



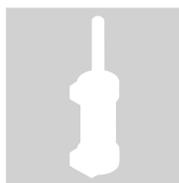
Tierra,
Medio Ambiente
y Energía

Ingeniantes

Diseño de un cilindro neumático de CPVC, con potencial para su uso en exoesqueletos mecánicos de bajo costo

RESUMEN: En los últimos años algunas organizaciones han apostado por el desarrollo de exoesqueletos, enfocados en el mejoramiento o asistencia de la movilidad y en casos de rehabilitación; en estos, el diseño de bajo costo, los materiales y las técnicas de fabricación juegan un papel importante. En este trabajo se presenta el diseño de un cilindro neumático de CPVC, se realiza un análisis por el método de elemento finito para determinar su viabilidad como actuador en exoesqueletos mecánicos de mayor asequibilidad. Para asegurar lo anterior se han considerado los estudios estáticos lineales, no lineales, factor de seguridad y fatiga, con el fin de comprobar la distribución de esfuerzos, las deformaciones máximas, su nivel de seguridad, su vida útil y el porcentaje de daño provocado por el número de ciclos de operación. Los resultados obtenidos indican que es factible utilizar el CPVC como material potencial para la manufactura de actuadores neumáticos, reduciendo con ello el costo de los componentes y costo de manufactura comparado con el de tecnologías para el mismo fin, extendiendo con ellos el catálogo de opciones para obtener un cilindro neumático funcional que amplía la cobertura de aplicaciones en el mercado.

PALABRAS CLAVE: Análisis, Cilindro neumático, CPVC, Exoesqueleto, MEF.



Colaboración

Marcos López González; Erick Gómez Hernández; Uzias Edrei Cortes Sánchez; Daniel Márquez Trejo; Luis Alberto Villaseñor Rivera, Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla

ABSTRACT: In recent years some organizations have opted for the development of exoskeletons, focused on the improvement or assistance of mobility and in cases of rehabilitation; in these, low-cost design, materials and manufacturing techniques play an important role. In this paper the design of a pneumatic cylinder of CPVC is presented, an analysis by the finite element method is performed to determine its viability as an actuator in mechanical exoskeletons of greater feasibility. In order to assure the above, linear, nonlinear static studies, safety factor and fatigue have been considered, in order to verify the distribution of stresses, the maximum deformations, their safety level, their useful life and the percentage of damage caused by the number of cycles of operation. The results obtained indicate that it is feasible to use CPVC as a potential material for the manufacture of pneumatic actuators, thereby reducing the cost of components and manufacturing cost compared to that of technologies for the same purpose, thus extending the catalog of options for obtain a functional pneumatic cylinder that extends the coverage of applications in the market.

KEYWORDS: Analysis, Pneumatic cylinder, CPVC, exoskeleton, FEA.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con datos mostrados en INEGI 2014, tan sólo 7.1 millones de habitantes a nivel nacional sufre algún tipo de discapacidad, esto es el 6% del total de la población, por lo que podemos también saber que el 64.1% de estos habitantes vive con la discapacidad de caminar, subir o bajar usando sus piernas [1]. Otro factor importante es la edad, ya que de 1990 a 2017 la población de adultos mayores aumento del 6.4% al 10.5% y se

espera que en el 2050 aumente al 21.5% del total de habitantes [2], por lo que el uso de exoesqueletos para atender esta discapacidad podría aumentar al paso del tiempo, esto requerirá el uso de materiales alternativos en la construcción de las diferentes partes de estos mecanismos, lo que ayudará a reducir el costo de los exoesqueletos. Dentro de los elementos más importantes se encuentran los cilindros o actuadores por lo que esta propuesta busca reducir el costo a través de la manufactura de estos con nuevos materiales como el CPVC, lo que haría más asequible la obtención de un exoesqueleto. En las últimas décadas empresas e instituciones educativas de nivel superior como UNAM, IPN, CINVESTAV, ITESM - INDI Ingeniería y Diseño - WeaRobot, entre otros [3-6]; han incursionado en la fabricación de dispositivos que asisten el movimiento de las extremidades del cuerpo, tal es el caso de los exoesqueletos, donde el movimiento del mecanismo se obtiene mediante la implementación de actuadores lineales, este hecho repercute directamente en el costo de cada dispositivo. En el caso que se presenta es esencialmente importante la tecnología neumática ya que se diseña un actuador lineal a base de un material termoplástico. El CPVC puede ser incursionado como material de manufactura, ya que comparado con un cilindro de características similares manufacturado por las marcas más reconocidas en el país tiene un costo de apenas el 25% y bien puede ser utilizado en el desarrollo de diversos exoesqueletos para extremidades inferiores o para extremidades superiores [7].

