

RESERVA DE DERECHOS AL USO EXCLUSIVO DE TITULO No. 04-2018-070614032000-203

VIGENCIA 03/05/2018 A 03/05/2019

ACTUALIZACIÓN 01/01/2019

ISSN 2594-1925

a cargo de la FCITEC



RECIT

REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS

VOLUMEN 2 CAPÍTULO 2

ISSN: 2594-1925



FCITEC

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad Valle de las Palmas

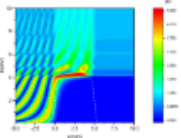
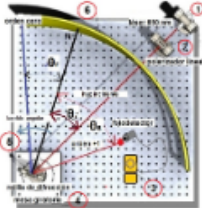
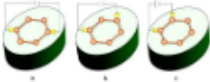
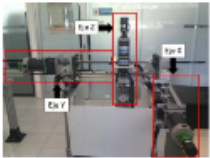
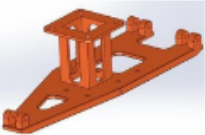
2019

Abril-Junio



Tabla de contenidos

Artículos de Investigación

	<p>Tunelaje Cuántico en Potenciales Graduales Cristian Gabriel Herbert Galarza, Rogelio Orozco Duarte, Roberto Romo Martínez</p>	<p>PDF 50-57</p>
	<p>Fabricación de un prototipo óptico para experimentos de interacción luz-materia Miguel Ángel Ponce-Camacho, Jorge Alberto Villavicencio Aguilar, Roberto Romo Martínez</p>	<p>PDF 58-65</p>
	<p>Transporte electrónico a través de moléculas orgánicas Luis Germán Morales Valenzuela, Priscilla Elizabeth Iglesias Vázquez, Ruben Cesar Villarreal Sánchez</p>	<p>PDF 66-70</p>
	<p>Tarjeta para controlar 3 grados de libertad de robots vía wifi José de Jesús Moya Mora, Sergio Vergara Limón, José Fernando Reyes Cortes</p>	<p>PDF 71-79</p>
	<p>Automatización en la carga de material de fundición en una línea de maquinado Mario Hernández Núñez, Francisco Javier Barraza Navarro</p>	<p>PDF 80-91</p>



Tunelaje Cuántico en Potenciales Graduales

Quantum Tunneling in Gradual Potentials

Herbert Galarza Cristian Gabriel , Orozco Duarte Rogelio , Roberto Romo Martínez 

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California. Apartado Postal 1880, 22800
Ensenada, México.

Autor de correspondencia: Romo Martínez Roberto, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California. Apartado Postal 1880, 22800 Ensenada, México. E-mail: romo@uabc.edu.mx.
ORCID: 0000-0002-9278-1013.

Recibido: 25 de septiembre del 2018 **Aceptado:** 06 de febrero del 2019 **Publicado:** 25 de abril del 2019

Resumen. - *Uno de los fenómenos paradigmáticos de la mecánica cuántica es sin duda el llamado efecto túnel, el cual se manifiesta como la posibilidad que tienen las partículas en la escala nanométrica de atravesar barreras de potencial. Este fenómeno, a pesar de ser poco intuitivo, es tan real que juega un papel prominente en la tecnología de nuestros tiempos y constituye el mecanismo dominante del transporte electrónico en nuevos conceptos de dispositivos nanoelectrónicos. En este trabajo se ilustra mediante mapas de la densidad electrónica, la distribución espacial y energética de los electrones que se propagan a través de barreras de potencial graduales, visualizando la naturaleza ondulatoria de los electrones y el fenómeno de tunelaje. En particular, se discute el efecto de utilizar barreras graduales en lugar de barreras rectangulares.*

Palabras clave: Efecto túnel; Tunelaje cuántico; Barreras graduales.

Abstract. - *One of the paradigmatic phenomena of quantum mechanics is undoubtedly the so-called tunnel effect, which manifests itself as the possibility of particles on the nanometer scale to traverse potential barriers. This phenomenon, although unintuitive, is so real that it plays a prominent role in current technology and constitutes the key mechanism of electronic transport in novel concepts of nanoelectronic devices. In this work, maps of electron density are used to illustrate the spatial and energetic distribution of electrons that propagates through gradual potential barriers, visualizing the wave nature of the electrons and the tunneling phenomenon. In particular, the effect of using gradual barriers rather than rectangular barriers is discussed.*

Keywords: Tunnel effect; Quantum tunneling; Smooth barriers.



1. Introducción

Los notables avances de las últimas décadas en las técnicas para explorar y manipular la materia a escalas nanométricas, ha traído como consecuencia nuevos conceptos de dispositivos electrónicos basados en efectos cuánticos [1]. Desde el trabajo seminal de Leo Esaki (Premio Nobel de Física) y colaboradores [2] se concibe tanto teórica como experimentalmente la posibilidad de diseñar y fabricar estructuras cuánticas artificiales en la escala nanométrica [3].

En estos sistemas, conocidos con el nombre genérico de *nanoestructuras* [4], el control del transporte de electrones resulta un aspecto crucial para aplicaciones tecnológicas [5]. En este contexto, se entiende por transporte electrónico, cualquier desplazamiento espacial de las densidades de probabilidad electrónica, ya sea de un sitio a otro dentro del sistema, o a través de éste. En todos estos procesos, el mecanismo dominante es el llamado *efecto túnel* o *tunelaje cuántico*.

Se trata de uno de los fenómenos más fascinantes y sorprendentes de la mecánica cuántica, el cual se refiere a la posibilidad que tienen las partículas pequeñas de atravesar “paredes” o regiones prohibidas por la física clásica. Esta propiedad de las partículas cuánticas no sólo rige el comportamiento de diversos fenómenos en la naturaleza, como los son, el decaimiento de núcleos radiactivos, el fenómeno de la emisión en frío, y los procesos de fusión en los núcleos de las estrellas [6], por mencionar algunos, sino que también ha sido el motor de grandes desarrollos tecnológicos, como el microscopio electrónico de barrido, diodo de tunelaje resonante, y una amplia variedad de componentes electrónicas que podemos encontrar en la mayoría de los dispositivos que nos rodean.

El tunelaje cuántico, al igual que otros fenómenos de la física cuántica son representados por

cantidades matemáticas complejas y no son fáciles de visualizar de manera simple. En este trabajo se tiene como propósito mostrar mediante representaciones gráficas que faciliten la visualización del tunelaje cuántico, los fenómenos básicos que ocurren en estructuras de barreras y pozos de potencial. Los ejemplos seleccionados permiten exhibir de manera clara la naturaleza ondulatoria del electrón al interactuar con barreras y pozos, distinguir entre el *tunelaje* y el *tunelaje resonante*, observar las regiones en las cuales es más probable encontrar al electrón, mostrar cómo pueden ser atrapados tanto por pozos como por barreras de potencial.

2. Metodología

La ecuación que rige el comportamiento del electrón en un medio descrito por un potencial $V(x)$ es la ecuación de Schrödinger,

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V(x)\psi(x) = E\psi(x), \quad (1)$$

donde \hbar es la constante de Planck, m es la *masa efectiva* del electrón [7] y E su energía total. Esta ecuación se puede resolver analíticamente en un reducido número de potenciales $V(x)$, entre ellos tenemos por ejemplo los potenciales constantes por tramos (con perfiles abruptos como barreras y pozos rectangulares).

En el presente estudio se pretende estudiar tanto potenciales rectangulares como casos con potenciales no abruptos cuyos perfiles varíen gradualmente con la posición.

Estos últimos en general son extremadamente difíciles de resolver (si es que no imposibles) excepto en casos excepcionales (como el oscilador armónico y otros potenciales especiales), por lo que se requiere hacer algo para eludir esta dificultad técnica. Lo que se hará en el presente estudio es utilizar la *aproximación de escalón* en



el potencial $V(x)$, la cual se ilustra en la figura 1, y consiste en remplazar el potencial suave por un potencial escalonado.

Como el potencial escalonado toma valores constantes en cada subintervalo de la partición del intervalo $[a, b]$, la ecuación (1) tendría soluciones analíticas en cada escalón, las cuales, en el n -ésimo escalón, son combinaciones de exponenciales de la forma

$$\psi_n(x) = \alpha_n e^{ikx} + \beta_n e^{-ikx}, \quad (2)$$

donde $k = \sqrt{E - V(x)}/\hbar$, y puede ser real o imaginario. Los coeficientes α_n y β_n son constantes arbitrarias complejas, cuyos valores se pueden determinar aplicando las condiciones de frontera, las cuales consisten en que $\psi_n(x)$ y su derivada sean continuas en cada salto entre escalones consecutivos. Si $V(x)$ tiene una forma arbitraria en un cierto intervalo finito $a \leq x \leq b$, y es igual a cero para $x < a$ y $x > b$, las funciones de onda a la izquierda y a la derecha se pueden escribir respectivamente como

$$\psi_0(x) = e^{ikx} + r e^{-ikx} \quad (3)$$

y

$$\psi_{N+1}(x) = t e^{ikx}, \quad (4)$$

donde r es la amplitud de reflexión y t la de transmisión considerando la incidencia por la izquierda con amplitud uno. Al aplicar las condiciones de frontera se obtienen relaciones matriciales entre los coeficientes de escalones consecutivos,

$$\begin{bmatrix} \alpha_n \\ \beta_n \end{bmatrix} = A_n \begin{bmatrix} \alpha_{n-1} \\ \beta_{n-1} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Si se tienen N puntos de discontinuidad (*i.e.*, $N - 1$ escalones), la matriz que relaciona los coeficientes de la derecha con los de la izquierda es la *matriz de transferencia* del sistema, la cual es un producto iterado de matrices A_n , $M =$

$A_N A_{N-1} \cdots A_2 A_1$. Dicha relación matricial queda en la forma

$$\begin{bmatrix} \alpha_N \\ \beta_N \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \beta_0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

donde $\alpha_0 = 1$, $\beta_0 = r$, $\alpha_N = t$, $\beta_N = 0$, siendo r y t las amplitudes de reflexión y de transmisión respectivamente, las cuales están dadas por

$$r = -\frac{m_{21}}{m_{22}}, \quad (7)$$

$$t = \frac{\det(M)}{m_{22}}, \quad (8)$$

donde m_{ij} son elementos de la matriz M .

Obteniendo los coeficientes r y t , es posible encontrar todas las constantes α_n y β_n en cada escalón, y utilizando recursivamente la ecuación (5) podemos obtener la función de onda electrónica $\psi_n(x, E)$ en cada escalón del potencial.

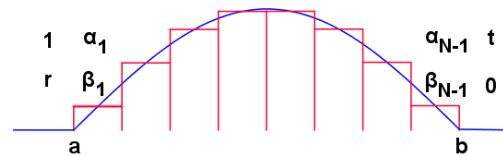


Figura 1. Aproximación de escalón para un potencial arbitrario. El número N se puede incrementar hasta obtener la precisión deseada.

3. Resultados

En esta sección se obtendrán mapas de la *densidad de probabilidad* $|\psi_n(x, E)|^2$ en el espacio de las posiciones y energías. Esta representación gráfica puede considerarse una *densidad local de estados* (DLE), ya que proporciona la localización espacial de los estados cuánticos del sistema. Se calculará para potenciales de barreras rectangulares y para potenciales de perfiles suaves, para visualizar los fenómenos del transporte electrónico mediante el tunelaje cuántico.



a. Barreras rectangulares

En la figura 2 se muestran mapas de DLE para dos barreras rectangulares, una alta y estrecha en la parte (a) y otra baja y ancha en la parte (b), sus correspondientes parámetros se indican en el pie de figura.

Observando el mapa de contorno de la figura 2 (a), lo más llamativo es sin duda el patrón de franjas que se encuentra a la izquierda de la barrera, alternando entre los colores amarillo y azul intenso. Estas son franjas de interferencia, las cuales permiten visualizar con claridad la naturaleza ondulatoria del electrón.

En esta región, de acuerdo a la ecuación (3), la función de onda electrónica es una combinación de dos términos exponenciales, la onda incidente e^{ikx} y la onda reflejada re^{-ikx} , cuya interferencia produce una onda estacionaria que se manifiesta como el patrón de franjas observado en la figura mencionada. Se puede apreciar que parte de las franjas invade la región izquierda de la barrera. De acuerdo a la mecánica clásica, ésta es una región prohibida para partículas materiales. Sin embargo, aquí se aprecia visualmente en este ejemplo que en la mecánica cuántica existe probabilidad de que el electrón se encuentre en la región de la barrera. Este efecto cuántico se conoce como el *fenómeno de penetración de barrera*, y queda exhibido muy claramente en esta representación gráfica.

A la derecha de la barrera, en lugar de una estructura de franjas aparece un fondo azul constante. La ausencia de franjas en esta región se debe a que la onda transmitida, dada por la ecuación (4), consta de sólo un término exponencial, de tal forma que, al tomar el módulo cuadrado de la función de onda transmitida, en lugar de interferencia, se obtiene para cada energía E un valor constante de la DLE, igual a $|t(k)|^2$, o sea, al coeficiente de transmisión.

Por otro lado, a energías de incidencia por encima de la barrera se observan cosas diferentes. En la figura 2 (a) se observa que en aproximadamente $E = 25 \text{ eV}$, una línea horizontal corta las franjas de interferencia que se encuentran en la región izquierda. Se trata de una condición de *resonancia* en la cual la probabilidad de transmisión se incrementa a su valor máximo (que es la unidad) a una energía específica llamada *energía de resonancia*. Para mayor claridad del efecto, se incluye en el mapa de contorno una curva de nivel de valor 0.98, intencionalmente muy cercano a la unidad (línea sólida).

La franja de la resonancia se prolonga hasta la parte derecha de la barrera en donde se aprecia un camino entre dos líneas paralelas definidas por la curva de nivel, un camino por el cual se transmiten los electrones de izquierda a derecha con probabilidad del orden de uno. La razón por la cual las franjas de interferencia del lado izquierdo “se borran” a la energía de resonancia, es porque cuando la transmisión es total, la reflexión es cero, $r = 0$.

En consecuencia, de acuerdo a la ecuación (3), sólo sobrevive uno de los dos términos exponenciales y por lo tanto no habrá interferencia a esa energía, y sin interferencia no hay franjas.

Otro detalle que se aprecia en la gráfica de la figura 2 (a) es una mancha roja intensa entre el borde de la barrera y la energía de resonancia. Esto muestra una acumulación de la densidad de probabilidad que indica que ahí la probabilidad de encontrar al electrón es más alta que en cualquier otro lugar.

Como la mancha roja se extiende en un rango de energías que incluye la resonancia y también energías fuera de resonancia, significa que de los electrones que acumulan ahí, algunos se transmiten a derecha con alta probabilidad, y otros se reflejan. Es interesante el hecho de que aún a energías superiores a la altura de la barrera ocurra reflexión.



Considérese ahora la barrera más ancha y de menor altura de la figura 2 (b). Se puede notar en el mapa de contorno que aparecen resonancias adicionales, todas ellas a energías arriba de la altura de la barrera.

La curva de nivel que se incluye es también de valor 0.98 (líneas sólidas) y exhibe con claridad las posiciones de dichas resonancias. A esas energías la transmisión alcanza valores máximos, los cuales se manifiestan como picos unitarios en la gráfica del coeficiente de transmisión, como podemos apreciarlo en la figura 2 (c).

Las regiones donde es más probable encontrar al electrón vemos que son diferentes a las del caso anterior en donde sólo se apreciaba una mancha roja, ahora vemos que estas manchas se distribuyen en la parte superior de la barrera, alineadas con las resonancias. Esto significa que los electrones que se transmiten con probabilidad alta a las energías de resonancia quedan atrapados momentáneamente por la barrera formando estados resonantes localizados en las regiones rojizas de la gráfica.

A pesar de tratarse de una barrera (potencial repulsivo), ésta tiene la posibilidad de atrapar electrones en los estados cuasi-ligados que se forman en la parte superior de la barrera. Esto no sucede en el mundo clásico con partículas macroscópicas, se trata de un efecto netamente cuántica.

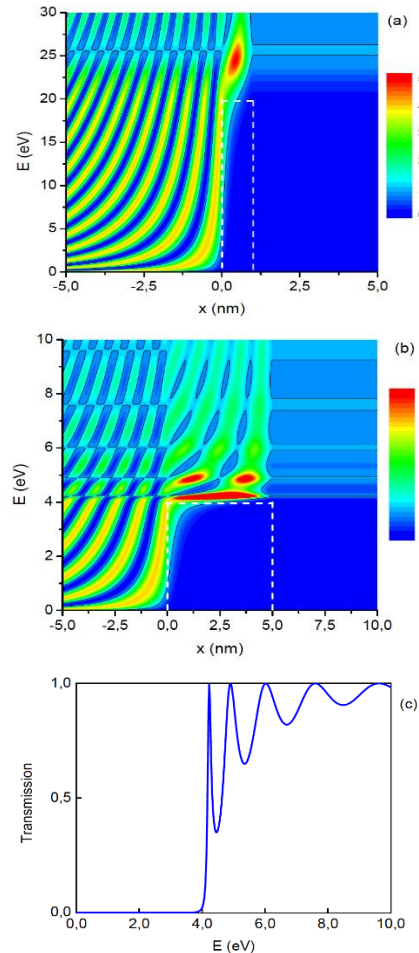


Figura 2. Mapas de la DLE para un potencial de una barrera rectangular de (a) altura $V=20$ eV, anchura $b=1.0$ nm, y (b) altura $V=4$ eV y anchura $b=5.0$ nm. Ambas barreras tienen la misma área (20 eV nm) y se muestran superpuestas sobre las gráficas (líneas claras discontinuas). Se indica en cada mapa una curva de nivel de valor 0.98 (líneas sólidas negras) (c). Coeficiente de transmisión para la barrera del caso (b).

