión

El prototipo alcanza un ángulo de casi 40° , lo cual es funcional para el desplazamiento. Pero no para realizar actividades con mayor nivel de dificultad. En la figura 25 se presenta el prototipo de prótesis siendo sometido al movimiento de dorsiflexión sin realizar flexión en la rodilla.



Figura 25 Protótesis sometida a dorsiflexión

Conclusiones

El diseño propuesto cumple con los requerimientos para llevar a cabo los movimientos de la marcha, sin embargo este no puede ser construido de manera general para todos los pacientes, ya que es necesario conocer el comportamiento de la extremidad inferior de manera individual. Esto permite llevar a cabo una adecuada conformación del socket, tomando como base el muñón del paciente, lo que permite dimensionar los demás componentes.

Además, también es necesario contar con un equipo que tenga amplio conocimiento en el área, preferentemente conformado por un médico especialista en ortopedia, quien determina los componentes por los que estará compuesta la prótesis, un fisioterapeuta quien se encargara de la preparación física del paciente y un técnico en órtesis y prótesis quien está encargado de ensamblar la prótesis y hacer el socket.

Aunque en el software especializado, se tiene un resultado positivo para cargas y deformaciones, durante las pruebas se encontró que los elementos conectores hechos con plástico ABS no son capaces de soportar grandes cantidades de peso, por lo que se requiere utilizar un material metálico, el cual no incrementará significativamente el peso total de la prótesis.

Por otra parte, se demuestra que el elemento Pie-Tobillo es un modelo viable ya que realiza la dorsiflexión gracias a las propiedades del material con el que fue creado, además de que estéticamente se le puede dar el volumen deseado y tiene la alineación anatómica óptima.

Por último, es necesario mencionar que el prototipo de prótesis transfemoral en las condiciones actuales no es una opción viable, ya que casi en su totalidad fue construido de material plástico, con la finalidad de que fuera ligero y de bajo costo, sin embargo el cambio de material en los conectores, permitirá tener una funcionalidad del 100% con un aumento ligero en el peso y en el costo.

Referencias

Andrews K.L, Nanos K.N. y Hoskin T.L. (2017). Determining K-levels Following Transtibial Amputation. *International Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, Vol. 5, No. 2, 1-4.

Cisneros-González, N, Ascencio-Montiel, I. J, Libreros-Bango, V. N, Rodríguez-Vázquez, H, Campos-Hernández, A, Dávila-Torres, J, Kumate-Rodríguez, J. y Hugo Borja-Aburto, V. (2016). Índice de amputaciones de extremidades inferiores en pacientes con diabetes. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, Vol. 54, Num. 4, 472-479.

Colciencias (2015). Guía de Práctica Clínica para el diagnóstico y tratamiento preoperatorio, intraoperatorio y postoperatorio de la persona amputada, la prescripción de la prótesis y la rehabilitación integral. 2015. Guía No. 55. Ministerio de Salud y Protección Social, Bogotá, Colombia. Disponible en: http://gpc.minsalud.gov.co/gpc_sites/Repositorio/Conv_637/GPC_amputacion/GPC_AMP_completa.pdf

Espinoza V, María José y García S, Daniela. (2014). Niveles de amputación en extremidades inferiores: repercusión en el futuro del paciente. *Revista Médica Clínica Las Condes*, Vol. 25, No. 2, 276-280.

CENETEC (2009). Rehabilitación del Paciente Adulto Amputado de Extremidad inferior por Diabetes Mellitus, en el segundo y tercer nivel de atención. Guía de Práctica Clínica. Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud. Disponible en <http://www.cenetec.salud.gob.mx/interior/gpc.html>

Gutiérrez-Carreño, A. R. (2014). Amputación de extremidades. ¿Van a la alza?. *Revista Mexicana de Angiología*, Vol. 42 Num. 3, 112-114.

Hernández Stengele, F. (2008). Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana. Tesis Licenciatura. Universidad de las Américas Puebla.

Näder, M. and Näder, H. G. (2003). Compendio de prótesis. Prótesis para miembro inferior. Berlin, Alemania: schiele & schon.

Nájera Castrejón, J. A. (2013). Diseño del control para una prótesis de rodilla tipo policéntrica. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México

Nordin, M and Frankel, V. (2001). Basic biomechanics of the musculoskeletal system. Lippincott Williams & Wilkins. Baltimore-USA.

Pérez Robles, B. A. (2014). Musicoterapia: escuchando el duelo de los pacientes amputados. Asociación Mexicana de Tanatología, A. C. Tesina de Diplomado.

Sánchez Lacuesta, J, Hoyos, J.V, Viosca, E, Soler Gracia, C, Comín, M, Lafuente, R, Cortés, A. y Vera, P. (2006) Biomecánica de la marcha humana normal y patológica. Valencia España: Instituto de Biomecánica de Valencia.

Tapia-Rangel, J.C, Ruiz-Mercado, H, Ochoa-González, F. J. y Hernández-Nieto, B. I. (2015). Proporción de incidencia de amputaciones en pacientes con lesiones de pie del diabético. Revisión de tres años en el Hospital Regional Dr. Valentín Gómez Farías en Zapopan, Jalisco. Revista Mexicana de Angiología, Vol. 43 Num. 1, 9 – 13.