El sistema de movimiento presentado por Homayoon Kazerooni et al [8], donde el dispositivo lleva el nombre de pierna generadora de energía Figura 1.

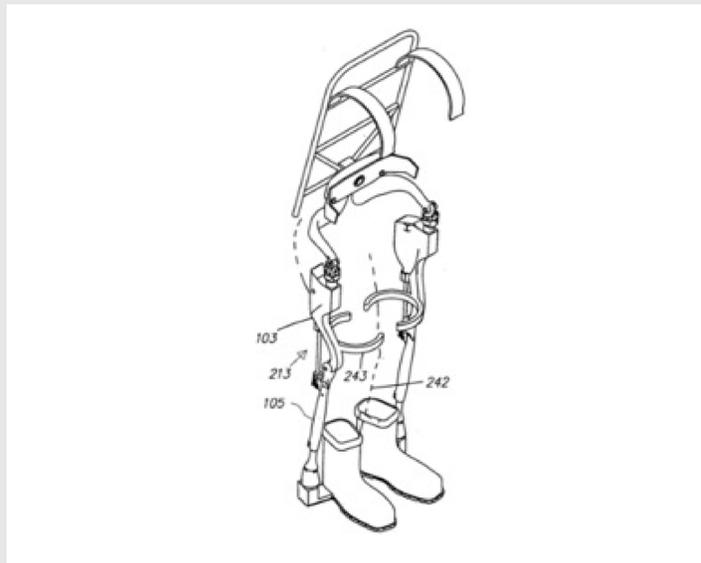


Figura 1. Exoesqueleto "Pierna Generadora de energía", Patente con número de publicación CA2645319 A1.

Consta de un conjunto de eslabonamientos verticales enlazados, donde el movimiento se realiza a través de un enlace partiendo de una sujeción del actuador a la altura de la cadera dirigido hacia el extremo inferior del mecanismo de la rodilla. El vástago del actuador queda de enlace entre estos dos elementos donde permite la flexión y extensión de los movimientos de dicho muslo y enlace del vástago con respecto al otro; consta de igual manera de un soporte lumbar y sujeciones para adaptarse al cuerpo humano.

Otro sistema de exoesqueleto es el desarrollado por Nathan Harding et al [9], se compone por un soporte lumbar conectado a un primer y segundo soporte de la pierna, posee actuadores que permiten el movimiento en la cadera, un soporte lumbar con contrapeso que incluye una masa auxiliar al exoesqueleto, de igual manera posee actuadores en las articulaciones de rodilla para llevar a cabo la extensión y flexión del miembro.

El exoesqueleto de extremidad inferior propuesto por Homayoon Kazerooni et al [10], propone un sistema configurable para ser acoplado a una persona, incluye soportes de piernas y está diseñado para descansar en el suelo durante las fases de postura, cada soporte tipo actuador tiene un enlace del muslo y un enlace de vástago Figura 2.



Figura 2. Exoesqueleto "Dispositivo y método para disminuir el consumo de energía de una persona, mediante el uso de un exoesqueleto de extremidad inferior", Patente con número de publicación WO/2009/143161.

Este exoesqueleto cuenta con dos articulaciones de rodilla, cada uno configurados para permitir la flexión, los actuadores de la cadena están situados en posición opuesta al eslabonamiento del muslo, el tronco de exoesqueleto es adaptable a la parte superior del cuerpo de usuario. Otro caso de un exoesqueleto de

extremidad inferior fue desarrollado por Little Richard e Irving Robert Alexander [11] Figura 3. Este sistema comprende un miembro de soporte rígido con un arnés pélvico y un par de eslabones de soporte de la pierna, consta de un actuador situado en la cadera, un actuador de rodilla y un actuador de pie principal.

Etapa 4. Resultados y conclusiones.

Se discute el comportamiento mostrado por el cilindro propuesto bajo la carga seleccionada, se discuten los beneficios esperados con el diseño propuesto y se concluye con el análisis de los datos arrojados por los estudios aplicados Figura 4..