3.2 Barreras graduales

Para analizar casos de barreras de potencial de perfiles suaves y sin discontinuidades abruptas como los potenciales de la subsección anterior, a continuación, se escoge una barrera en la que, por medio de la variación de un parámetro, podamos suavizar gradualmente una barrera rectangular abrupta hasta deformarla a un grado deseado. Esta posibilidad la ofrece la barrera de potencial con el perfil dado por la fórmula siguiente,



$$V(x) = 2 - 0.5V \tanh\left(\frac{|x - 0.5b| - 0.5b}{s}\right) \quad (9)$$

El parámetro de suavización aquí es s y posee unidades de distancia, el cual se expresa aquí en unidades de la anchura b de la barrera. Se usan los parámetros siguientes, $b = 5.0$ nm y $V = 4.0$ eV. Cuando s es muy pequeño, la barrera es similar a la barrera rectangular de la figura 2 (b), y conforme s se incrementa, las partes abruptas de la barrera se suavizan gradualmente. Como se trata de potenciales graduales, se utiliza la aproximación de escalón descrita en la figura 1. En éste y en los restantes ejemplos se usará $N = 200$. Para un grado de suavización pequeño con valor $s=0.05b$, en la figura 3 (a) se muestra el correspondiente mapa de DLE, donde se incluye el perfil de potencial superpuesto sobre la gráfica (líneas claras discontinuas). Como puede apreciarse, la barrera es aún algo abrupta, y por ende el mapa de DLE es muy parecido al de la figura 2 (b) de la barrera rectangular. Al incrementar el valor del parámetro a $s=0.1b$, la DLE empieza a experimentar cambios importantes como se nota en la figura 3 (b).

Desaparecen algunas curvas de nivel a la derecha de la barrera, lo cual indica que los valles entre los picos de resonancia empiezan a elevarse y acercarse a la unidad, tendiendo a desaparecer los picos de resonancia. En la figura 3 (c) el parámetro s se incrementó al valor de $0.2b$, y se ve claramente que la estructura de resonancias desaparece por completo, dando como resultado un mapa muy diferente al de la barrera rectangular inicial mostrado en la figura 2 (b), el cual exhibe mancha roja alargada en la parte izquierda de la barrera, mostrando la región de mayor densidad de probabilidad electrónica. Se trata de principalmente de electrones de reflexión, los cuales inciden en la barrera, penetran un poco en ella como se alcanza a apreciar, y se reflejan formando el patrón de franjas de interferencia a la izquierda de la barrera. La comparación de los

resultados con barreras abruptas vs barreras suaves nos muestra una diferencia dramática tanto en el mapa de DLE y sugiere que la suavidad del potencial de alguna manera inhibe la formación de las resonancias.

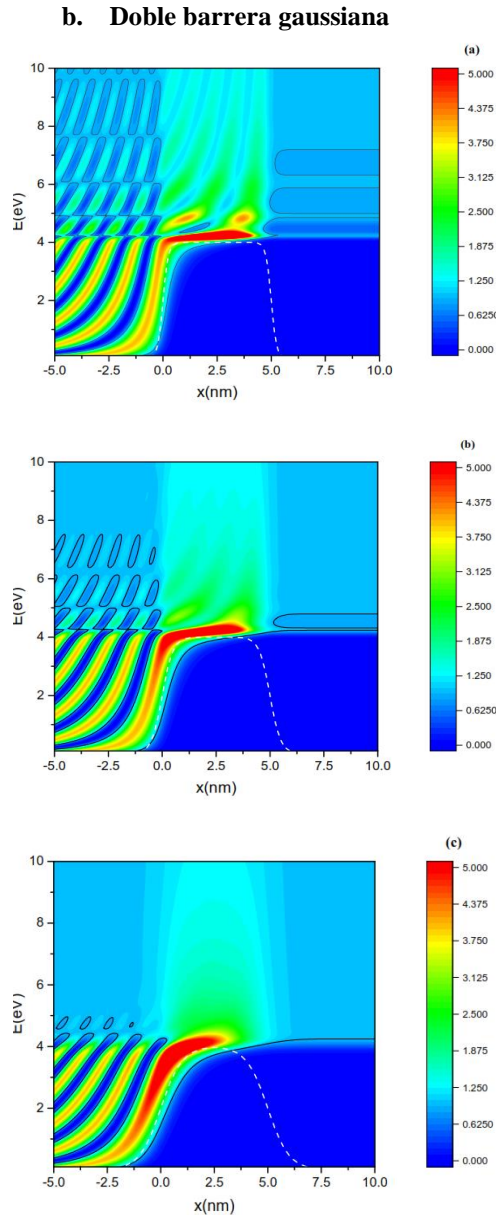


Figura 3. Mapas de la DLE para una barrera de potencial rectangular deformada, dada por la fórmula (9), para: (a) $s=0.05b$, (b) $s=0.1b$, y (c) (a) $s=0.2b$. En cada caso se indica una curva de nivel de valor 0.98 (líneas sólidas).



Considérese ahora la situación en la que el electrón incide en un sistema de doble barrera. El potencial que se escoge es una barrera gaussiana deformada en el centro por un potencial parabólico, la parte parabólica forma un pozo cuántico justo en el centro de la barrera. El potencial $V(x)$ está dado por la expresión

$$V(x) = V_0(x - 2.5)^2 e^{-\frac{\alpha(x-2.5)^2}{b_0^2}}, \quad (10)$$

donde $V_0 = 1/175 \text{ eV}$, $b_0 = 5.0 \text{ nm}$ y $\alpha = 2.772588$. El mapa de contorno de la DLE para este sistema se muestra en la figura 4 (a), en donde se superpone la gráfica de este potencial (líneas claras discontinuas). La principal diferencia que se observa respecto a los potenciales de una sola barrera es que en este caso aparecen regiones con alta probabilidad de hallar al electrón a energías menores que la altura de las barreras en la región del pozo de potencial. Estas regiones de alta densidad de probabilidad no se encuentran a cualquier energía, ocurren a energías específicas que son las resonancias del sistema.

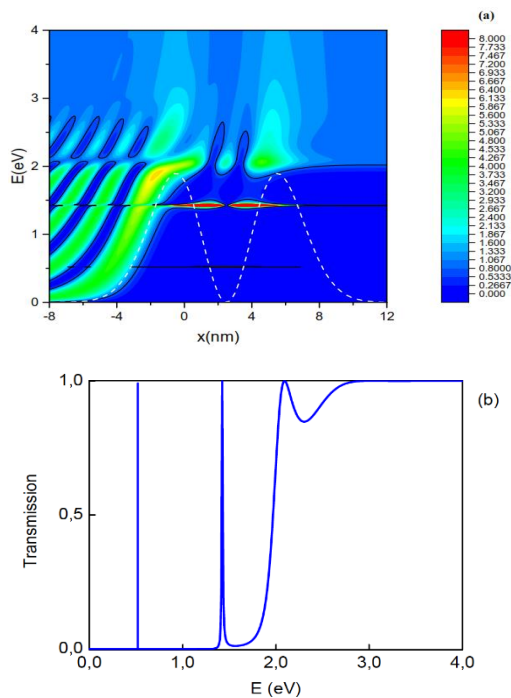


Figura 4. Mapa de la DLE para un potencial de doble barrera gaussiana, dada por la ecuación (10). Se indica

una curva de nivel de valor 0.95 (líneas sólidas) (b) Coeficiente de transmisión para la doble barrera gaussiana (a).

4. Conclusiones

Se realizó un estudio visual del tunelaje cuántico en perfiles de potencial de formas geométricas abruptas (barreras rectangulares), de formas geométricas suaves (barreras rectangulares deformadas gradualmente). Mediante mapas visuales de densidad local de estados, se exhibió la naturaleza ondulatoria del electrón y sus efectos, tales como la interferencia, penetración de barrera, efecto túnel, el fenómeno de resonancia, y la localización espacial en los estados resonantes. Se estudió también el tunelaje resonante en una estructura de doble barrera gaussiana con pozo parabólico, mostrando a localización de los estados electrónicos del pozo y exhibiendo las resonancias del sistema, las cuales son relevantes en aplicaciones tecnológicas para el desarrollo de dispositivos electrónicos de alta velocidad, en donde el ejemplo prominente es el llamado *diodo de tunelaje resonante* [8].

La relevancia de este tipo de estudios, además de facilitar la enseñanza de la física mediante la visualización de los fenómenos en un área tan compleja como es la mecánica cuántica, permite apreciar las diferencias entre las distribuciones electrónicas de potenciales abruptos y potenciales suaves. Las técnicas experimentales que se utilizan para construir estructuras cuánticas de barreras y pozos de potencial, tales como la MBE (*Molecular Beam Epitaxy*) son tan precisas que pueden depositar capas de materiales semiconductores del orden de nanómetros de espesor, lo cual corresponde a barreras rectangulares. Sin embargo, los posibles defectos en el depósito de capas pueden dar lugar a barreras deformadas. Otras causas de deformación en los potenciales pueden surgir por ejemplo de la aplicación de un campo eléctrico externo, o por ejemplo el fenómeno de *acumulación de carga*, el cual produce un campo eléctrico propio que



deforma el potencial, de ahí la importancia de estudiar los efectos de deformaciones en los potenciales. Consideramos que estos resultados inciden tanto en el ámbito de la facilitación de la enseñanza de la física como en la investigación básica del tunelaje en estructuras semiconductoras nanométricas.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido del proyecto de la 18va Convocatoria Interna de Apoyo a Proyectos de Investigación FC-UABC 400/1/C/110/18.

Referencias

- [1] R. Waser. *Nanoelectronics and Information Technology*. 2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany. <https://www.wiley.com/en-us/Nanoelectronics+and+Information+Technology+%3A+Advanced+Electronic+Materials+and+Novel+Devices%2C+3rd+Edition-p-9783527409273>
- [2] L. Esaki and R. Tsu, "Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors," *IBM J. Res. Develop.* vol. 14, pp. 61-65, 1970. <https://doi.org/10.1147/rd.141.0061>
- [3] R. Tsu and L. Esaki. 1973. "Tunneling in a finite superlattice," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, pp. 562, 1973. <https://doi.org/10.1063/1.1654509>
- [4] J. M. Chamberlain, L. Eaves and J.C. Portal, *Electron Properties of Multilayers and Low-Dimensional Semiconductor Structures*. NY: Ed. Plenum Press, 1990, L. Esaki, The evolution of semiconductor quantum structures in reduced dimensionality. Do-it-yourself quantum mechanics, pp. 124. <https://arxiv.org/pdf/1007.5386>
- [5] D. K. Ferry, S. M. Goodnick and J. Bird. *Transport in nanostructures*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1997, pp. 91-121. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511840463>
- [6] C. Weisbuch and B. Vinter. *Quantum Semiconductor Structures: Fundamentals and Applications*. Inc. San Diego, California, USA: Academic Press, 1991, pp. 189-215. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051557-1.50010-X>
- [7] S. Mandrà, S. Valleau and M. Ceotto. "Deep Nuclear Resonant Tunneling Thermal Rate Constant Calculations," *Int. J. Quantum Chem. J.*, vol. 113, pp. 1722-1734, 2013. <https://doi.org/10.1002/qua.24395>
- [8] C. Grossert, M. Leder, S. Denisov, P. Hänggi, and M. Weitz, "Experimental control of transport resonances in a coherent quantum rocking ratchet," *Nat. Commun.*, vol. 7, no. 1, p. 10440, 2016. <https://doi.org/10.1038/ncomms10440>
- [9] T.J. Slight and C.N. Ironside. "Investigation into the Integration of a Resonant Tunneling Diode and an Optical Communications Laser: Model and Experiment". *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. 43, no. 7, pp. 580, 2007. <https://doi.org/10.1109/JQE.2007.898847>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir—copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento—remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



Fabricación de un prototipo óptico para experimentos de interacción luz-materia

Manufacture of an optical prototype for light-matter interaction experiments

Ponce-Camacho Miguel Ángel ¹, Villavicencio Aguilar Jorge Alberto ², Romo Martínez Roberto ²

¹CETYS Universidad, Campus Mexicali, Escuela de Ingeniería, Calzada CETYS s/n, fraccionamiento Rivera, C. P. 21259, Mexicali, Baja California, México.

²Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias. Carretera Trans-peninsular Ensenada-Tijuana 3917, Fracc. Playitas, C. P. 22860 Ensenada, Baja California, México.

Autor de correspondencia: Ponce-Camacho Miguel Ángel, CETYS Universidad, Campus Mexicali, Escuela de Ingeniería, Calzada CETYS s/n, fraccionamiento Rivera, C. P. 21259, Mexicali, Baja California, México, miguel.ponce@cetys.mx. ORCID: 0000-0002-3320-1277.

Recibido: 30 de Noviembre del 2019 **Aceptado:** 06 de Febrero del 2019 **Publicado:** 30 de Abril del 2019

Resumen. - *Se fabricó un prototipo óptico para realizar mediciones de plasmones polaritones de superficie en haces de luz difractados a ángulos menores a 90°. Se elaboraron experimentos para identificar el ángulo resonante de excitación de plasmones polaritones de superficie mediante una rejilla de difracción con un periodo espacial mayor a la longitud de la onda de la señal de luz. En los ensayos realizados en laboratorio se llevaron a cabo mediciones de la curva de intensidad de la señal de luz difractada en los órdenes +1 y -1. Los resultados experimentales fueron consistentes con lo planteado teóricamente. En virtud de lo anterior, se concluye que es posible excitar plasmones polaritones de superficie, utilizando la técnica de la rejilla de difracción metálica con una longitud de onda menor al periodo espacial de la rejilla. El prototipo óptico logrado resulta ser muy flexible para futuras aplicaciones en la medición de plasmones. Lo anterior es posible gracias a la rapidez con la que se pueden modificar las monturas y sus ensamblajes para la alineación de los elementos ópticos: diodo láser, superficie rugosa metálica, polarizador lineal. Así mismo, el control absoluto en el aparato del ángulo de incidencia, y la facilidad para intercambiar la fuente de luz y la superficie rugosa metálica, abren amplias posibilidades para probar nuevas hipótesis para las condiciones de excitación de plasmones polaritones de superficie.*

Palabras clave: Plasmon polaritón de superficie; Manufactura aditiva; Nanotecnología.

Abstract. - *An optical prototype was fabricated to perform measurements of surface plasmon polaritons in light beams diffracted at angles of less than 90°. Experiments were developed to identify the excitation resonant angle of surface polariton plasmons by a diffraction grating with a pitch greater than the wavelength of the light signal. In the laboratory tests, measurements of the intensity curve of the diffracted light signal were carried out in the +1 and -1 orders. The experimental results were consistent with the theoretical approach. Based on the above, it is concluded that it is possible to excite surface plasmon polaritons, using the technique of the metallic diffraction grating with a wavelength shorter than the space frequency of the grid. The achieved optical prototype turns out to be very flexible for future applications in the measurement of plasmons. This is possible thanks to the speed at which it is possible to modify the frames and their assemblies for the alignment of the optical elements: laser diode, rugged metallic surface, linear polarizer. Likewise, the absolute control in the incident angle apparatus, and the ease of exchanging the light source and the rough metal surface, open wide possibilities for testing new hypotheses for the excitation conditions of surface plasmon polaritons.*

Keywords: Surface Plasmon polaritons; Additive manufacturing; Nanotechnology.



1. Introducción

Los notables avances de las últimas décadas en las técnicas para explorar y manipular la materia a escalas nanométricas han traído como consecuencia nuevos conceptos de dispositivos nanoelectrónicos y nanofotónicos con una amplia variedad de aplicaciones [1, 2, 3]. La integración a gran escala de dispositivos semiconductores para la fabricación de circuitos integrados ha alcanzado tal grado de miniaturización que las dimensiones comienzan a cobrar importancia fundamental en los fenómenos asociados a la interacción luz-materia [4]. La Ley de Moore establece que el número de transistores en un chip se duplica cada 18 meses [5], de tal suerte que en nuestros tiempos la tecnología de integración de transistores ha pasado de micrómetros a decenas de nanómetros. A estas escalas, sin embargo, los electrones dejan de comportarse como partículas y comienzan a comportarse como ondas, razón por la cual las tecnologías utilizadas se encuentran en una fase de cambio, ya que es necesario entender los fenómenos que se presentan en la interacción luz-materia en la nanoescala. Ante los nuevos retos de investigación tanto básica como aplicada, se prevé el inicio de nuevas tecnologías, como la nanoelectrónica [5] y la nanofotónica. Algunos autores afirman que nos encontramos iniciando la era de los dispositivos nanofotónicos integrados [1-4], con elementos de dimensiones comparables a la longitud de onda de la luz, involucrando nanoestructuras metálicas y composiciones metal-dieléctrico. Se trata de nuevas tecnologías donde el elemento portador de la información no necesariamente es el electrón como en los dispositivos electrónicos convencionales. Una de las tecnologías que se vislumbra como promesa para avanzar en la miniaturización de los dispositivos es la plasmónica. En esta tecnología el nuevo elemento portador de la información es el llamado *plasmón polaritón de superficie* (PPS).

Esta nueva tecnología se basa en las propiedades de unas cuasi-partículas conocidas como plasmones, las cuales se desplazan en dos dimensiones a velocidades cercanas a la de la luz. Una de las principales aplicaciones de esta tecnología se encuentra en el diseño de circuitos que podrían operar a frecuencias más altas que las permitidas por los dispositivos electrónicos más veloces, con la ventaja de que un circuito plasmónico al estar confinado en una superficie metálica, podría funcionar híbridamente, alternando señales ópticas y electrónicas.

Otra de las aplicaciones importantes de la plasmónica es el diseño de sensores. Esto debido a la alta sensibilidad en la respuesta de la intensidad en la señal de la luz al inducir PPS. Estos dispositivos ya en uso pueden detectar en tiempo real pequeñísimas variaciones en el índice de refracción de muestras biológicas (dieléctrico), por lo que tienen un considerable potencial en la exactitud de mediciones en pruebas clínicas, tales como enfermedades originadas por virus y bacterias, en contraste con los largos tiempos de respuesta en las pruebas biológicas tradicionales.