Thomas Passero, A.S. (2014). Devising the Prosthetic Prescription and Typical Examples. Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America, Vol. 25, No. 1, 117-132.

Vázquez Vela, E. (2015). Acta de la sesión del 4 de marzo del 2015. Academia Nacional de Medicina. Obtenido de http://www.anmm.org.mx/actas2015/Acta_S004032015.pdf.

Instrucciones para Autores

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

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

(Indicar Fecha de Envio:Mes,Dia, Año); Aceptado(Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

Resumen

Titulo

Objetivos, metodología

Contribución

(150-200 palabras)

Abstract

Title

Objectives, methodology

Contribution

(150-200 words)

Keyword

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

Cita: Apellidos en Mayúsculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayusculas -2do Nombre de Autor. Titulo del Paper. Título de la Revista. 2015, 1-1: 1-11 – [Todo en Times New Roman No.10]

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Instrucciones para Autores

Introducción

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

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

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

Enfocar claramente cada una de sus características

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

Explicación de las secciones del artículo

Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente

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

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

Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

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

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

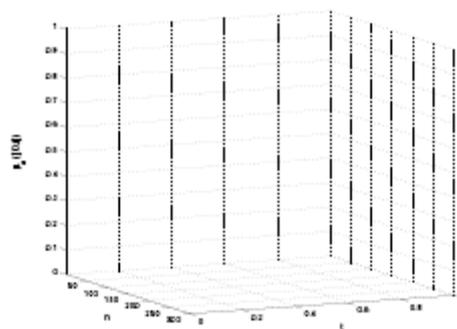


Grafico 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

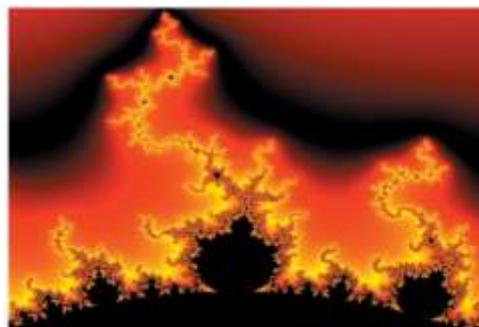


Figura 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

Tabla 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

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

Instrucciones para Autores

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

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

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

Metodología a desarrollar

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

Resultados

Los resultados deberán ser por sección del artículo.

Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

Agradecimiento

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

Conclusiones

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

Referencias

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

Ficha Técnica

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

Nombre de la Revista

Título del Artículo

Abstract

Keywords

Secciones del Artículo, por ejemplo:

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

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencia

Formato de Originalidad



Madrid, España a ____ de ____ del 20 ____

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

Artículo (Article):

Firma (Signature):

Nombre (Name)

Formato de Autorización



Madrid, España a ____ de ____ del 20 ____

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

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

Artículo (Article):

Firma (Signature)

Nombre (Name)

Revista del Desarrollo Tecnológico

“Síntesis de $\text{BiVO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ y evaluación de la actividad fotocatalítica en la degradación de azul de metileno”

SÁNCHEZ-ALBORES, Rocío Magdalena, PÉREZ-SARIÑANA, Bianca Yadira, CALDERÓN-BENAVIDES, Héctor Alfredo y PATHIYAMATTON-JOSEPH, Sebastian

*Universidad Politécnica de Chiapas
Escuela Superior de Física y Matemáticas
UNAM*

“Modelo de Innovación y Calidad para la industria del cartón, en el estado de Tabasco”

LÓPEZ-VALDIVIESO, Leticia, ELISEO-DANTES, Hortensia, CASTRO-DE LA CRUZ, Jucelly y FUENTES-LÓPEZ, Mayra Edilia

“Diseño, simulación y control de un sistema eólico”

LINARES-ENRIQUEZ, Alejandro y ROMERO-PASARÓN, Samuel
Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco

“Laboratorio virtual de robótica basado en Matlab®/Simulink®/RobotStudio”

LORETO-GÓMEZ, Gerardo, MORALES-MORFIN, Marcela, SÁNCHEZ-SUAREZ, Isahi y VÁZQUEZ-INFANTE, J. Jesús

*Instituto Tecnológico Superior de Uruapan
Universidad Politécnica de Uruapan*

“Diseño de un inversor de puente H con tecnología multinivel utilizando la técnica de Eliminación Selectiva de Armónicos”

BERNAL-GUERRERO, Erick, LÓPEZ-MONTEAGUDO, Francisco Eneldo y DE LA TORRE-Y RAMOS, Jorge

Universidad Autónoma de Zacatecas

“Estudio de los factores que inciden en el uso de combustible, en un corporativo nacional de transporte terrestre, para un modelo de mejora general”

ELISEO-DANTES, Hortensia, MADRIGAL-ELISEO, José Luis, CASTRO-DE LA CRUZ, Jucelly y DE LEÓN-DE LOS SANTOS, Brissa Roxana

“Prototipo funcional de prótesis transfemoral”

ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, Ervín Jesús, ALDANA-FRANCO, Rosario, LÓPEZ-VELÁZQUEZ, Andrés y ABURTO-MENESES, Armando

Universidad Veracruzana