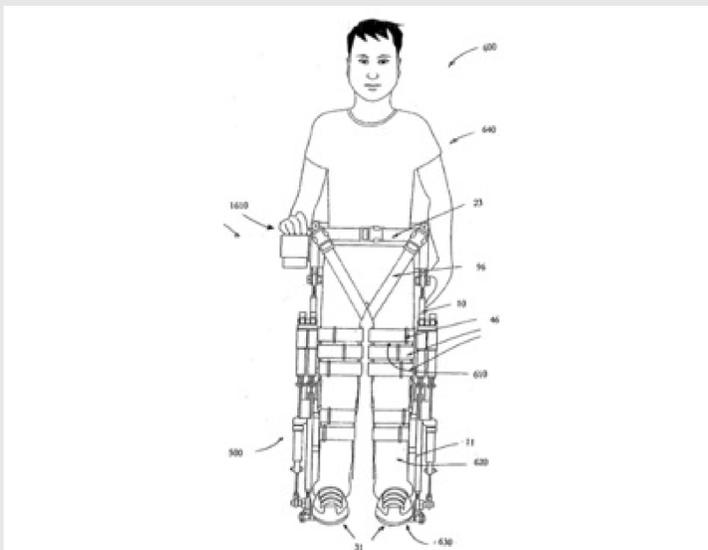


Figura 3. Exoesqueleto "Exoesqueleto de alimentación autónoma para un usuario con discapacidad", Patente con número de publicación US20110066088 A1.

METODOLOGÍA

Con la finalidad de cumplir con la propuesta presentada en este trabajo, se expone el desarrollo secuencial de las siguientes etapas:

Etapa 1. Comparación técnica del Al y el CPVC.

Con la comparación entre el aluminio y el CPVC bajo un criterio técnico y económico, se pretende dar a conocer las características con las cuales se trabajará en las secciones posteriores, así como la diferencia entre los precios actuales en el mercado local de ambos materiales.

Etapa 2. Propuesta del actuador lineal.

Se procede a realizar la propuesta de diseño definitivo del actuador lineal. Se editan las propiedades del material analizado, asignando las características mecánicas necesarias tales como: Módulo de Young, Módulo de Poisson y Limite elástico, entre otros. Se ha elegido el software SolidWorks® como herramienta de diseño y análisis.

Etapa 3. Caracterización y condiciones de frontera.

Con el diseño esquemático definitivo se procederá a explicar las condiciones generales bajo las cuales se ensayará el actuador neumático propuesto, considerando sus condiciones de trabajo y su aplicación potencial.

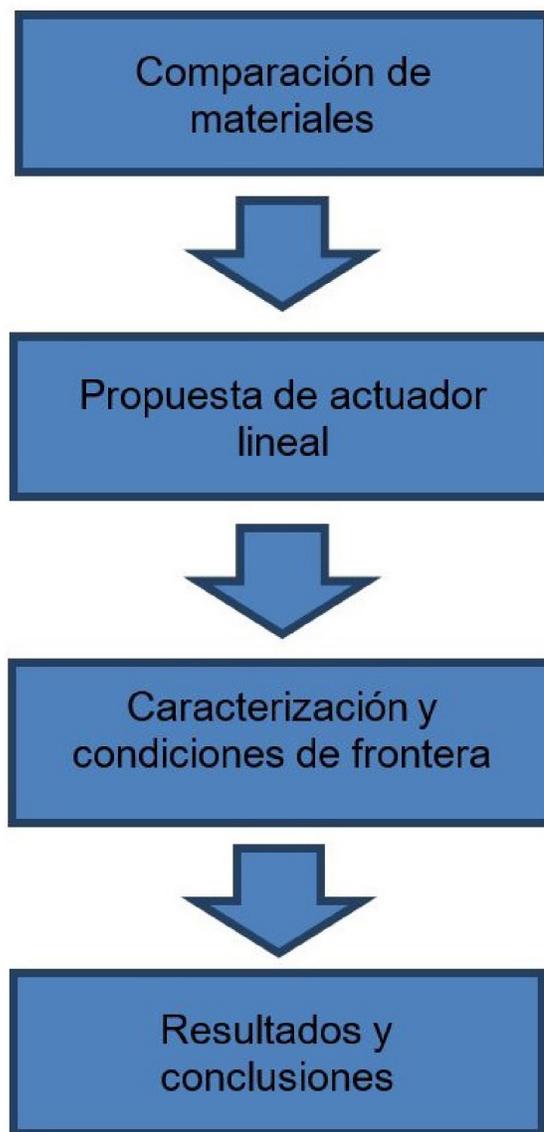


Figura 4. Diagrama de flujo de proceso metodológico.

RESULTADOS

Comparación de materiales

Para la manufactura de los actuadores lineales se decidió comparar al aluminio con respecto al CPVC debido a que el aluminio es empleado con frecuencia en la manufactura de actuadores lineales de tecnología neumática. Los materiales anteriores se compararon con base en dos criterios: costo y resistencia mecánica.

Tabla 1. Comparativo de propiedades mecánicas y precio del CPVC - Aluminio.