Dentro del campo de la plasmónica son conocidas varias técnicas para inducir la excitación de PPS. Las configuraciones de Otto (1968) y Kretschmann y Raether (1968) han sido descritas ampliamente [6, 7] en la literatura especializada. Sin embargo, ambas configuraciones requieren el uso de un prisma con requerimientos precisos de alineación óptica, condición que las convierte en métodos poco viables para su miniaturización e integración. Una tercera opción para alcanzar la resonancia de PPS lo constituye el uso de rejillas de difracción metálicas [7] en contacto con superficies dieléctricas. Esta opción se considera como una alternativa económica y técnicamente ventajosa en el camino a las



aplicaciones industriales exitosas. Usualmente se utilizan fuentes de luz con longitudes de onda mayores que el periodo espacial de la rejilla [2]. Esto implica que toda la energía luminosa de los órdenes difractados se acople a la intercara de la superficie, haciendo la técnica potencialmente viable para aplicaciones en el diseño de circuitos plasmónicos. Esta consideración en el experimento de excitación de plasmones no es necesaria en otras aplicaciones. Como, por ejemplo, en el sistema óptico de un sensor basado en PPS. En tal sistema óptico se debe permitir la medición de la curva de la intensidad de la señal de luz reflejada. Así, utilizando las configuraciones de Otto (1968) y Kretschmann y Raether (1968), con el método de la rejilla, es posible eliminar las técnicas costosas requeridas para su fabricación (interferometría, microscopía electrónica de barrido), tanto como la necesidad de equipo de un alto costo para realizar las mediciones de la intensidad de la señal de luz en la intercara de la superficie.

En el presente trabajo se utiliza el método de la rejilla de difracción para inducir plasmones polaritones de superficie, con una variación a las condiciones técnicas del experimento: El periodo espacial de la rejilla es mayor a la longitud de la onda de la señal de luz utilizada en el sistema óptico experimental. En el diseño del aparato se utilizan ensamblajes de monturas diseñadas y fabricadas mediante impresión 3D, que resultan muy prácticas para fijar y alinear las componentes del sistema óptico.

2. Metodología

Se construyó un prototipo óptico flexible para realizar experimentos de mediciones de plasmones polaritones de superficie utilizando rejillas de difracción metálicas en contacto con un medio dieléctrico. En la sección 2.1 se presenta la descripción detallada del prototipo óptico, y en la sección 2.2, como parte de la metodología para el análisis teórico, se presentan las ecuaciones

importantes y los cálculos numéricos relevantes al experimento.

2.1. Sistema óptico para excitación de PPS por el método de la rejilla de difracción metálica.

La rejilla de difracción utilizada posee un perfil rectangular de 1200 líneas/mm, sobre la cual se hace incidir luz monocromática que consiste de un diodo láser con longitud de onda de $\lambda_0 = 650 \text{ nm}$. En la figura 1 se muestra un diagrama de la rejilla de difracción en donde se observan los rayos incidente, transmitido y reflejado. La rejilla se coloca sobre una superficie de vidrio de $30 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, con lo cual se tiene una rejilla de difracción metálica con una frontera dieléctrica, en donde es posible, mediante variaciones apropiadas de las variables del experimento, lograr la condición de resonancia mediante la sintonización del vector de onda del plasmón-polaritón, k_{pps} , el cual está dado por la ecuación (2).

$$k_{pps} = n_a k_o \sin \theta_i + n k_g. \quad (1)$$

donde el ángulo de incidencia de un haz de luz con polarización p puede tomar valores en $0 \leq \theta_i \leq \pi/2$.

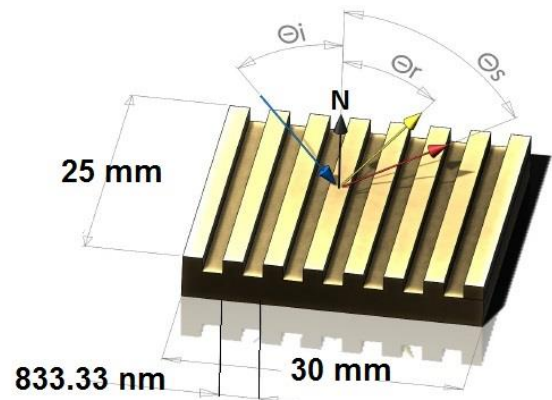


Figura 1. Diagrama de la rejilla de difracción de oro con perfil rectangular y 1200 líneas por milímetro ($\Lambda=833.33\text{nm}$) utilizada en los experimentos para inducir resonancia de PPS.



En la figura 2 se muestra el diagrama esquemático del arreglo experimental utilizado para inducir resonancia de PPS. La flexibilidad de este sistema permite medir los ángulos de los órdenes difractados en el campo lejano fuera de la frontera de la superficie metálica, aún en condiciones donde $\Lambda > \lambda_0$. El prototipo está compuesto por un diodo láser (1), un polarizador lineal (2), un sistema de foto detección (3), una plataforma giratoria de precisión (4), y una rejilla de difracción de oro (5) cuyos detalles se han mostrado en la figura 1.

El diodo láser, la rejilla de difracción y el polarizador lineal se encuentran posicionados en ensambles de monturas diseñadas en *Solidworks* y fabricadas mediante impresión 3D. Dichos ensambles poseen tres grados de libertad para facilitar su alineación óptica [8]. Obsérvese sobre la mesa de pruebas de la figura 2, que el diodo láser (1) y el polarizador lineal (2) permiten iluminar la rejilla con una señal de luz con polarización p paralela al plano de incidencia. La rejilla se encuentra montada en la plataforma de rotación, que al girar permite variar los ángulos del haz de luz incidente proveniente del láser (1), del cual depende directamente el valor del vector de onda k_{pps} , a través de la ecuación (1). La línea color negro es la normal a la superficie de la rejilla, y la línea color azul es el haz reflejado (orden cero o componente directa). Obsérvese también en rojo el haz difractado (orden +1) siendo analizado por el foto-detector (3). En el arreglo óptico, el diodo láser permanece fijo.

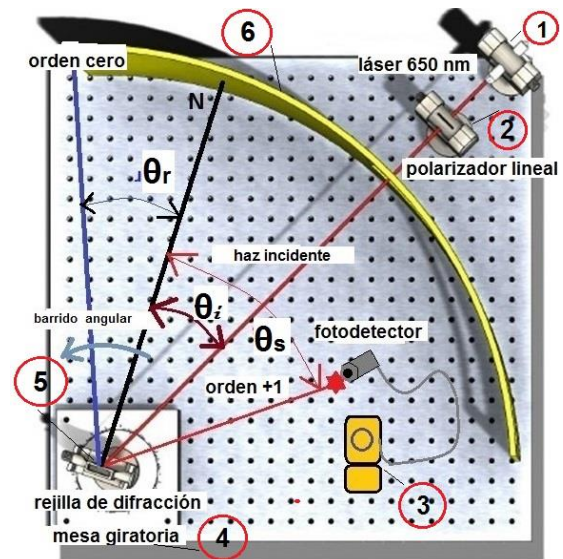


Figura 2. Diagrama esquemático del aparato utilizado para medir las variaciones de la intensidad de luz en superficies metálicas con perfil rectangular.

El ángulo de incidencia se controla al girar la plataforma giratoria (4) en contra de las manecillas del reloj. Al permanecer fijo el haz incidente, la normal a la superficie gira también en contra de las manecillas del reloj, siendo esta línea el eje de referencia para medir los ángulos incidentes (θ_i), reflejado (θ_r) y difractado θ_s .

Obsérvese en la figura 2 que, a efecto de medir las variaciones en la intensidad de luz, se utiliza un fotodetector (3) controlado manualmente. En la misma figura, la pantalla (6) que aparece delimitando la región en la mesa de pruebas tiene una curvatura con radio constante con el fin de visualizar la posición de los rayos reflejado y difractado. La mesa de rotación tiene graduación angular, lo que permite controlar y medir el ángulo reflejado ($\theta_i = \theta_r$) y realizar mediciones en la intensidad de luz para posiciones angulares equidistantes.

La flexibilidad del sistema óptico permite un fácil manejo, modificación de sus componentes, y versatilidad para la alineación de sus elementos, así como un control de



variables importantes en los experimentos, tales como el ángulo de incidencia, la polarización de la señal, la fuente de luz, y la foto detección.

2.2. Cálculo del vector de onda para una superficie plana de oro.

Para la rejilla de difracción utilizada en el presente experimento, los parámetros involucrados en la ecuación (1) se encuentran publicados en tablas y sus valores son conocidos. Utilizando dichos valores, la ecuación (1) adopta la forma particular,

$$k_{pps} = 1.0002763 * 0.009666431 * \sin \theta_i + 0.007539816.$$

Por otro lado, el vector de onda para una superficie plana de oro, se calcula a partir de la ecuación [2],

$$\text{Re}[k_x] = k = \frac{w}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}, \quad (2)$$

donde $k = 2\pi/\lambda_p$, ϵ_2 es la constante dieléctrica del aire, ϵ_1 es la constante dieléctrica (parte real) del oro, w es la frecuencia angular de la señal de la luz, y c es la velocidad de la luz.

Se calcula el valor del vector de onda del plasma de electrones para el material con el que está elaborada la rejilla de difracción (oro). Bajo las condiciones establecidas teóricamente para el acoplamiento de fotones con valores de las constantes dieléctricas y aplicando la ecuación (2), tenemos que el vector de onda para una superficie de oro tiene un valor de,

$$k_{plasmón} = 0.010111382489459 \times 10^9 \text{ m}^{-1},$$

por lo que la longitud de onda del plasmón para la superficie de oro utilizada en el experimento es,

$$\lambda_p = 621.3967285 \text{ nm.}$$

Se obtienen los valores exactos de los vectores de onda, los cuales son proporcionales a la frecuencia angular (w) a través de la velocidad de la luz. La condición de resonancia se puede alcanzar

entonando el vector de onda k_{pps} , mediante la variación de θ_i , la cual se dará cuando k_{pps} alcance valores muy cercanos a k_x . Realizando un barrido del ángulo θ_i con un intervalo de lectura de 0.5° en el intervalo $0 \leq \theta_i \leq \pi/2$, se obtienen las curvas de la figura 3, en donde se grafican k_{pps} vs θ_i y $|k_{pps} - k_{plasmón}| + k_{pps}$ vs θ_i . Este artificio gráfico permite visualizar la convergencia de los valores k_{pps} y $k_{plasmón}$ i.e. la resonancia ocurre cuando, $k_{pps} - k_{plasmón} = 0$. Se observa que k_{pps} toma un valor muy cercano a $k_{plasmón}$ en aproximadamente 16.75° . Este resultado muestra que es factible obtener la resonancia del plasmón en ese ángulo.

Es factible confirmar la validez de la ecuación (3) para un ángulo de resonancia θ_R , dado por la expresión,

$$\theta_R = \sin^{-1} \left\{ \frac{(k_x - m k_g)}{n_a k_0} \right\}, \quad (4)$$

donde m es el orden de difracción.

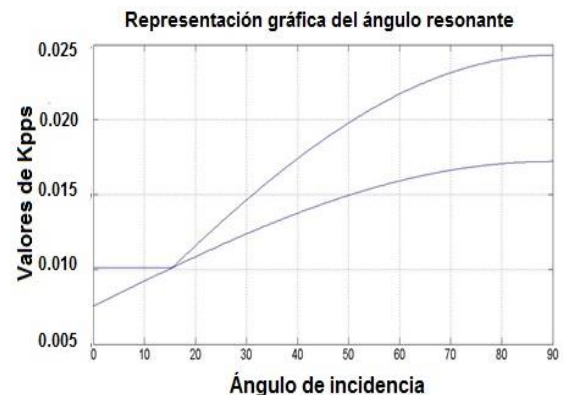


Figura 3. Curvas para k_{pps} vs θ_i , y $|k_{pps} - k_{plasmón}| + k_{pps}$ vs θ_i . Obsérvese el punto de convergencia en el ángulo 15.50, lo que indica que es factible obtener la resonancia de plasmones.

3. Resultados

En el presente experimento se realizan mediciones de la intensidad de los haces de luz difractados por una rejilla, mediante un barrido del ángulo de incidencia. En la figura 4 se



presentan los valores medidos de la intensidad del haz de luz medido en el orden -1. Se aprecia claramente que se presenta un mínimo en la intensidad de luz a un ángulo resonante muy similar al predicho en el cálculo numérico de la sección anterior, lo cual confirma la eficiencia en el funcionamiento del prototipo óptico fabricado para excitar PPS, así como para realizar mediciones en haces de luz difractados a ángulos menores a 90° .

En especial, esto confirma que es posible excitar PPS con superficies rugosas con un periodo espacial mayor a la longitud de la onda de la señal de luz.

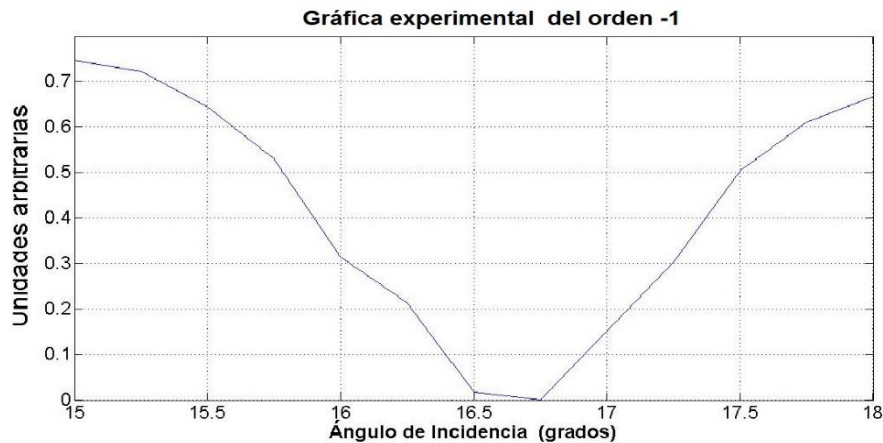


Figura 4. Gráfica de los valores de la intensidad del orden -1 utilizando luz incidente con polarización p. Los datos de lectura tomados con un fotodetector están normalizados y fueron tomados a intervalos de 0.25° .

Otro aspecto digno de destacarse en el presente experimento, es la importancia que juega la polarización del haz incidente para la generación de PPS. A diferencia de los resultados presentados en la figura 4, en donde se utiliza un haz incidente con polarización p, en la figura 5 se presentan los resultados para una señal de luz con polarización s, en donde se miden los valores de la intensidad del orden -1. Como se muestra en la figura 5, la intensidad de luz no exhibe una caída en su valor alrededor de los 16.75° . Esto demuestra que los resultados experimentales son consistentes con la teoría, la cual involucra la condición de que la luz incidente tenga polarización p.



Figura 5. Gráfica de los valores de la intensidad del orden -1 para una señal de luz con polarización (TE). Como se muestra en la gráfica, la intensidad de luz no tiene una caída en su valor alrededor de los 16.75° . Los datos de lectura tomados con un fotodetector están normalizados.



También en el orden +1 se presenta una caída abrupta de la intensidad de la luz difractada usando luz incidente de polarización p como se muestra en la figura 6. La caída abrupta en la intensidad de la señal de luz en los órdenes de difracción ± 1 , es una característica que puede considerarse conveniente para aplicaciones en el área de la ingeniería. Por ejemplo, para el diseño de moduladores de luz. De hecho, al observarse el comportamiento de la intensidad de luz alrededor del ángulo resonante Θ_R , podemos notar que existe un intervalo de aproximadamente 2° en el cual ocurre la disminución de la intensidad de luz. Es técnicamente viable aprovechar este comportamiento de la señal de luz difractada en los órdenes ± 1 , donde su intensidad se encuentra en función del ángulo de incidencia. Esta aplicación se encuentra en trámite para su registro como patente [8].

El prototipo óptico desarrollado tiene características técnicas que ofrecen flexibilidad para futuras aplicaciones. Al estar integrado por una serie de ensamblajes de monturas, cada uno diseñado para componentes ópticos específicos, y al tener la capacidad de modificarse mediante el diseño de software versátil, así como su fabricación en impresión 3D, se hacen evidentes las amplias posibilidades de rediseño del experimento. El prototipo también permite manipular con facilidad variables tales como la longitud de onda (diodo láser), frecuencia espacial y el material de la superficie rugosa metálica (oro, plata, etc.), o bien el polarizador lineal. Así también, el prototipo proporciona un control en el ángulo de incidencia. Esta amplia flexibilidad abre numerosas posibilidades para probar nuevas hipótesis para las condiciones de excitación de plasmones polaritones de superficie, utilizando la técnica de la rejilla de difracción metálica con una longitud de onda menor al periodo espacial de la rejilla.

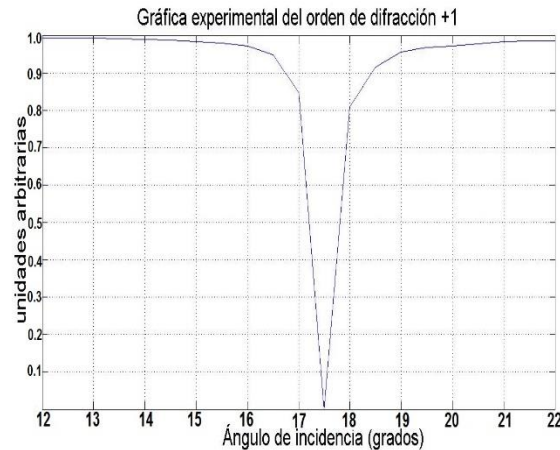


Figura 6. Gráfica de los valores de la intensidad del orden +1 para una señal de luz con polarización (TM). Los datos de lectura tomados con un fotodetector están normalizados y fueron tomados a intervalos de 0.50.