Propiedades mecánicas	CPVC	Aluminio	Unidades
Módulo Elástico	2500	6900	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.365	0.33	N/D
Módulo Cortante	318.9	27000	N/mm ²
Densidad de masa	1560	2700	kg/mm ³
Límite de tracción	55	68.9356	N/mm ²
Límite de compresión	70	-	N/mm ²
Límite elástico	300	27.5742	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	0.61	2.4e-005	/K
Conductividad térmica	0.14	200	W/m*K
Calor específico	1386	900	J/kg*K
Costo por pieza	150.00 / 6 metros	160.00/1m	MNX

Con base en los datos que se presentan en la Tabla 1 se pueden identificar a priori dos características fundamentales para el estudio. La primera de ellas muestra que la diferencia en el módulo elástico del CPVC representa un 36% del valor correspondiente al aluminio, mientras que el límite elástico de CPVC es 10.8 veces mayor comparado con el aluminio. Lo anteriormente descrito muestra que la relación de características del termoplástico que se presenta y sus ventajas como material en instalaciones hidráulicas, tales como su equilibrio entre resistencia y flexibilidad, aceptable resistencia a altas presiones por tiempos prolongados, alta resistencia a la corrosión, su bajo peso en comparación con el aluminio, su aceptable resistencia a la tracción y el impacto y su bajo costo [12]; pueden favorecer la respuesta del material en la aplicación que se propone.

Propuesta de actuador lineal.

El actuador neumático se diseñó de acuerdo con la carga de trabajo, la cual se propuso en función de un estudio realizado por la CANAIVE (2012) [13], en donde se obtiene el peso promedio de 78.4 kg para un mexicano que radica en la zona centro del país. El peso considerado para el estudio es superior al ob-

tenido por la CANAIVE, siendo este de 100 kg, la razón radica en la posibilidad de que del 2012 a la fecha el peso de una persona puede haber incrementado notablemente. Sumado a lo anterior, de acuerdo con Creus [14] se ha considerado un incremento al valor de la fuerza teórica calculada debido al rozamiento del pistón en su movimiento, el cual equivale a un valor comprendido entre el 3% y 10%.

Para determinar el diámetro del émbolo se utilizó la Ec. (1) [15] y en seguida se calculó el diámetro del vástago considerando el esfuerzo límite de tracción con Ec. (2), posteriormente se calculó la magnitud de su elongación con Ec. (3), para asegurar que su incremento de longitud es aceptablemente pequeño, con lo anterior se procedió a seleccionar su dimensión nominal del catálogo de perfiles tubulares comerciales de EMMSA [8].

$$F = P_{aire} * \pi * \left(\frac{D^2}{4}\right) \quad \text{Ec(1)}$$

Donde:

F: Fuerza en Newton [N].

D: Diámetro del émbolo [m].

Paire: Presión del aire [Pa].

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ec(2)}$$

Dónde:

σ : Esfuerzo [Pa]

F: Fuerza [N]

A: Área [m²]

$$\delta = \frac{F * L}{A * E} \quad \text{Ec(3)}$$

Dónde:

δ : Incremento de longitud [m]

F: Fuerza [N]

L: Longitud inicial [m]

E: Módulo de Young [Pa]

A: Área [m²]

Con base en los cálculos realizados con Ec. (3), se determinó que el incremento de longitud es de 2.03E-03 mm, lo que se ha considerado aceptable para la aplicación propuesta, tomando en cuenta que los procesos de manufactura convencionales de torneado y fresado pueden proporcionar precisiones de maquinado de 1E-03 in o bien 1E-02 mm. En la Tabla 2 se resumen las características del actuador lineal. Las dimensiones mostradas corresponden a los valores comerciales más cercanos a los calculados, encontrados en el catálogo de EMMSA para tuberías de CPVC cédula 80.

Tabla 2. Dimensiones del actuador de doble efecto.

Características	Dimensiones
Diámetro interior de la camisa del actuador	2 in
Diámetro émbolo	2 in
Diámetro vástago	0.5 in
Longitud útil del vástago.	4 in
Carrera requerida del vástago.	4 in
Factor de pandeo	2

Con relación a las características y dimensiones obtenidas se propuso el esquema definitivo mostrado en la Figura 5. La camisa, el émbolo, las bridas y el vástago están simulados en CPVC.

Del esquema propuesto en la Figura 6 se muestra un despiece del actuador lineal, mostrando las diferentes partes que lo conforman.

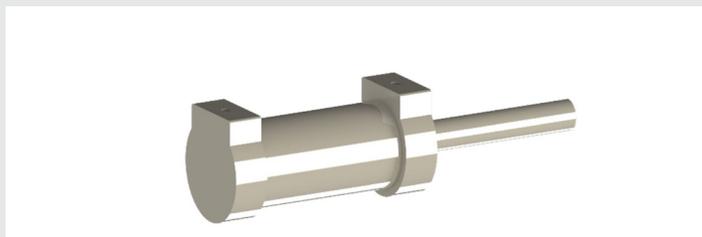


Figura 5. Actuador lineal esquema definitivo.

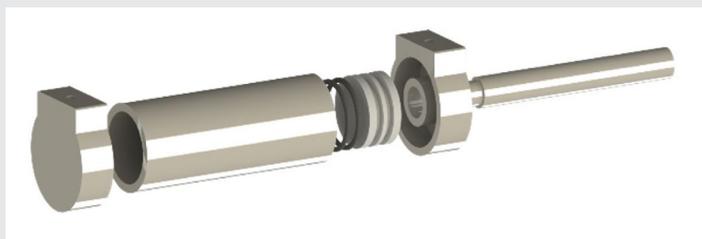


Figura 6. Despiece de actuador lineal.

Caracterización y Condiciones de Frontera.

Una vez desarrollado el diseño esquemático definitivo se procede a realizar los análisis computacionales de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos, factor de seguridad y vida útil para determinar el comportamiento del cilindro neumático propuesto. Las condiciones generales de mallado para todo el ensamble se muestran en la Tabla 3, por considerar que hay componentes críticos en el ensamble se han considerado dos niveles de mallado.

Tabla 3. Características generales de mallado para el análisis estático.

Nombre de estudio	Análisis estático Cilindro CPVC (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	Desactivar
Control de malla	Definida
Tamaño máx. de elemento	0 mm
Tamaño mín. de elemento	0 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	347066
Número total de elementos	219717
Cociente de aspecto máximo	7.0463
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99.9
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	100
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:07
Nombre de computadora	

La discretización del cilindro propuesto se ha resuelto previendo una mayor concentración de esfuerzos en la camisa y el vástago del cilindro. Lo anterior tiene fundamento en el hecho de que será el vástago el encargado de movilizar la carga asignada en este caso de estudio, mientras que la camisa será la más expuesta a la presión de trabajo de 6 bar; por lo que se ha decidido dividir el ensamble en dos grupos de componentes, identificados en la Tabla 4 como primarios y secundarios; por una parte, para el grupo A compuesto por el vástago y la camisa se ha optado por un mallado fino, mientras que para el resto de los componentes pertenecientes al grupo B se ha asignado una malla más gruesa.

Tabla 4. Detalle de las características por grupo de los controles de malla aplicados al modelo. (a) Mallado para elementos secundarios. (b) Mallado para elementos primarios.

Nombre de estudio	Análisis estático Cilindro CPVC (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Entidades	5 componente(s)
Unidades	mm
Tamaño	7.98161
Coficiente	1.5
Identificador	1

(a)

Nombre de estudio	Análisis estático Cilindro CPVC (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Entidades	2 componente(s)
Unidades	mm
Tamaño	5.34429
Coficiente	1.5
Identificador	2

(b)

En la Figura 7 se han representado las diferentes condiciones de la simulación, tales como la distribución uniforme de la fuerza que ejerce el peso máximo propuesto, que se aplica al extremo libre del vástago.

Se eligieron fijaciones en las bridas para facilitar el proceso de simulación. Se ha considerado también la acción de la gravedad y la presión interna de 6 bar.

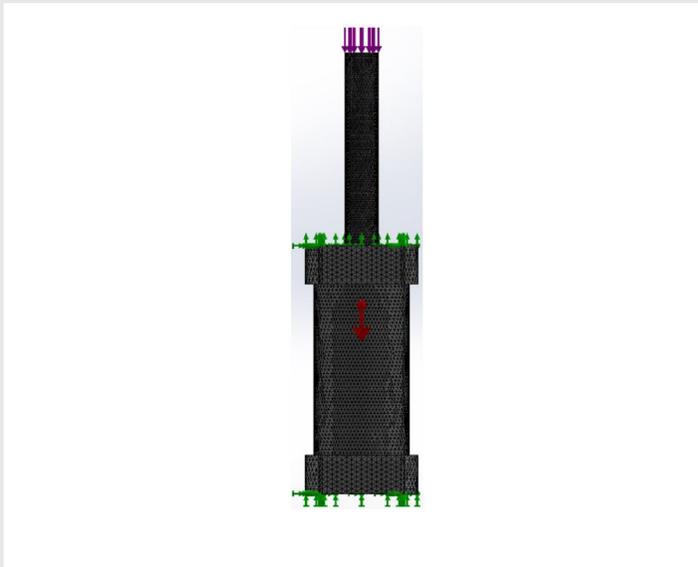


Figura 7. Discretización del modelo. Se presenta la aplicación del control de malla. Un malla más fino ha sido aplicado a la camisa y al vástago.