4. Conclusiones

Se fabricó un prototipo óptico para realizar mediciones de plasmones polaritones de superficie en haces de luz difractados por una rejilla de difracción en contacto con una superficie dieléctrica a ángulos menores a 90° , mediante el cual es posible realizar experimentos para identificar el ángulo resonante de excitación de PPS, donde el periodo espacial de la rejilla es mayor que la longitud de onda de la señal de iluminación. El diseño y la fabricación de las monturas del prototipo se realizaron mediante software para modelado de piezas mecánicas (*Solidworks*) e impresión 3D, dándole al prototipo gran flexibilidad debido a la facilidad y rapidez con la que se pueden modificar y alinear sus elementos ópticos.

Como aplicación del prototipo, se llevaron a cabo mediciones de la curva de intensidad de la señal de luz difractada en los órdenes +1 y -1. Los resultados experimentales fueron exitosamente corroborados mediante un modelo teórico que permite predecir los valores de los ángulos en los que se encuentran dichos órdenes. Se destaca el papel que juega la polarización del haz incidente en la generación del efecto PPS, comparando el



Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT). Volumen 2 (2): 58-65.

experimento con luz de polarización p con uno donde se utiliza luz de polarización s.

Uno de los resultados importantes que se desprende de nuestra investigación [8] es la propuesta de la utilización del estado de polarización del haz incidente como parámetro importante para el diseño de nuevos aparatos plasmónicos, tales como el diseño de moduladores de luz basados en el efecto PPS. Este nuevo concepto de modulador toma gran distancia tecnológica respecto de un polarizador lineal, en virtud de que el efecto de variación de la intensidad de luz difractada depende del material con el que está elaborada la rejilla de difracción, cuyas constantes dieléctricas permiten sintonizar el ángulo de resonancia con exactitud.

Referencias

- [1] V. M. Shalaev, y S. Kawata, "Nanophotonics with Surface Plasmons," *Elsevier*, vol. 1, pp. 3-32, 2007.
<https://doi.org/10.1016/B978-044452838-4/50000-X>
- [2] H. Raether, "Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and Gratings," *Springer, Berlin*, vol. 1, pp. 4-39, 1988.
<https://doi.org/10.1007/BFb0048319>
- [3] S. A. Maier, "Plasmonics: Fundamentals and Applications," *Springer, New York*, vol. 1, pp. 39-42, 2007.
https://doi.org/10.1007/0-387-37825-1_3
- [4] V. V. Mitin, V. A. Kochelap, y M. A. Stroschio, *Introduction to Nanoelectronics*, Cambridge University Press, United Kingdom, vol. 1, pp. 242-321, 2008.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511809095>
- [5] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits," *Electronics*, vol. 38, pp. 82-85, 1965.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.1998.658762>
- [6] A. Otto, "Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection," *Zeitschrift für Physik*, vol. 216(4), pp. 398-410, 1968.
<https://doi.org/10.1007/BF01391532>
- [7] J. Homola, I. Koudela, y S. S. Yee, "Surface plasmon resonance sensors based on diffraction gratings and prism couplers: sensitivity comparison," *Sensors and Actuators B.*, vol. 54, pp. 16-24, 1999.
[https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(98\)00322-0](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(98)00322-0)
- [8] M.A. Ponce-Camacho, J. Villavicencio, R. Romo, "Procedimiento para Controlar la Intensidad de una Señal de Luz", patente en trámite, expediente MX/a/2016/015972, No. de folio 12759, México, 2016.
- [9] E. Kretschmann, y H. Raether, "Radiative decay of nonradiative surface plasmons excited by light. Z", *Naturforsch, A*, vol. 23, pp. 2135, 1968.
<https://doi.org/10.1515/zna-1968-1247>
- [10] S. Babar y J. H. Weaver, "Optical constants of Cu, Ag, and Au revisited", *Appl. Opt.* vol. 54, pp. 477-481, 2015.
<https://doi.org/10.1364/AO.54.000477>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:


Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciente o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



Transporte electrónico a través de moléculas orgánicas

Electronic transport through molecules organic

Morales Valenzuela Luis Germán¹, Iglesias Vázquez Priscilla Elizabeth², Villarreal Sánchez Rubén Cesar ¹

¹Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California. Carretera Tijuana-Ensenada Km 106, 22800 Ensenada, Baja California, México

²Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California. Carretera Tijuana- Ensenada Km 106, 22800 Ensenada, Baja California, México

Autor de correspondencia: Priscilla Elizabeth Iglesias Vázquez, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana 3917, Colonia Playitas, Ensenada, Baja California, México. E-mail: piglesias@uabc.edu.mx

Recibido: 31 de Julio del 2018

Aceptado: 20 de Marzo del 2019

Publicado: 03 de Mayo del 2019

Resumen. - *El uso de moléculas como componentes electrónicos ha marcado una tendencia de miniaturización en dispositivos conocida como electrónica molecular. En este trabajo se realizan cálculos teóricos del coeficiente de transmisión cuántico y la corriente eléctrica a través de una molécula de benceno conectada a terminales eléctricas. El coeficiente de transmisión es obtenido mediante el cálculo recursivo de la función de Green del sistema. Se modela también la influencia de un electrodo móvil puntual (small movable gate SMG) sobre la transmisión. Los resultados muestran que el coeficiente de transmisión oscila como función de la energía incidente de los electrones, y la corriente eléctrica muestra que la molécula de benceno tiene un carácter semiconductor. Las oscilaciones en la transmisión pueden ser manipuladas por la posición de las terminales en la molécula y por la influencia del SMG en una región cercana a un átomo en particular.*

Palabras clave: Transporte electrónico; Función de Green; Corriente eléctrica; Benceno; Electrónica molecular; Electrodo móvil puntual.

Abstract. - *The use of molecules as electronic components has marked a trend of miniaturization in devices known as molecular electronics. It has been performed theoretical calculations of the quantum transmission coefficient and the electric current through a molecule of benzene connected to electrical terminals. The transmission coefficient is obtained by recursively calculating the Green function of the system. The influence of a small movable gate SMG on the transmission is also modeled. The results show that the transmission coefficient oscillates as a function of the incident energy of the electrons, and the electric current shows that the benzene molecule has a semiconductor character. The oscillations in the transmission can be manipulated either by the position of the terminals in the molecule or influence of the SMG in a region close to a particular atom.*

Keywords: Electronic transport; Green function; Electrical current; Benzene; Molecular Electronics; Small movable gate.



1. Introducción

El desarrollo de dispositivos electrónicos cada vez más pequeños, incluso de dimensiones nanométricas, ha hecho necesario el uso de moléculas con ciertas características físicas y químicas como componentes electrónicos [1]. Los avances recientes en la manipulación de moléculas permiten conectar una sola molécula entre dos electrodos metálicos y medir propiedades de transporte electrónico a

través de ella [2]. Para esto es necesario de átomos que sirvan como puentes entre la molécula y los electrodos [2-4].

En este trabajo se presentan cálculos del coeficiente de transmisión y corriente electrónica través de una molécula de benceno conectada a terminales eléctricas atómicas (Figura 1). Además, se estudia la influencia de un electrodo móvil puntual en proximidad a una región particular de la molécula.

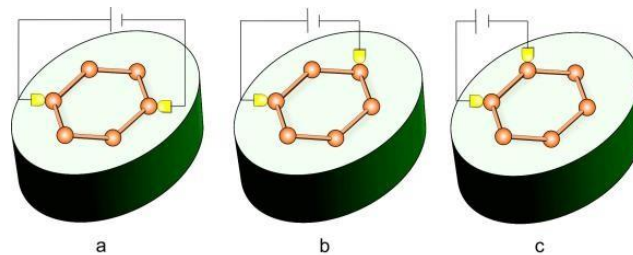


Figura 1. Molécula de benceno con diferentes configuraciones: (a) *para-p*, (b) *meta-m* y (c) *orto-o* de las terminales eléctricas.

2. Modelo teórico

La molécula de benceno y las terminales son modeladas con el formalismo de *amarre fuerte (tight binding)* [5], en donde cada átomo de carbono, de los 6 que constituyen el anillo bencénico, representa un sitio con energía α y un parámetro de traslape (hopping) β entre los átomos. Para calcular el Para-benceno coeficiente de transmisión (T) a través de la molécula se utiliza el formalismo dispersivo de Lippman-Schwinger [6]. En éste método se debe calcular recursivamente la función de Green asociada a la molécula, la cual se reduce de forma efectiva a un dímero con parámetros renormalizados de energía de sitio $\tilde{\alpha}_n$ para el átomo n , y parámetro de traslape $\tilde{\beta}$ entre los átomos n y m . La expresión analítica para T a través de la molécula es [7]:

$$T = \frac{(1 + 2\gamma)^2(4 - X^2)}{(1 - 2Q)^2(4 - X^2) + 4(P - QX)^2} \quad (1)$$

Donde:

$$P = Z_0 + Z_1, \quad Q = Z_0Z_1 - \gamma - \gamma^2 \quad (2)$$

Con:

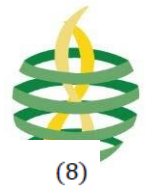
$$Z_j = \frac{(\alpha_j - \alpha)}{2\beta} \quad \text{con } j = 0,1 \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\beta\alpha_1 - \beta}{2\beta}, \quad X = \frac{E - \alpha}{\beta} \quad (4)$$

La corriente eléctrica (I) que pasa por la molécula de benceno está dada por [5]:

$$I = \frac{2e}{h} \int_{-\infty}^{\infty} dET(E)[f_L(E) - f_R(E)] \quad (5)$$

Donde f_L y f_R corresponde a la función de distribución de Fermi para las terminales izquierda (L) y derecha (R) respectivamente, h es la constante de Planck y e la carga eléctrica del electrón. A continuación, se muestran las expresiones de los parámetros renormalizados. Estos parámetros fueron utilizados para calcular la corriente eléctrica de forma numérica en Fortran.



2.1. Para-benceno

$$\tilde{\alpha}_1 = \alpha + \frac{\beta}{X} \left[\frac{(2X^2 - 1)s + \beta(X^2 - 1)}{(X^2 - 1)s} \right] \quad (6)$$

$$\tilde{\alpha}_4 = \alpha + \beta X \left[\frac{\beta(X^2 - 1) + s}{(X^2 - 1)s} \right] \quad (7)$$

$$\tilde{\beta}_{14} = \beta \left[\frac{s + \beta(X^2 - 1)}{(X^2 - 1)s} \right] \quad (8)$$

Donde:

$$s = EX - \alpha_3 X + \beta \quad (9)$$

t

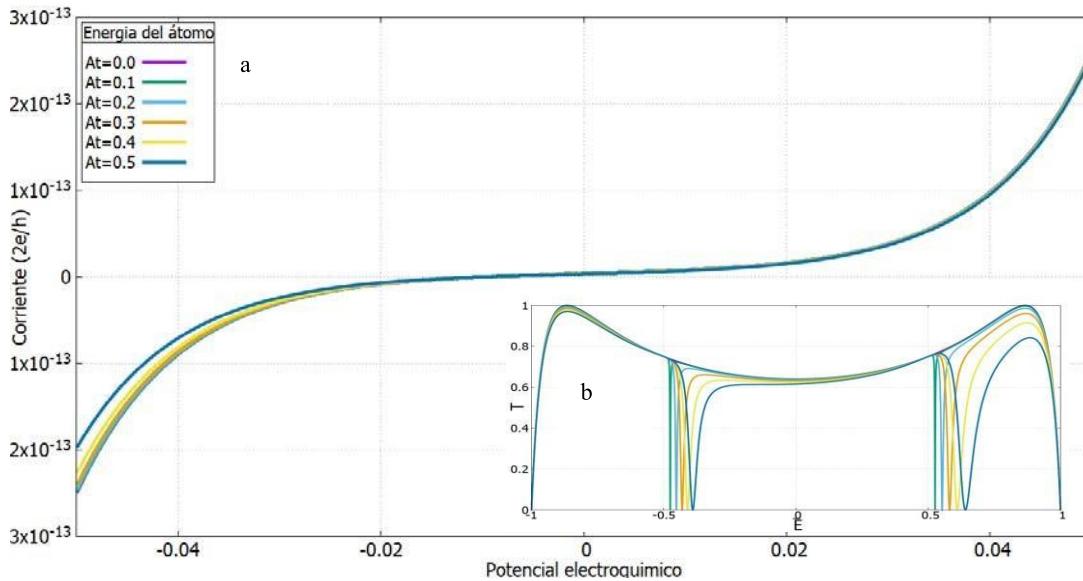


Figura 2. (a) Corriente eléctrica p-benceno para diferentes magnitudes del SMG vs diferencia de potencial, (b) Coeficiente de Transmisión vs energía.

2.2. Meta-benceno

$$\tilde{\beta}_{15} = \beta X^{-1} \left[\frac{\beta X + s}{s} \right] \quad (10)$$

$$\tilde{\alpha}_1 = \alpha + 2\beta X^{-1} + \frac{\beta X^{-1}}{(X^2 - 1)} \left[\frac{s + \beta X}{s} \right] \quad (11)$$

$$\tilde{\alpha}_5 = \alpha + \beta X^{-1} \left[\frac{s + \beta X(X^2 - 1)}{s} \right] \quad (12)$$

Donde:

$$s = E(X^2 - 1) - \alpha_4(X^2 - 1) - \beta X \quad (13)$$

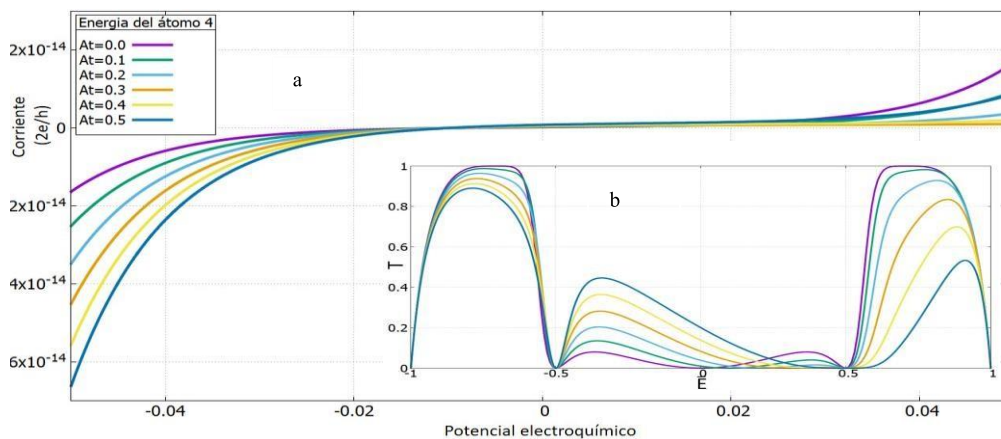
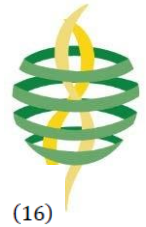


Figura 3: (a) Corriente eléctrica m-benceno para diferentes magnitudes del SMG vs diferencia de potencial, (b) Coeficiente de Transmisión vs energía.



2.3. Orto-benceno

$$\tilde{\beta}_{15} = \frac{\beta^2}{s} + \beta \tag{14}$$

$$\tilde{\alpha}_1 = \alpha + \frac{\beta X}{(X^2 - 1)} + \frac{\beta}{X(X^2 - 1)(X^2 - 2)} + \frac{\beta^2}{X(X^2 - 2)s} \tag{15}$$

$$\tilde{\alpha}_5 = \alpha + \frac{\beta^2 X(X^2 - 2)}{s} \tag{16}$$

Donde:

$$s = X(E - \alpha_5)(X^2 - 2) - \beta(X^2 - 1) \tag{17}$$

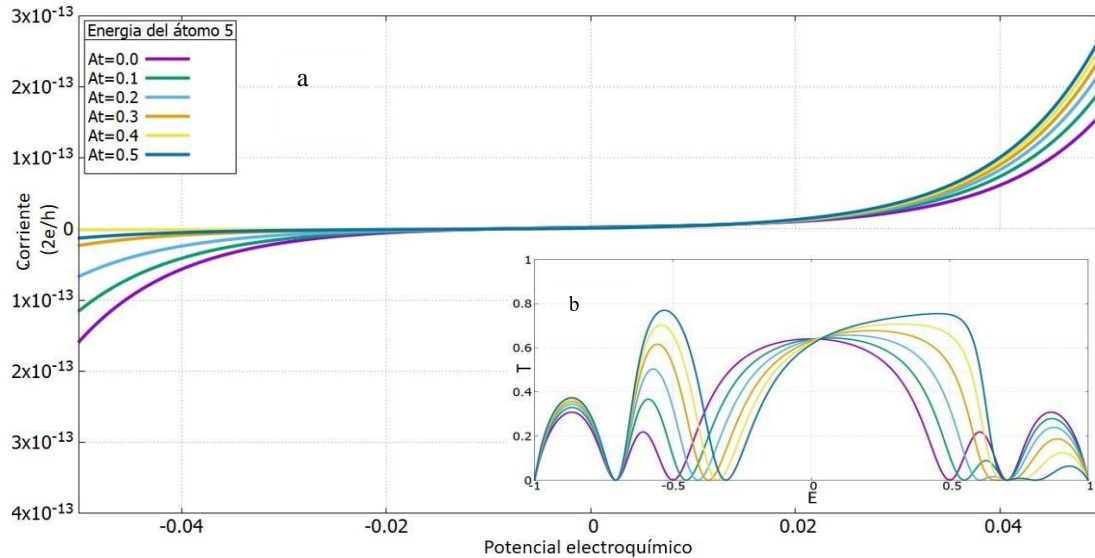


Figura 4: (a) Corriente eléctrica o-benceno para diferentes magnitudes del SMG vs diferencia de potencial, (b) Coeficiente de Transmisión vs energía.

3. Resultados

En la Figura 2,3,4 (b) se muestra la gráfica del coeficiente de transmisión para las distintas configuraciones de las terminales como función de la energía en unidades de β . Se puede observar en la figura 2(b) que la configuración (p) tiene una mayor probabilidad de transmisión a una energía dada que las otras dos configuraciones. El caso extremo es la configuración (m) representada en la figura 3(b), en donde la transmisión prácticamente se anula en un rango de energía. Además, se observa la influencia de perturbar la energía de sitio de un átomo de la molécula con un electrodo móvil puntual (*small movable gate SMG*) de un potencial dado. Es posible observar (Fig. 2(b)) que se inducen caídas en el valor del coeficiente de transmisión para la

configuración, mientras que para las configuraciones (o) y (m) se favorece un incremento en la transmisión a ciertas energías.

Las figuras 2,3,4 (a) muestran las gráficas de la corriente eléctrica calculada a partir del coeficiente de transmisión mediante la ecuación (5). Se puede observar un rango de energía en donde la corriente eléctrica se anula, poniendo de manifiesto el comportamiento semiconductor de la molécula. Este comportamiento es debido a la contribución de las caídas en el coeficiente de transmisión para las diferentes configuraciones. Además, se observa el efecto sobre la corriente de un potencial puntual a través de la influencia electrostática de un SMG.



4. Conclusiones

En este trabajo se presentan cálculos del transporte electrónico a través de una molécula de benceno conectada entre terminales eléctricas. Los resultados muestran que es posible manipular el carácter semiconductor de la molécula mediante diferentes configuraciones de las terminales y la influencia electrostática de un electrodo móvil puntual en una región particular. Este tipo de arreglos moleculares pueden ser utilizados como componentes en dispositivos de electrónica molecular.

Referencias

[1] J. Heurich, J. Cuevas, W. Wenzel and G. Schön, "Electrical Transport through Single-Molecule Junctions: From Molecular Orbitals to Conduction Channels," *Physical Review Letters*, vol. 88, no. 25, pp. 256803 1-4, 6 June 2002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.256803>

[2] F. Chen, X. Li, J. Hihath, Z. Huang and N. Tao, "Effect of Anchoring Groups on Single-Molecule Conductance: Comparative Study of Thiol-, Amine-, and Carboxylic-Acid-Terminated Molecules," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 128, no. 49, pp. 15874-15881, 11

August 2006. <https://doi.org/10.1021/ja065864k>
[3] C. Ko, M. Huang, M. Fu and C. Chen, "Superior Contact for Single-Molecule Conductance: Electronic Coupling of Thiolate and Isothiocyanate on Pt, Pd, and Au," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 132, no. 2, pp. 756-764, 2010. <https://doi.org/10.1021/ja9084012>

[4] G. Schuster, *Long-Range Charge Transfer in DNA I*. Berlin: Springer Berlin, 2013. <https://www.springer.com/gp/book/9783540201311>

[5] S. Datta., *Electronic Transport in Mesoscopic Systems*, Cambridge University Press, 2001. <https://www.amazon.com/Electronic-Mesoscopic-Semiconductor-Microelectronic-Engineering-ebook/dp/B00AKE1T2O>

[6] P. Mello and N. Kumar, *Quantum transport in mesoscopic systems*. Oxford, New York: Oxford Univ. Press, 2010. <https://global.oup.com/academic/product/quantum-transport-in-mesoscopic-systems-9780198525820?cc=mx&lang=en&>

[7] K.W. Sulston, S.G. Davison, "Transmission of renormalized benzene circuits", arXiv: 1505.03808, 13 May 2015. <https://www.cnyn.unam.mx/simposio/archivos/simposio/2018/PROCEEDINGS%20IVSNN.pdf>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:



Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



Tarjeta para controlar 3 grados de libertad de robots vía wifi

Card to control 3 degrees of freedom of robots via wifi

Moya Mora José de Jesús, Vergara Limón Sergio , Reyes Cortes José Fernando 

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. San Claudio y 18 Sur S/N C.U. Edif. 109A Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue. México.

Autor de correspondencia: José de Jesús Moya Mora, Facultad de Ciencias de la Electrónica, Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. San Claudio y 18 Sur S/N C.U. Edif. 109A Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue. México. E-mail: moyamora@me.com

Recibido: 01 de Julio del 2018 **Aceptado:** 05 de Noviembre del 2018 **Publicado:** 10 de Mayo del 2019

Resumen. - *El presente trabajo describe el desarrollo de un sistema para controlar un robot de tres grados de libertad utilizando un sistema embebido, la transferencia de información se realiza mediante el protocolo de comunicación WIFI. El robot que se utiliza es el tipo cartesiano. Se hace una descripción del diseño mecánico del robot, así como la obtención del modelo cinemático y dinámico. Se detalla el diseño de un sistema de adquisición, desarrollando un sistema embebido basado en FPGA de la marca altera de la familia Cyclone III el cual cuenta con un controlador interno, así como la interpretación del manejo de las señales del robot y comunicación WIFI, se explica el desarrollo del firmware que realiza el control y como se establece la comunicación. El controlador seleccionado es el de tangente hiperbólica. Dicho controlador es implementado en el firmware con el fin de controlar y analizar el comportamiento del sistema.*

Palabras clave: FPGA; Protocolo de Comunicación WIFI; Control Tangente Hiperbólico.

Abstract. - *The present work describes the development of a control system for a three D.O.F Cartesian robot using an embedded system where the information transfer is done by the WIFI communication protocol. A description of the mechanical design of the robot is given, as well as the kinematic and dynamic model. It details the design of an acquisition system, developed in FPGA based embedded system of the Altera Cyclone III family, and also the interpretation of the robot signal handling and WIFI communication. In addition, it shows the development of the firmware responsible of the control and communication. Regarding the control, a hyperbolic tangent controller is selected for preliminary results and with these, the Cartesian robot can be analyzed and regulated.*

Keywords: FPGA; WIFI Communication Protocol; Hyperbolic Tangent Control.



1. Introducción

La instrumentación es una disciplina de alto impacto en diferentes aplicaciones, tales como la física, el control, por mencionar algunas. Es el control una disciplina que a su vez interviene en un sin fin de aplicaciones, como la robótica; Entonces se presenta que diferentes disciplinas interactúan de diferentes maneras para lograr un mismo fin. [1]

El desarrollo tecnológico o diseño de dispositivos que como en este trabajo se abordará el diseño de una tarjeta de adquisición de datos y control es de una gran complejidad, y prueba de ello es que este tipo de desarrollo es realizado por compañías transnacionales, por lo que el desarrollo tecnológico en países como México es limitado, puesto que partir de una idea o una función determinada que se quiera que realice el dispositivo a diseñar hasta obtener un primer prototipo es una tarea bastante compleja a realizar, debido a que en ciertas áreas de la ciencia la bibliografía o referencias especializadas en determinados temas es amplia y en ocasiones bastante rebuscada de manera que no cualquier lector podría deducir como es que funciona algún tema en específico que desee leer, comprender e interpretar, en el caso de desarrollos tecnológicos el acceso a bibliografía o referencias es limitada, debido a que esta información es generada por compañías las cuales comercializan estos desarrollos y que invirtieron en recursos humanos e infraestructura para poder generar estos diseños, es por ello que solo es público un manual de uso o guía de usuario para poder utilizar sus diseños comercializados, pero nunca habrá información

que permita a terceras personas realizar un producto similar o basado en su diseño.

Se aborda la problemática de diseño de un sistema de adquisición de datos y control para un robot cartesiano de tres grados de libertad, se analizan las señales que interactúan en el sistema de control del robot, de esta forma se seleccionó los dispositivos electrónicos adecuados para el tratamiento y emisión de estos, además del firmware necesario para el tratamiento, decodificación y emisión de las señales necesarias en el sistema de control. El diseño de tarjetas de adquisición de datos y control tiene una amplia complejidad, por lo que en su mayoría son desarrollados por compañías transnacionales en las cuales un equipo multidisciplinario realiza los diseños, por esta razón el desarrollar diseños de tarjetas de adquisición de datos en el país permite crear dispositivos que satisfagan las necesidades y técnicas para una aplicación de control, por ello esta tarjeta es de arquitectura abierta y con una comunicación inalámbrica con la PC, lo cual permite la transmisión de datos vía wifi. La creación de una pantalla de usuario utilizando LabView permite la combinación de procesamiento de la PC con la tarjeta diseñada. La tecnología avanza a grandes pasos, por lo que la investigación de dispositivos de última generación se vuelve de vital importancia, es por ello que se presenta la investigación de instrumentación de dispositivos en los FPGA de ALTERA de última generación.

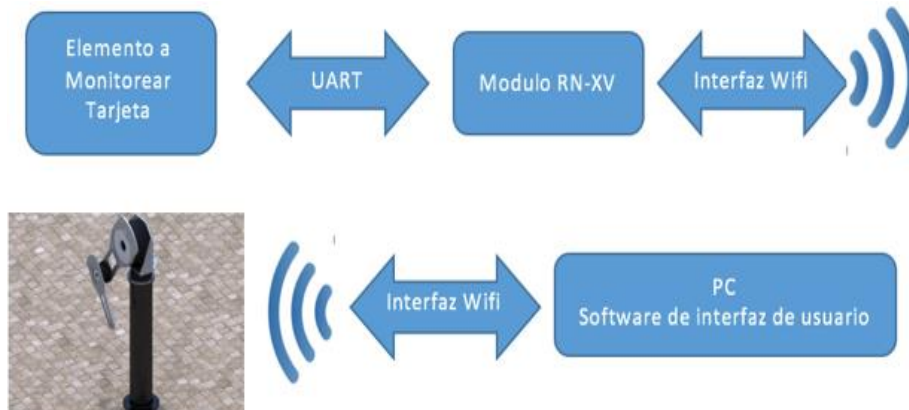


Figura 1. Diagrama general del sistema embebido.

2. Metodología

1.1. Diagrama general del sistema embebido

El sistema embebido desarrollado le permitirá al usuario manipular el robot como el desea mediante un monitoreo de manera inalámbrica vía WIFI. El sistema en general está compuesto por hardware, firmware y software los cuales se describirán a continuación.

Del diagrama anterior, el elemento a monitorear es la articulación del robot, se obtienen los valores correspondientes a la posición actual y par aplicado, en base al tiempo y a la posición deseada, se calcula el error de posición a lo largo del funcionamiento del sistema. Estos datos son leídos a través de la FPGA y son enviados a un módulo WIFI mediante el protocolo UART de sus siglas en inglés Universal Asynchronous Receiver Transmitter.

El módulo WIFI es el RN-XV, este dispositivo realizará la tarea de conversión de WIFI a serial y de serial a WIFI. Esta comunicación es bastante atractiva para el usuario ya que se hace compatible con computadoras de escritorio o computadoras portátiles de manera inalámbrica. [2]

La interfaz de usuario se realizará mediante la ayuda del software labview en la cual el usuario tendrá el control del sistema, El sistema tendrá la tarea de interpretar los datos del encoder, inicializar el algoritmo de control, transmitir la posición actual y par aplicado.

La ventaja de este sistema, es que, el algoritmo de control se encuentra dentro de la FPGA mediante firmware, aumentando el tiempo de ejecución del algoritmo de control tomando así datos en tiempo real, puesto que es un hardware dedicado a realizar esa tarea específica.

2.1. Diseño del robot cartesiano

Para poder realizar un control apropiado para nuestro robot, es necesario tener en cuenta el modelo dinámico del mismo, esto nos servirá para analizar su comportamiento, al utilizar diferentes algoritmos de control y de esta manera poder utilizar el presente un mejor desempeño.

El modelo dinámico de nuestro robot, se emplea la metodología de Euler-Lagrange, la cual está ampliamente documentada.

Para ello se muestra la representación geométrica del robot cartesiano de 3 grados de libertad, la



cual nos ayuda a visualizar el comportamiento del manipulador.

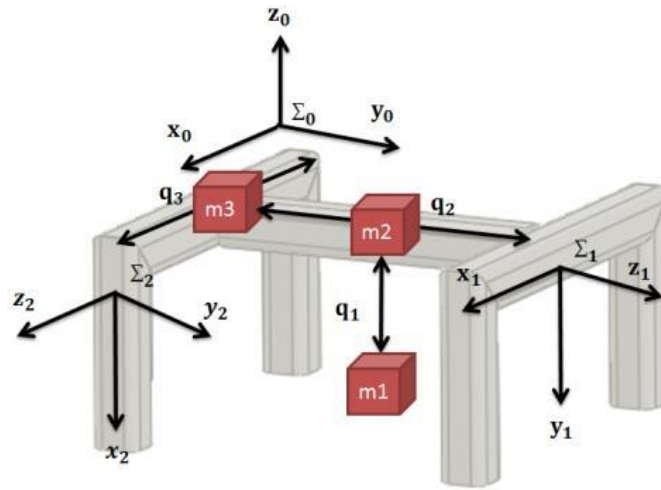


Figura 2. Representación del robot cartesiano de 3 grados de libertad.

Por lo tanto, el modelo dinámico cartesiano está dado por:

$$f_x = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 + m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 + m_3 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + g \begin{bmatrix} m_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{c1} & 0 & 0 \\ 0 & f_{c2} & 0 \\ 0 & 0 & f_{c3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{signo}(\dot{q}_1) \\ \text{signo}(\dot{q}_2) \\ \text{signo}(\dot{q}_3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{e1}[1-\text{signo}(\dot{q}_1)] \\ f_{e2}[1-\text{signo}(\dot{q}_2)] \\ f_{e3}[1-\text{signo}(\dot{q}_3)] \end{bmatrix}$$

En nuestro caso no se cuenta con la matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis, ya que es igual a cero, con respecto a la matriz de inercia cartesiana nosotros contamos con una matriz de masas, mencionada con anterioridad.

Se presenta el robot cartesiano integrado completamente.

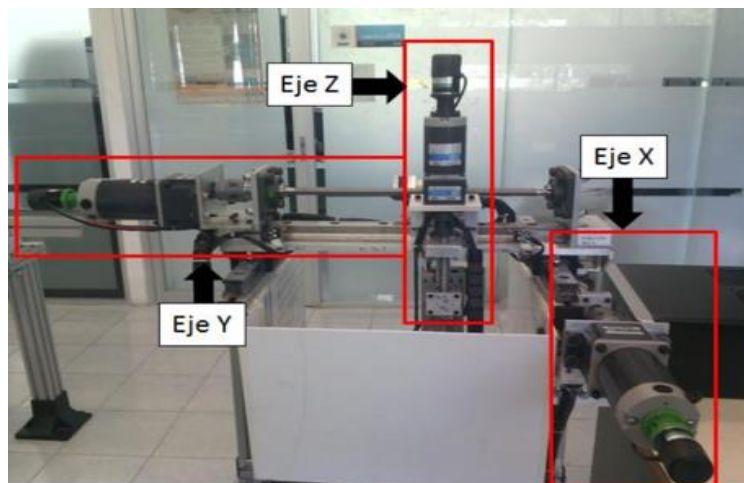


Figura 3. Representación del robot cartesiano de 3 grados de libertad.



2.3 Diseño de la interfaz gráfica para manipular el robot cartesiano de 3 grados de libertad.

Se hará una descripción concreta del software de control de posición, el cual se realizó con el

programa de LabView, que es una herramienta que nos permite tener acceso de forma sencilla al protocolo de comunicación WIFI, permitiéndonos visualizar los datos que se escriben desde la computadora hasta la tarjeta de adquisición de datos.

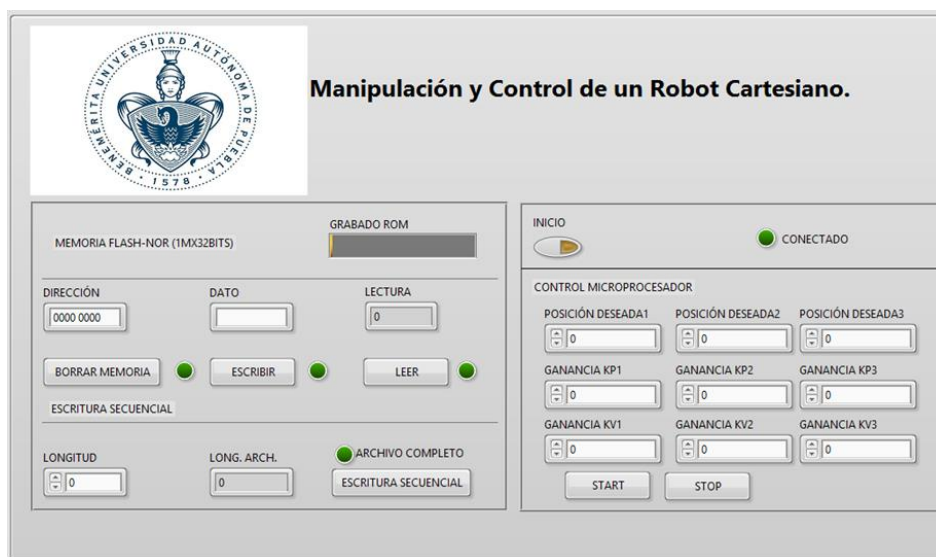


Figura 4. Representación del robot cartesiano de 3 grados de libertad.

En esta pantalla nosotros podemos visualizar las posiciones deseadas, la ganancia proporcional y derivativa, para cada eje.

Desde esta interfaz podemos inicializar nuestro sistema, cargar un archivo de texto “.txt”, el cual cuenta con el algoritmo de control necesario para poder tener una manipulación de nuestro robot de forma óptima, nos permite ingresar la posición deseada, en la cual nuestro robot llegara a esta posición de forma precisa, la precisión de llegar al punto deseado varía dependiendo de la ley de control que se le aplique al robo.