El comportamiento observado en la Figura 8 corrobora una distribución promedio de los esfuerzos que va de $2.4 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ predominantemente en la camisa, a $4.1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ con mayor presencia en el vástago. La brida superior e inferior no presentan una respuesta evidente, lo cual corresponde con el comportamiento esperado y justificando con ello la diferenciación de la malla aplicada. En la parte interna del asiento del vástago se han distribuido los esfuerzos desde el promedio presentado en el vástago hasta el valor mínimo mostrado en la escala de valores. Puede considerarse que el cilindro se esfuerza en un rango aceptable.

Los desplazamientos provocados por la carga asignada tienen su mayor magnitud en $2.86 \times 10^{-1} \text{ mm}$, localizándose en la zona de aplicación. Esta magnitud disminuye gradualmente hasta presentar valores promedio de $9.0 \times 10^{-2} \text{ mm}$ principalmente en el émbolo. Lo anterior demuestra que tanto el material como el diseño general del cilindro responden satisfactoriamente al trabajo asignado Figura 9.

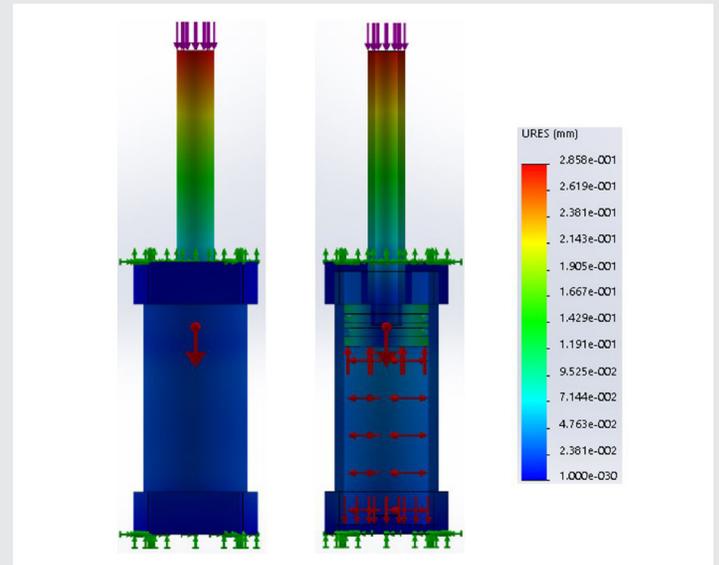


Figura 9. Detalle interno de las zonas en que se presenta una mayor concentración de esfuerzos.

Como parte del estudio estático se obtuvieron los resultados de la distribución del factor de seguridad (FDS) mostrado en la Figura 10. Se confirmó la eficiencia del diseño propuesto, al obtener valores promedio de 3.07×10^1 para todos los componentes.

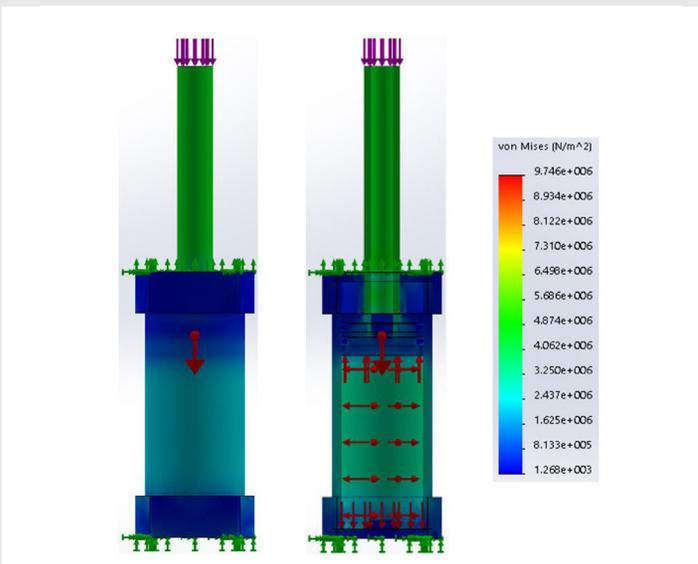


Figura 8. Distribución de esfuerzos Von Mises.

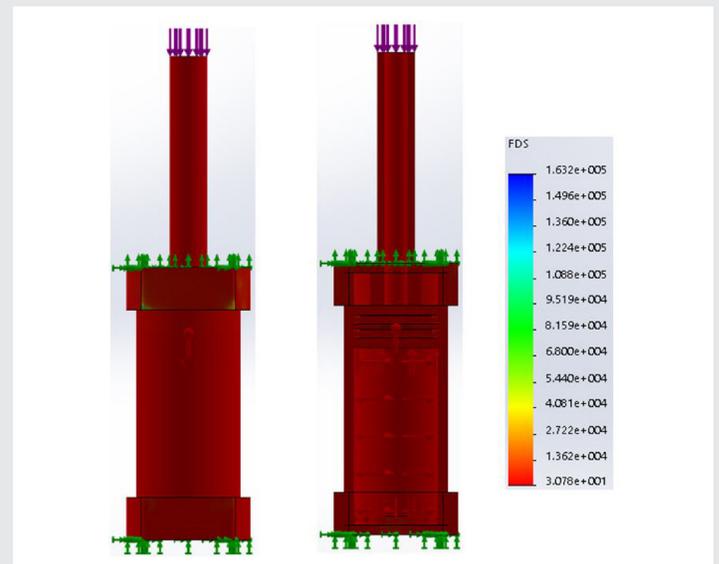


Figura 10. Resultados de la distribución del factor de seguridad.

Hasta esta etapa del análisis todos los resultados obtenidos muestran un comportamiento favorable del cilindro bajo las condiciones de carga máxima aplicada. Sin embargo, se ha considerado extender el estudio estático a un análisis dinámico para obtener el comportamiento del sistema bajo condiciones de fatiga.

En la Figura 11 se presenta el resultado del estudio dinámico a partir de las condiciones de frontera del estudio estático. En (a) se obtuvieron desplazamientos máximos de $1.45e-03$ mm mientras que la distribución de esfuerzos Von Mises muestra un valor medio predominante de $2.6e+03$ N/m² y con mayor presencia en el vástago. Ambos estudios confirman un diseño estable bajo las condiciones seleccionadas inicialmente.

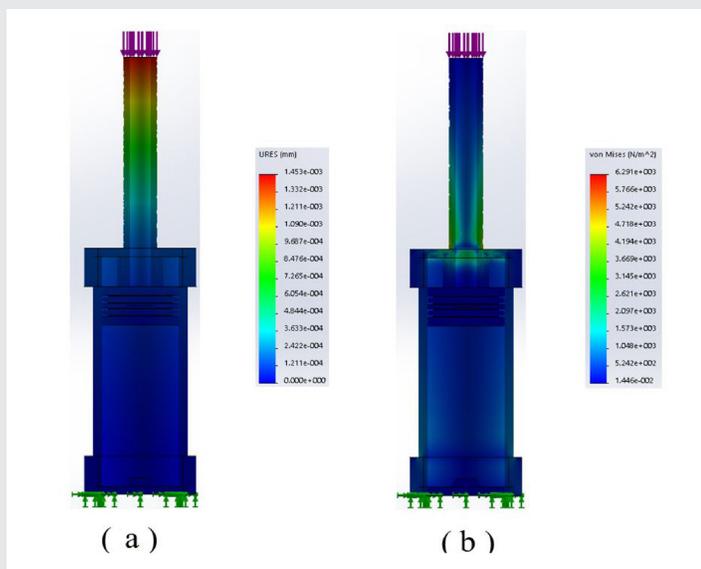


Figura 11. Resultados del análisis dinámico.
(a) Estudio de desplazamientos.
(b) Estudio de Esfuerzos Von Mises.

Para desarrollar el estudio de fatiga se realizó un análisis dinámico mediante sucesos de amplitud constante y ciclos definidos, de donde se ha obtenido la gráfica mostrada en la Figura 12.

Se ha considerado importante el estudio de fatiga para determinar la vida útil Figura 13 y el porcentaje de daño del sistema, proponiendo un uso promedio de 15768000000 ciclos de trabajo. La cantidad de ciclos se estimó a partir de una frecuencia de 1 ciclo por segundo para aplicaciones generales, garantizando su integridad por cinco años.

En la Figura 13 se puede observar que, para la cantidad de ciclos mencionada con anterioridad, se puede asegurar que la camisa presenta una vida útil muy por encima de lo esperado, y aunque el vástago tiende a mostrar un número inferior, este tiene un valor promedio de 10 veces mayor al estimado. Lo anterior

asegura un desempeño óptimo y confiable para su aplicación ininterrumpida con la frecuencia propuesta y con la carga máxima considerada.