3. Resultados

Se realizó la caracterización de los motores de dc, para convertirlos en pseudo-servomotores de transmisión directa. Siguiendo la siguiente metodología, primero se determina el voltaje nominal de cada motor, en nuestro caso fue de 12v; Después se hace la búsqueda de la frecuencia de trabajo de cada motor, la cual nos proporciona la mitad del torque máximo con un ciclo de trabajo de 50%, una vez localizada esta frecuencia se hace un barrido cambiando el porcentaje de ciclo de trabajo para poder analizar su comportamiento, que tiene que ser muy cercano al lineal. De este proceso se obtuvieron los siguientes resultados:



Tabla 1. Datos adquiridos del primer motor a una frecuencia de 2.45Khz.

% Ciclo de trabajo del PWM	Torque (Nm)
0	0
10	2.8616
12	3.9494
14	4.3708
16	5.2528
18	5.9976
20	6.4288
22	7.595
24	8.1144
28	9.555
34	10.8192
36	12.348

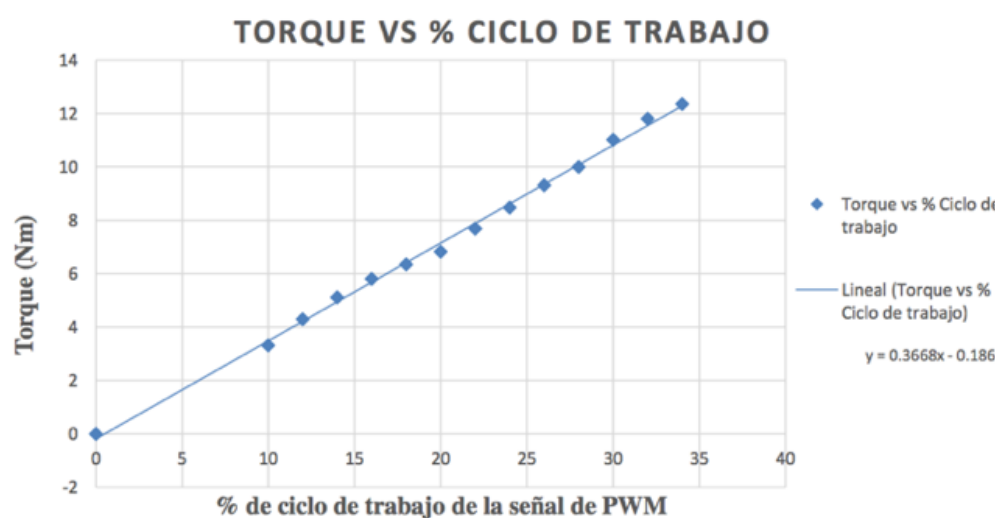


Figura 5. Gráfica de resultados del primer motor, se puede observar la linealidad del motor.

Se caracterizó hasta el 36% del ciclo de trabajo, ya que el servomotor nos proporciona el torque necesario para nuestra aplicación.

Para el segundo motor se obtuvieron los siguientes resultados a una frecuencia de 2.



Tabla 2. Datos adquiridos del segundo motor a una frecuencia de 2.5Khz.

%Ciclo de trabajo del PWM	Torque (Nm)
0	0
10	3.3124
12	4.2924
14	5.1058
16	5.8016
18	6.3406
20	6.8208
22	7.68208
24	8.477
26	9.31
28	9.996
31	11.0152
33	11.7992
36	12.348

Finalmente, para el tercer motor se encontró que la mejor frecuencia de trabajo fue de 75Hz, obteniendo los siguientes resultados:

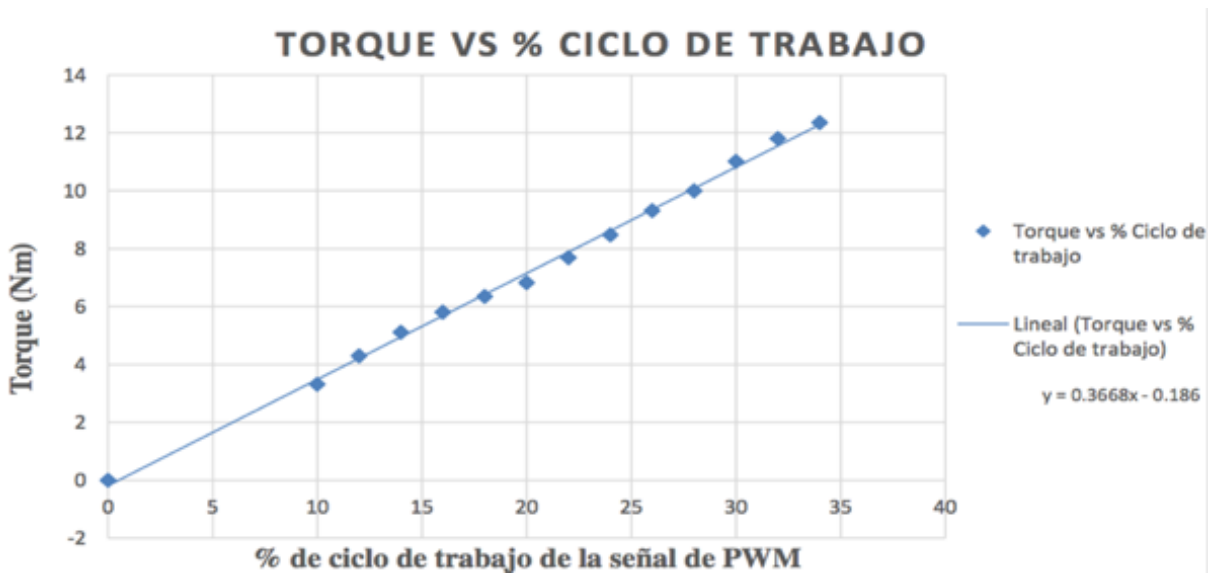


Figura 6. Grafica de resultados del segundo motor, se puede observar la linealidad del motor.



Tabla 3. Datos adquiridos del tercer motor.

%Ciclo de trabajo del PWM	Torque (Nm)
0	0
10	0.0616077
20	0.3435096
30	0.6571488
40	0.840105
50	1.250823
60	1.437513
70	1.8930366
80	2.072259
90	2.5688544

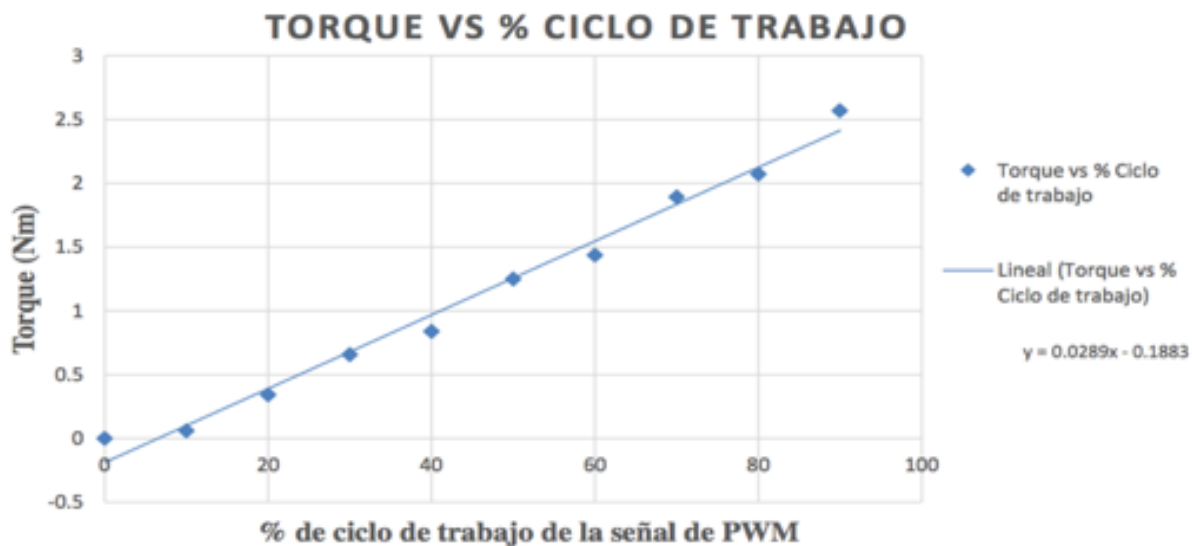


Figura 7. Grafica de resultados del tercer motor, se puede observar la linealidad del motor.

4. Conclusiones

A diferencia de los robots cartesianos comerciales, este manipulador utiliza una comunicación inalámbrica como interfaz, por medio de una tarjeta de adquisición de datos, la cual es una FPGA. Esto le proporciona grandes beneficios como velocidad de procesamiento de 100MHz, arquitectura abierta por mencionar algunos, en comparación con algunos sistemas empotrados como Arduino mega que maneja una velocidad de reloj de 16MHz. Además, la programación en FPGA es muy versátil y nos

permite realizar varios procesos de control en tiempo real, que es muy importante para cualquier aplicación.

Al emplear el software de labview, nuestro programa fue más sencillo de realizar mediante el protocolo de comunicación Wifi, sin embargo, cabe destacar que hay que tener cuidado con las direcciones que se ocupan y la información que se envían porque podemos causar problemas con el sistema. Este programa nos permite modificar



de manera sencilla el algoritmo de control y visualizar los datos que deseamos monitorear.

Referencias

- [1] D. Bernstein and L. Bushnell, "The History of Control: From Idea to Technology", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 22(2), pp. 21-23, April 2002. <https://doi.org/10.1109/MCS.2002.993310>
- [2] J. Carballar, *Wi-Fi Instalación, Seguridad y Aplicaciones*, (Vol. 1). México, México, México: Alfaomega, 2007. https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=23215&shelfbrowse_itemnumber=30782
- [3] R. Kelly y V. Santivañez, *Control de Movimiento de Robots Manipuladores*, Prentice Hall, 2003. http://amca.mx/memorias/amca2009/articulos/amca2009_42.pdf
- [4] D. Rojas-Balbuena, "Diseño, construcción e instrumentación de un robot cartesiano pick and place de 4 GDL", Tesis de maestría FCE, BUAP, Puebla, Puebla, junio del 2011. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/2563/757816T.pdf?sequence=1>
- [5] F. Reyes-Cortes, *Robótica control de robots manipuladores*, Ed. alfa omega, 1er edición. <https://www.alfaomega.com.mx/default/catalogo/profesional/robotica-control-de-robots-manipuladores.html>
- [6] J. Balcells y J.L. Romera, *Autómatas Programables*, Ed. Marcombo, 1997. <https://books.google.com.mx/books?id=xfSjADge70C&siteec=reviews>
- [7] J. Vargas-Valencia, I. Ramírez-Velázquez, y S. Pérez-Walton, *Física mecánica conceptos básicos y problemas*, Ed. ITM, 1a edición diciembre del 2008. <https://fondoeditorial.itm.edu.co/libros-impresos/fisica-mecanica/detalle-libro.html>
- [8] A. Barrientos, L.F. Peñin, C. Balaguer y R. Aracil. *Fundamentos de robótica*, Ed. Mc Graw Hill, 1997. <https://eltrasteroloco.files.wordpress.com/2017/03/267380685-fundamentos-de-robotica.pdf>
- [9] A. Ollero Baturone. *Robótica Manipuladores y robots móviles*, Ed Alfaomega, julio de 2008. <http://el.uy/doc/robotica/Ollero%20Baturone,%20An%C3%ADbal.%202001.%20Rob%C3%B3tica,%20manipuladores%20y%20robots%20m%C3%B3viles.pdf>
- [10] S. Kumar Saha. *Introducción a la Robótica*, Ed. Mc Graw Hill, 2008. <http://biblio.upmx.mx/library/index.php?title=301750&lang=en&query=@title=Special:GSMSearchPage@process=@autor=SAHA.%20SUBIR%20KUMAR%20@mode=&recnum=1&mode=>
- [11] Robot cartesiano de 3 g.d.l. Lexium, disponible en: http://www.alumotion.eu/portfolio_item/urcaps-uring/ 2015.
- [12] Guía aplicada del robot cartesiano, Schneider electric, 11 de diciembre del 2008, versión 1.3.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



Automatización en la carga de material de fundición en una línea de maquinado

Automation in the loading of foundry material in a machining line

Hernández Núñez Mario , Barraza Navarro Francisco Javier

CIATEQ Centro de Tecnología Avanzada, circuito de la industria poniente No 11 Lote 11 Mz. 3, parque industrial ex hacienda, Lerma de Villada Estado de México, C.P 52004.

Autor de correspondencia: Mario Hernández Núñez, CIATEQ Centro de Tecnología Avanzada, circuito de la industria poniente No 11 Lote 11 Mz. 3, parque industrial ex hacienda, Lerma de Villada Estado de México, C.P. 52004. E-mail: mario.hernandeznunez@gm.com

Recibido: 28 de Junio del 2018

Aceptado: 15 de Enero del 2019

Publicado: 15 de Mayo del 2019

Resumen. - *Este artículo describe la forma de cómo fue diseñado mecánicamente un manipulador cartesiano de tres grados de libertad, también de la manera de cómo fue diseñada la trayectoria y la determinación de las fuerzas necesarias para originar el movimiento. Se consideró estudiar la geometría del movimiento del manipulador con el fin de definir trayectorias, específicamente se usó el método de Denavit-Hartenberg también se empleó la ecuación de Euler-Lagrange para determinar las fuerzas internas que suceden dentro del sistema. Se determinaron las características técnicas de los componentes del manipulador empleando un software y mediante un proceso iterativo de análisis de esfuerzos, deformaciones y fatigas se eligieron las propuestas más viables.*

Palabras clave: Diseño de Concepto; Diseño de Detalle; Cinemática Directa; Dinámica; Manipulador Cartesiano; Diseño Mecánico Usando Software.

Abstract. - *This article describes the way how a Cartesian manipulator of three degrees of freedom was mechanically designed, as well as the way in which the trajectory was designed and the forces needed to originate the movement. It was considered to study the geometry of the manipulator's movement in order to define trajectories, specifically the Denavit-Hartenberg method was used, and the Euler-Lagrange equation was also used to determine the internal forces that occur within the system. The technical characteristics of the components of the manipulator were determined using software and through an iterative process of analysis of stress, deformations and fatigues, the most viable proposals were chosen.*

Keywords: Concept Design; Detail Design; Direct Kinematics; Dynamic; Cartesian Manipulator; Mechanical Design Using Software.



1. Introducción

En una línea de maquinado de cabezas de cilindros para motores de combustión interna, existe una persona en la entrada de la línea que se encarga de abastecerla de material casting de una forma totalmente manual. Se pretende automatizar la actividad mediante el empleo de un manipulador. Para el diseño del manipulador es necesario el estudio de su movimiento empleando expresiones matemáticas con el fin de diseñar trayectorias en un contexto formal que a su vez servirán como base para la programación de su controlador; el empleo de la metodología Denavit-Hartenberg [1] es un método muy conveniente para lograrlo. Dentro del diseño mecánico para determinar las características técnicas de los componentes se requiere encontrar todas las fuerzas presentes, para lo cual se emplean los análisis

estáticos y dinámicos, para este último el uso de la ecuación de Euler-Lagrange [1] es un método muy adecuado. El empleo de un software de diseño nos ayuda a ahorrar tiempo y el nivel de efectividad dependerá de la calidad de los datos que se ingresen al sistema para la ejecución de las simulaciones de esfuerzos, deformaciones y fatigas.

2. Diseño de concepto

Se construye la idea de la automatización a nivel de concepto. Se inicia enlistando los requerimientos del cliente y se continúa con la identificación de las funciones que debe de cumplir el manipulador. La figura 1 es una representación física de la condición actual.

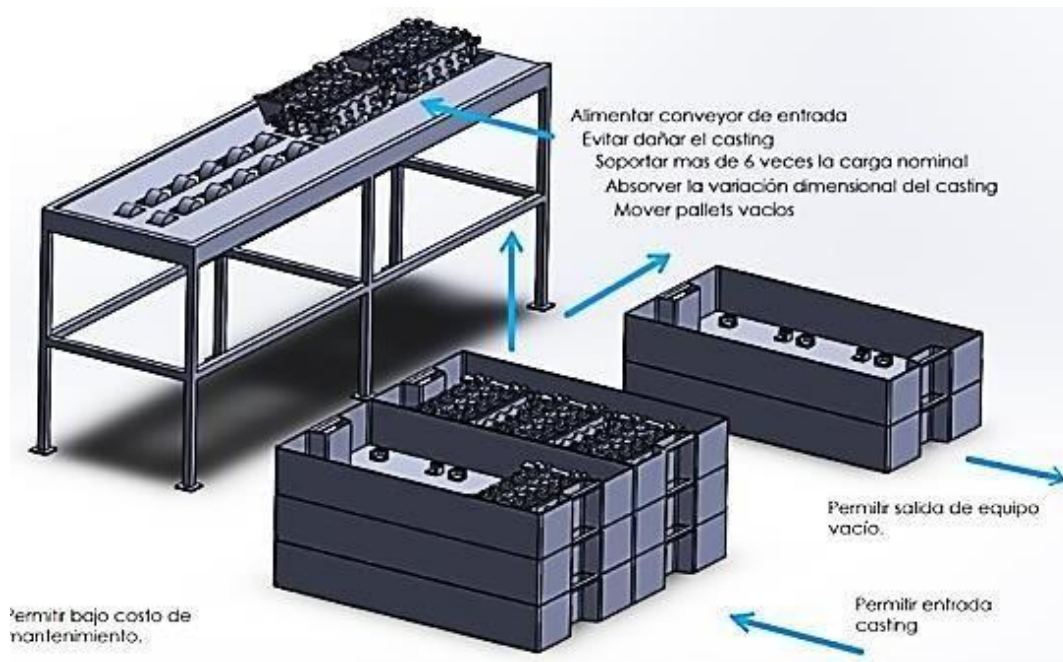


Figura 1. Representación física de la condición actual.

La propuesta que más se ajusta al cumplimiento de las funciones, consiste en un manipulador que se moverá en tres ejes y de forma lineal para abarcar todo el espacio de trabajo, el movimiento será desde la toma del casting hasta el posicionamiento en la banda transportadora de la entrada del proceso.

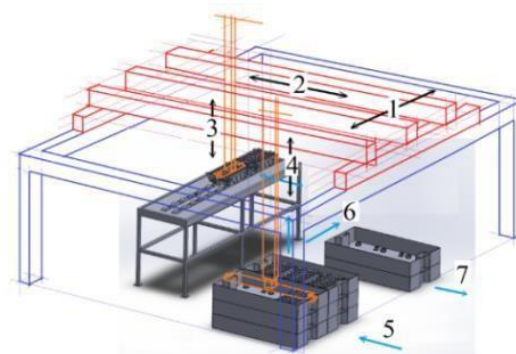


Figura 2. Banda transportadora de entrada.



Una agarradera (“gripper”) con la geometría adecuada, tomará el casting en el área de material almacenado y lo dejará en la banda transportadora de la entrada al proceso (ver la flecha identificada con el número 3 en la figura 2). Una segunda agarradera con la geometría adecuada tomará las charolas vacías del casting y las dejará en el área de equipo vacío (ver las flechas identificadas con los números 4 y 5 de la figura 2). La entrada y salida del casting será por los lugares identificados con las flechas 5 y 7 respectivamente.

3. Diseño de detalle

Para determinar las características técnicas de los componentes del manipulador, se realiza un análisis de los esfuerzos, las deformaciones y las fatigas mediante el software SolidWorks. Se realiza un mínimo de tres propuestas en CAD para cada componente mecánico, posteriormente se desarrolla el análisis CAE de cada propuesta, se generan gráficos de esfuerzo, deformación unitaria,

desplazamiento y factor de seguridad los cuales emplean el criterio de Von Mises [2]. Para el análisis de la fatiga se toman las propuestas CAD y se simulan a los ciclos de vida pronosticados, se generan gráficos de los ciclos de vida y el porcentaje de daño. Al final de los análisis CAE se elabora una tabla comparativa que incluye las propuestas CAD, los resultados de esfuerzos, los desplazamientos, los factores de seguridad y los ciclos de vida. En la misma tabla se valora si la propuesta es o no viable tomando como referencia los requerimientos del cliente. Para ejemplificar y por razones de espacio, en este artículo solo se muestran las simulaciones y la determinación de las características técnicas de un solo componente el cual es el de la base de la agarradera que toma las piezas casting. De la figura 3 a la figura 6 se muestran las simulaciones CAE para las 4 propuestas que se plantearon, la tabla 1 muestra la recopilación de los resultados.

Tabla 1. Resultados del CAE.

	Esfuerzo mayor (Mpa)	Desplazamiento mayor (mm)	Factor mínimo de seguridad	Ciclos de vida ($\times 10^6$)	¿Cumple con los requerimientos del cliente ?	Observaciones
Propuesta 1	8.147	0.06223	30.68	Vida infinita	Parcialmente	Factor de seguridad alto y deformación aceptable.
Propuesta 2	14.13	0.1254	17.69	Vida infinita	SI	Factor de seguridad y deformación aceptables.
Propuesta 3	15.43	0.1817	16.2	Vida infinita	SI	Factor de seguridad y deformación aceptables, menor peso que propuesta no. 2.
Propuesta 4	148.8	4.335	1.68	Vida infinita	NO	Factor de seguridad no cumple requerimiento

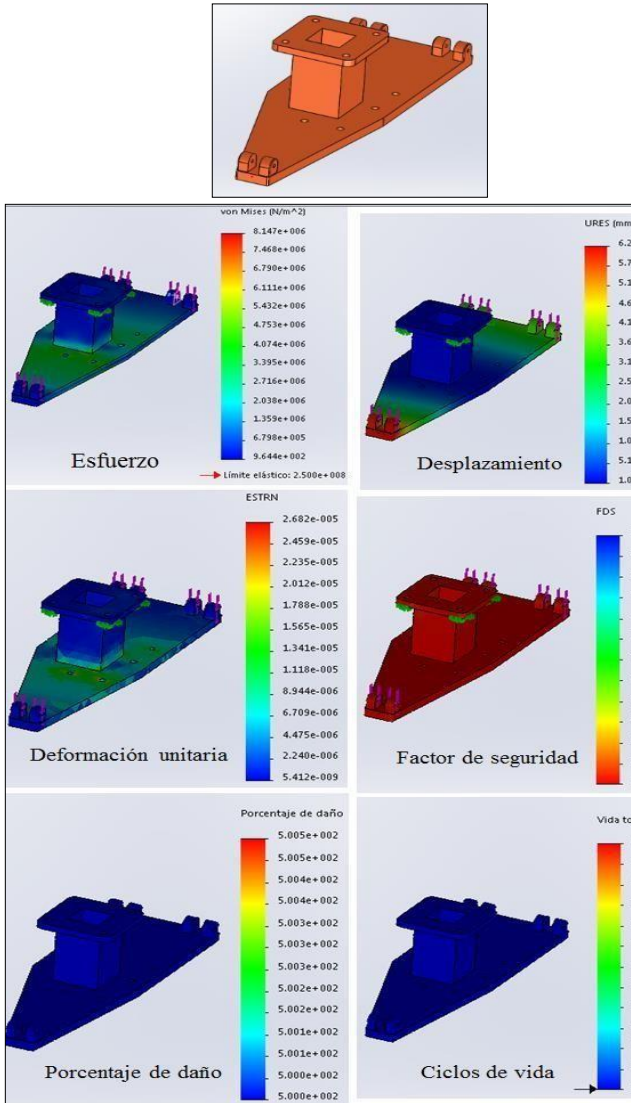


Figura 3. CAE para la propuesta 1.

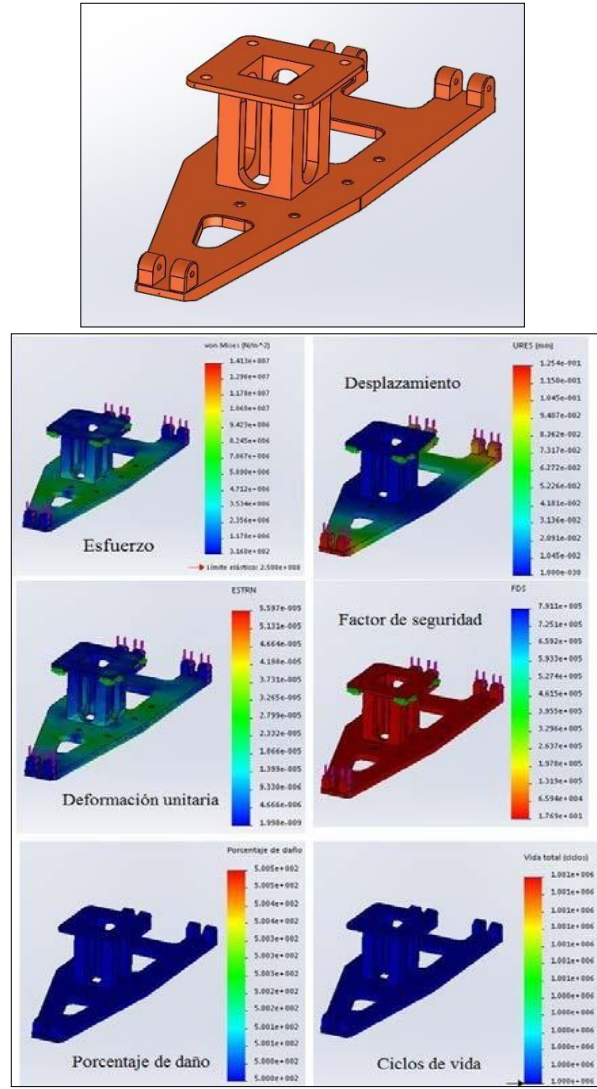


Figura 4. CAE para la propuesta 2.

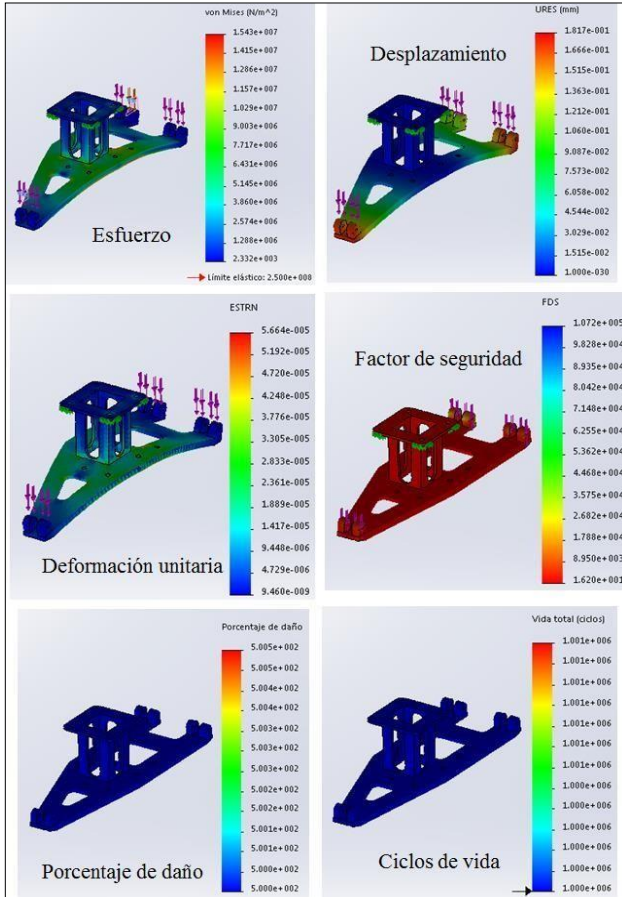
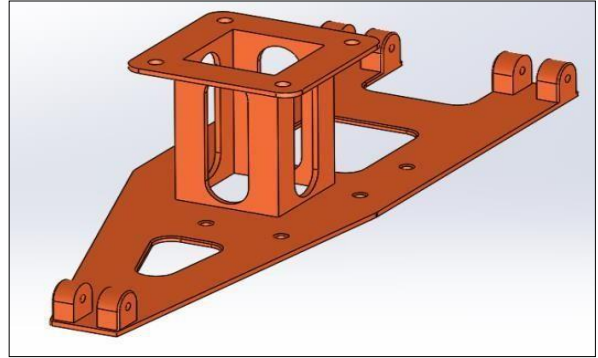
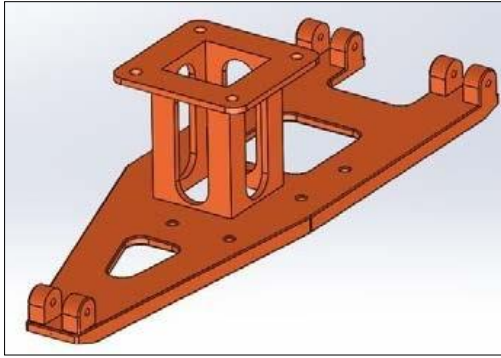


Figura 5. CAE para la propuesta 3

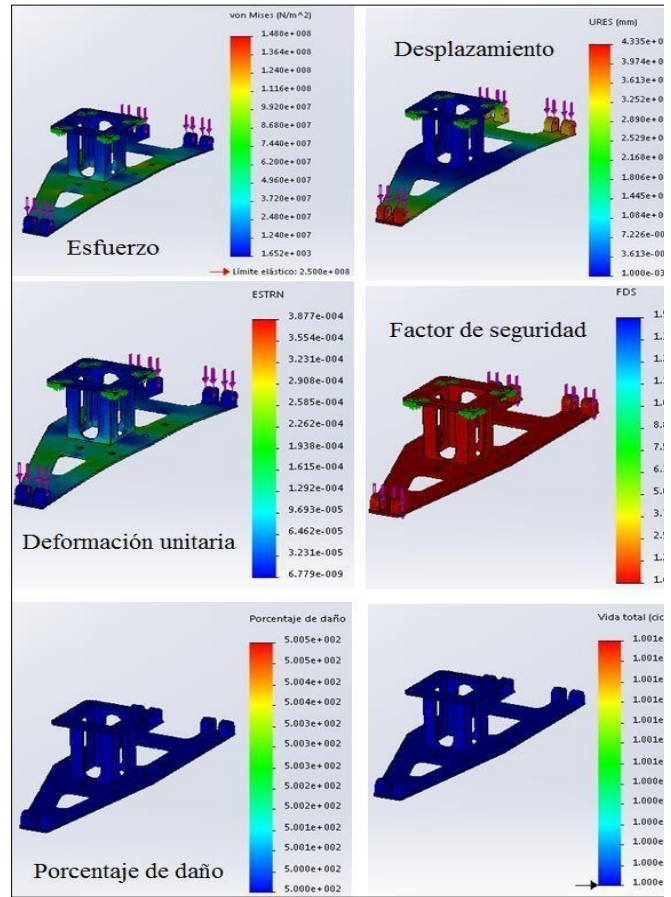


Figura 6. CAE para la propuesta 4.

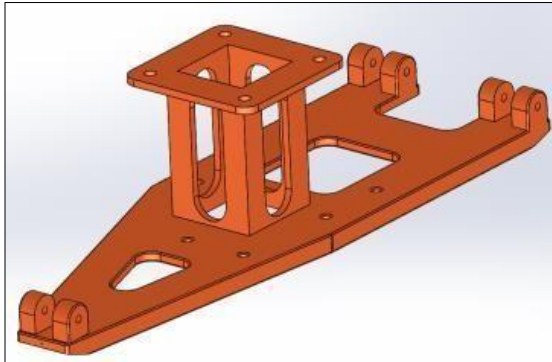


Figura 7. Resultado CAD de la parte.

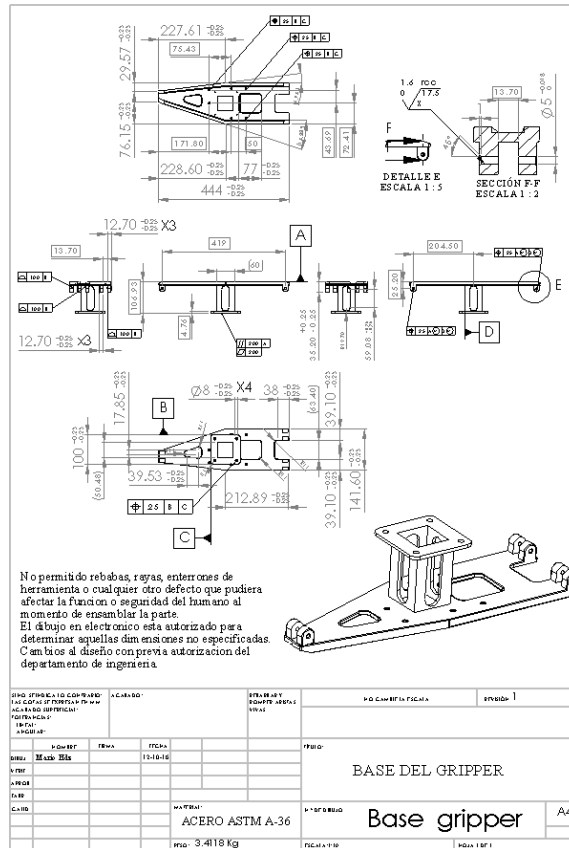


Figura 8. Diseño mecánico de la parte con las especificaciones técnicas.

Al observar los resultados de la propuesta 1, se puede notar que el desplazamiento o deformación mayor es de 62 micras y que además el componente nunca se romperá porque alcanzará los 1×10^6 ciclos de trabajo, lo que significa que la propuesta 1 es una buena alternativa de diseño, sin embargo, el factor de seguridad está muy elevado lo que se traduce en mayor peso y mayores costos. Los resultados de las propuestas 2 y 3 son muy parecidos, estas opciones cumplen con los requerimientos del cliente en cuanto a deformación, factor de seguridad y ciclos de vida; la propuesta 3 por tener menor peso se considera una propuesta de diseño más viable que la propuesta 2. La propuesta 4 queda descartada por la excesiva deformación con un valor máximo de 4.33 mm. Por

lo tanto, la propuesta 3 es la opción de diseño más viable, la figura 7 muestra el CAD de la parte y la figura 8 muestra el diseño mecánico con las especificaciones técnicas.

4. Cinemática directa del manipulador

El principal objetivo de este análisis es el de poder diseñar trayectorias para la programación en el controlador [1]. En esta parte se estudia la geometría del movimiento sin considerar las fuerzas que lo producen. Usando los datos de la figura 9 y la tabla 2 además de emplear el método Denavit-Hartenberg, la definición del movimiento queda determinado por la matriz (1).

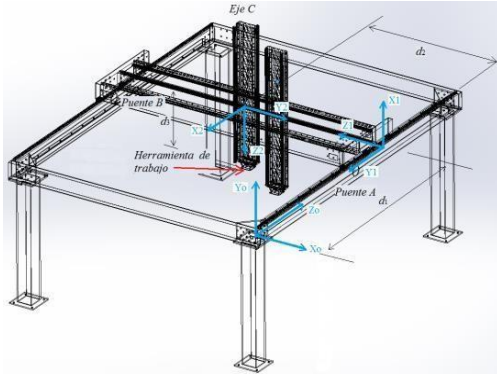


Figura 9. Diagrama para el análisis cinemático

Tabla 2. Parámetros de los eslabones.

Variable	α_i	θ_i	d_i	l_i
Eslabón 1	$-\pi/2$	$\pi/2$	$d1$	Eje puente A
Eslabón 2	$-\pi/2$	$\pi/2$	$d2$	Eje puente B
Eslabón 3	0	0	$d3$	Eje C

$$H_0^3 = H_0^1 H_1^2 H_2^3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -d_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -d_2 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ -1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

La cinemática directa para el robot cartesiano de tres grados de libertad que nos dice de la posición espacial de la herramienta de trabajo respecto al

origen (“Home”) (x_0, y_0, z_0) de la figura 9, es la expresión (2).

$$d_{13} = \begin{bmatrix} x_{13} \\ y_{13} \\ z_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_2 \\ -d_3 \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

5. Dinámica del manipulador

El estudio de la dinámica del manipulador nos ayuda a determinar la capacidad de los motores que

moverán los ejes. En este análisis usaremos un enfoque energético mediante la ecuación de Euler-Lagrange [1].

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} + v(q, \tau) = \tau \quad (3)$$

Tomando como referencia la figura 10, el Lagrangiano queda definido mediante la ecuación (4)

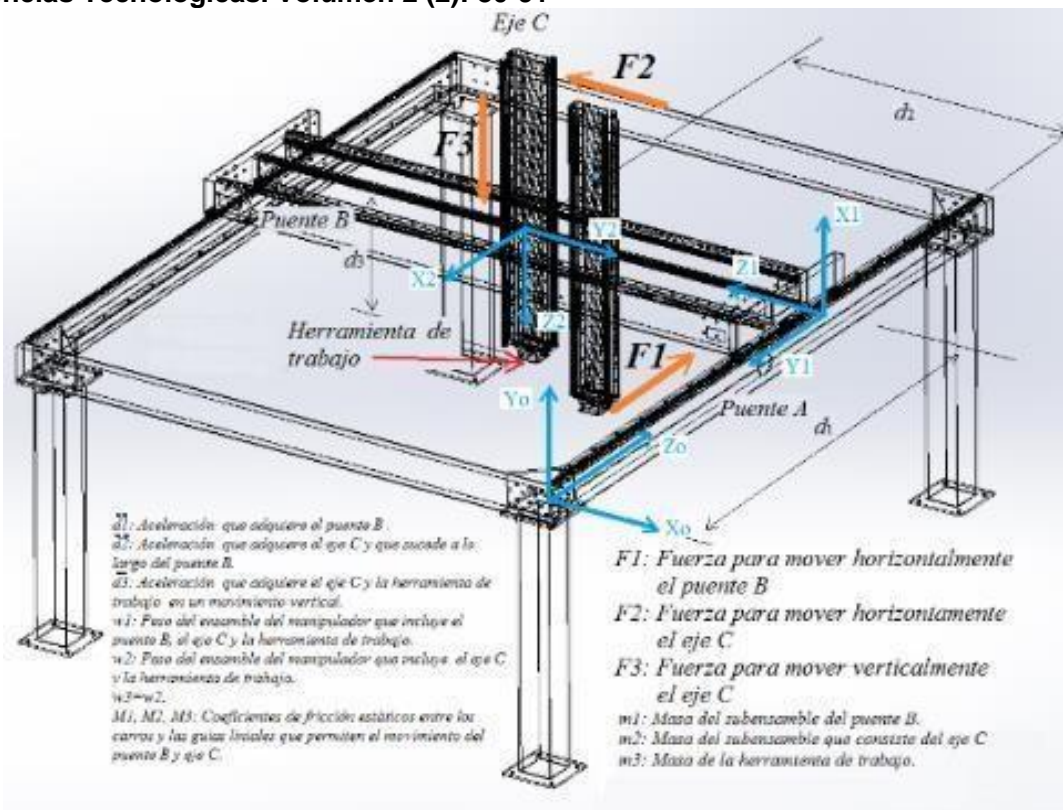


Figura 10. Diagrama para el análisis dinámico.

Resultados

Después de realizar los análisis CAE de todos los componentes y de seleccionar las mejores propuestas

de diseño, se llegó a los datos mostrados en las tablas 3, 4 y al CAD final del manipulador el cual es mostrado en la figura 11.

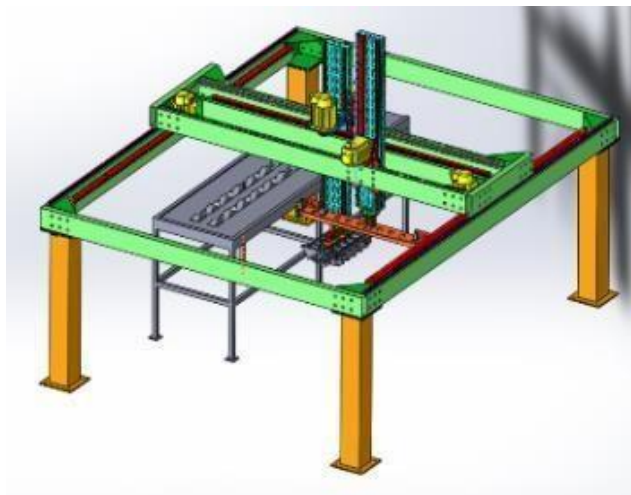


Figura 11. CAD final del manipulador.

$$L = \frac{1}{2}m_1d_1^2 + w_1\mu_1d_1 + \frac{1}{2}m_2(d_2^2 + d_1^2) + w_2\mu_2d_2g + \frac{1}{2}m_3(d_3^2 + d_2^2 + d_1^2) + w_3\mu_3d_3 - m_3d_1g \quad (4)$$

Al desarrollar la ecuación (4) de acuerdo a la ecuación (3), quedan las ecuaciones (5), (6) y (7).



$$F_1 = (m_1 + m_2 + m_3)\ddot{d}_1 + w_1\mu_1 \quad (5)$$

$$F_2 = (m_2 + m_3)\ddot{d}_2 + w_2\mu_2 \quad (6)$$

$$F_3 = (m_3)\ddot{d}_3 + w_3\mu_3 - m_3g \quad (7)$$

Sustituyendo los valores de las masas, pesos (encontrados en la simulación CAE) y coeficientes de fricción en las ecuaciones (5), (6) y (7) se tiene:

$$F_1 = 396.24\ddot{d}_1 + 19.43 \quad (8)$$

$$F_2 = 58.84\ddot{d}_2 + 2.88 \quad (9)$$

$$F_3 = 15.21\ddot{d}_3 - 149.21 \quad (10)$$

Donde F_1 y F_2 son las fuerzas necesarias para mover el puente B y eje C en sentido horizontal y F_3 es la fuerza para mover el eje C de forma vertical. Todas las fuerzas son una función de las aceleraciones d_1 , d_2 y d_3 .

Se considera que un componente mecánico fallará

cuando existe alguna de las siguientes condiciones:

- a) el esfuerzo que se genera dentro del componente mecánico cuando está trabajando sobrepasa el esfuerzo de fluencia del material del que está hecho,
- b) la máxima deformación del componente alcanza un valor que impide la correcta función de la parte,
- c) la vida del componente esta por abajo de lo pronosticado. Para el caso específico del manipulador, el cliente necesita que las piezas tengan un factor de seguridad por arriba de 6 unidades, la deformación máxima permitida para que no exista interferencia con el casting debe ser menor de 0.200 mm, y finalmente todos los componentes deben tener vida infinita. Los factores de seguridad y las deformaciones mostradas en las tablas 3 y 4 están dentro de los requerimientos del cliente, lo mismo sucede con los ciclos de vida ya que se encuentran dentro del rango de vida infinita.

Tabla 3. Resumen de los resultados CAE de las mejores propuestas de diseño

Componente	Esfuerzo mayor (Mpa)	Desplazamiento mayor (mm)	Factor mínimo de seguridad	Ciclos de vida (1×10^4)
Morzada 1 de sujeción del casting	12.67	0.02304	19.74	Vida infinita
Morzada 2 de sujeción del casting	9.23	0.01679	27.08	Vida infinita
Morzada 3 de sujeción del casting	3.435	0.006248	72.78	Vida infinita
Gripper de sujeción para casting	15.43	0.1817	16.2	Vida infinita
Cople entre gripper y eje vertical movimiento casting	1.168	0.001287	214	Vida infinita
Eje vertical de movimiento casting	10.74	0.005924	23.28	Vida infinita
Cremallera eje movimiento casting	1.8	0.00365	23	Vida infinita
Piñon para el movimiento eje del casting	21.14	0.00067	19.63	Vida infinita
Placa de soporte del motor para el movimiento vertical del casting	21.53	0.05278	11.61	Vida infinita
Eje horizontal de soporte para el eje de movimiento vertical casting	18.11	0.06816	13.81	Vida infinita
Placa soporte del motor para el movimiento horizontal del casting	13.24	0.07879	18.88	Vida infinita
Mordaza del equipo vacío	10.3	0.01748	24.28	Vida infinita
Gripper para el movimiento de equipo vacío	8.31	0.1425	30.08	Vida infinita
Cople entre gripper y eje vertical movimiento charolas	9.24	0.01	27	Vida infinita
Eje vertical de movimiento charolas	16.56	0.00904	15.1	Vida infinita
Piñon para el movimiento eje del casting	27.81	0.000878	14.92	Vida infinita
Placa de acoplamiento y base del motor para las charolas	0.141	0.06065	17.74	Vida infinita



Componente	Esfuerzo mayor (Mpa)	Desplazamiento mayor (mm)	Factor mínimo de seguridad	Ciclos de vida (1×10^6)
Eje horizontal de soporte para el movimiento vertical de las charolas	32.11	0.111	7.786	Vida infinita
Eje móvil central vertical y soporte para eje movimiento del casting	22.03	0.04125	11.35	Vida infinita
Placa de escuadra y unión de ejes centrales móviles	4.796	0.003121	52.12	Vida infinita
Soporte lateral horizontal 1 que une los 3 ejes horizontales	19.08	0.01357	13.1	Vida infinita
Soporte lateral horizontal 2 que une los 3 ejes horizontales	17.72	0.01121	14.1	Vida infinita
Viga horizontal corta que sujeta columnas	4.929	0.03588	50.72	Vida infinita
Placas de unión de vigas horizontales extendidas y cortas que sujetan columnas	0.3479	0.000262	718.7	Vida infinita
Columnas principales de la estructura	17.2	0.01275	14.54	Vida infinita
Base del cilindro para movimiento de mordaza de charola	8.1	0.0055	30.86	Vida infinita
Base del cilindro para movimiento de mordaza 1 del casting	13.83	0.0051	18.08	Vida infinita
Base del cilindro para movimiento de mordazas 2 y 3 del casting	6.93	0.00281	36.03	Vida infinita
Horquilla de cilindros neumáticos	5.73	0.00036	43.61	Vida infinita
Soporte cuadrado y base del motor	3.89	0.0171	64.22	Vida infinita
Viga horizontal corta que sujeta columnas.	4.929	0.03588	50.72	Vida infinita
Perno de mordaza para casting	7.232	0.02018	34.57	Vida infinita
Perno sujeción mordaza y horquilla	11.51	0.04285	21.72	Vida infinita
Perno de ensamble entre cilindro y base	2.998	0.01148	83.4	Vida infinita
Perno sujeción base del gripper y mordaza de charolas	3.756	0.002021	66.56	Vida infinita

Los resultados de la dinámica del manipulador se explican mediante las ecuaciones (8), (9) y (10). Estas ecuaciones son lineales y las fuerzas necesarias para originar el movimiento están en función de las aceleraciones \ddot{d}_1 , \ddot{d}_2 y \ddot{d}_3 .

Tomando como referencia la figura 10 y las ecuaciones anteriores, se puede saber que a mayor aceleración del puente B o eje C, mayor será la fuerza requerida para originar el movimiento. Conociendo el valor de las fuerzas y el valor de los radios de los piñones de los motores, podemos saber los torques generados.

La figura 12 muestra el resultado del torque requerido por un motor para poner en movimiento horizontal al puente B a una determinada aceleración \ddot{d}_1 , de igual forma, la figura 13 muestra el resultado del torque necesario para poner en movimiento horizontal al eje C y finalmente la figura 14 para poner en movimiento vertical el mismo eje C.

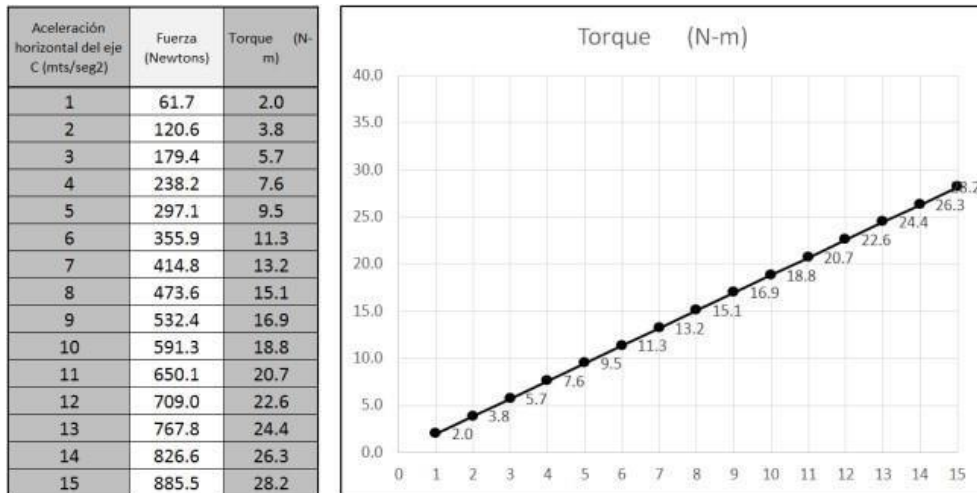


Figura 12. Resultado del torque del motor del puente B.

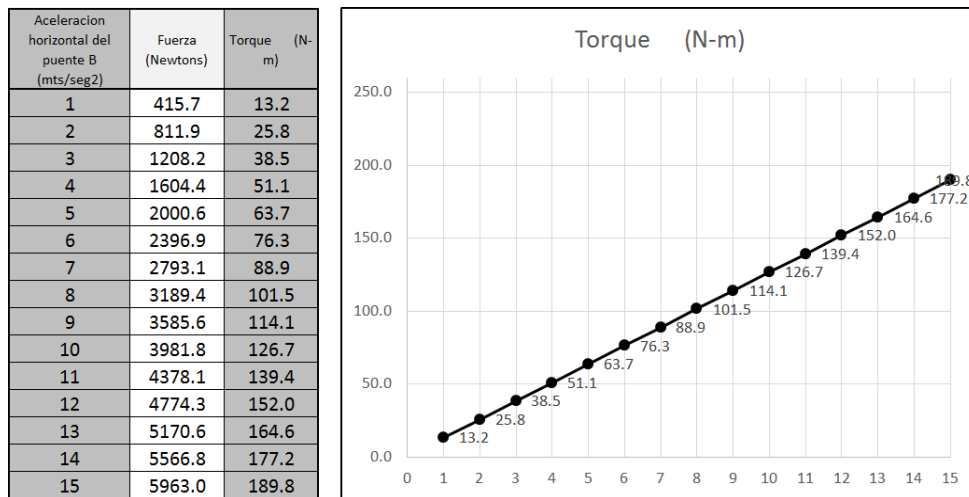


Figura 13. Resultado del torque del motor del eje C (Movimiento horizontal).

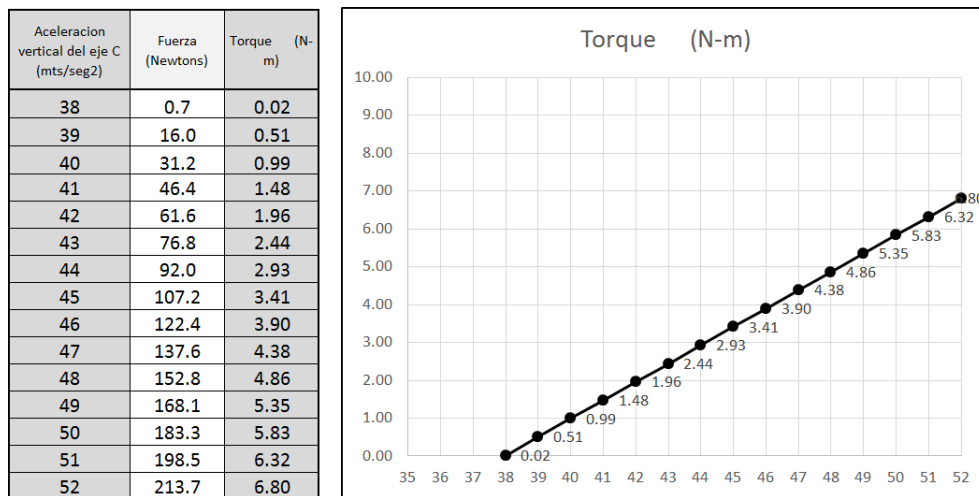


Figura 14. Resultado del torque del motor del eje C (Movimiento vertical).



Conclusiones

Para el diseño de un elemento mecánico del manipulador se deben considerar el factor de seguridad, la deformación y los ciclos de trabajo pronosticados. Para el caso específico de los componentes del manipulador los requerimientos del cliente fueron cumplidos. El uso del acero ASTM A- 36 redujo considerablemente el costo del proyecto y permitió homogenizar su uso para todos los componentes. La capacidad de los motores del manipulador estará en función de las aceleraciones del puente B y eje C. Se podrán seleccionar los motores tomando como referencia las figuras 12, 13 y 14. A mayor aceleración se necesitará mayor fuerza y por lo tanto mayor torque de los motores. La fuerza mínima y necesaria para mantener el movimiento del puente B y eje C es la indicada por las ecuaciones (5), (6) y (7) en ausencia de aceleración. Para la programación del

controlador en cuanto a la posición de la pinza o (“gripper”) y respecto a la posición “home”, se debe mantener la relación de las coordenadas cartesianas conforme a la expresión (2).

Referencias

- [1] F. Reyes-Cortes. *Robótica, control de robots manipuladores*, Editorial Alfa Omega, México, primera edición, 2011.
<https://www.alfaomega.com.mx/default/catalogo/profesional/robotica-control-de-robots-manipuladores.html>
- [2] R. L. Norton. *Diseño de máquinas un enfoque integrado*, Editorial Pearson, México, cuarta edición, 2011.
<https://www.pearsoneducacion.net/ecuador/tienda-online/dise%C3%B1o-maquinas-norton-4ed-ebook1>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato — y Adaptar el documento — remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)