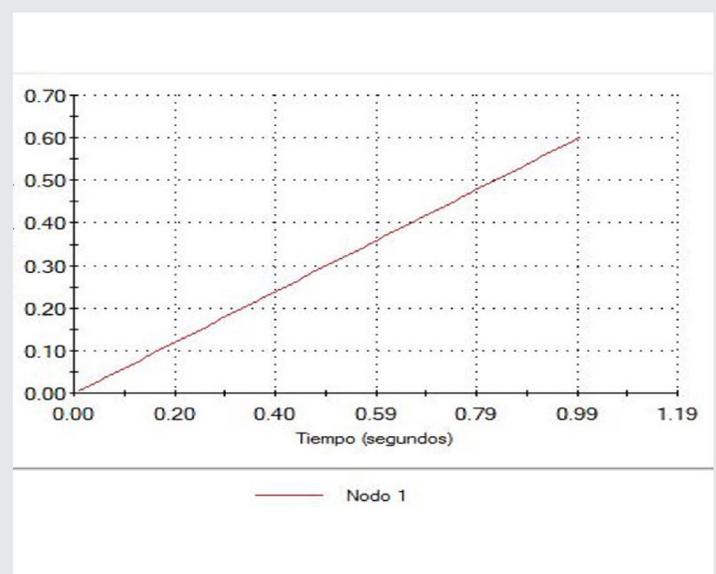


Figura 12. Información complementaria que muestra la relación $\sigma - t$ del estudio dinámico.

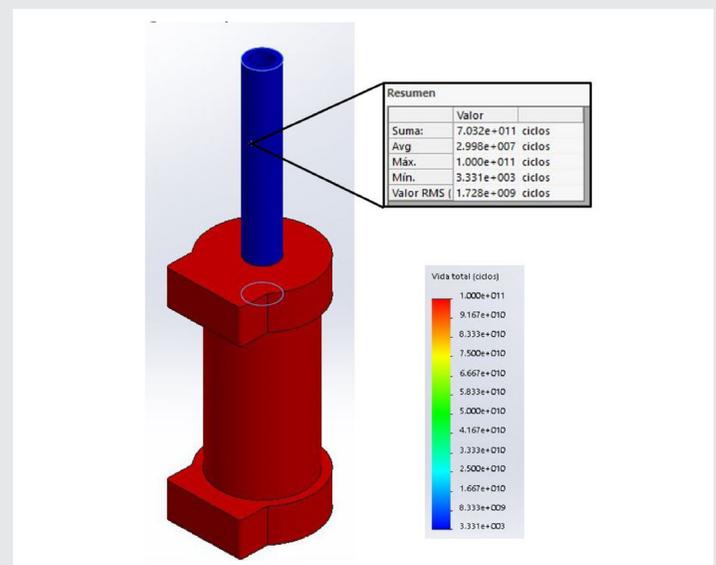


Figura 13. Resultados del estudio de Fatiga. Vida Útil.

En la Figura 14 se corrobora que el cilindro diseñado presenta un porcentaje de daño mínimo en el periodo de trabajo propuesto. En general el estudio de fatiga demuestra la aplicabilidad segura para propósitos generales en un periodo de 5 años, con frecuencia de 1 ciclo por segundo.

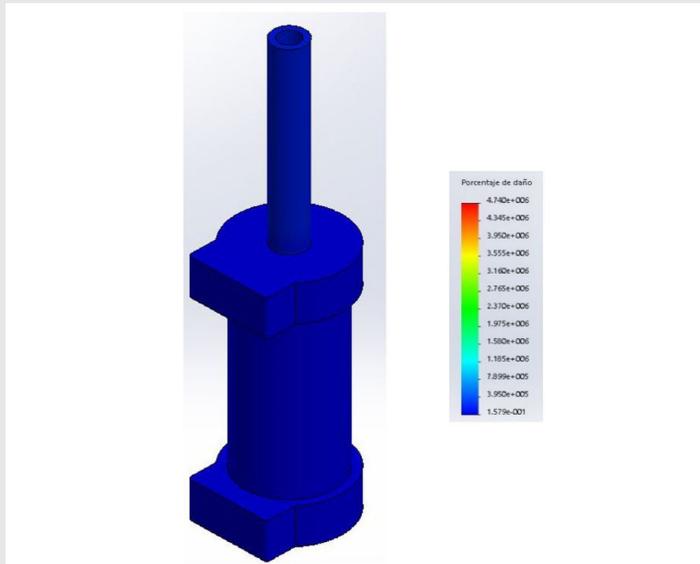


Figura 14. Resultado del estudio de fatiga. Porcentaje de daño.

CONCLUSIONES

Los resultados demuestran implícitamente una relación costo-beneficio de alta rentabilidad, para su manufactura y aplicación en diferentes sectores, tales como: Productivo, educativo y de rehabilitación. Dentro del ámbito de la rehabilitación se puede aportar a la asequibilidad de diversas prótesis que requieren uno o más de estos actuadores lineales, lo que abre la posibilidad de utilizar nuevos materiales para el desarrollo de estos componentes.

BIBLIOGRAFÍA

[1] La discapacidad en México, datos al 2014 (2016). INEGI. Obtenida 16 de abril de 2018. https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjz_P28t7_aAhWlu1MKHfobBL4QFgg2MAE&url=http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825090203.pdf&usg=AOvVaw24m1L-FZXJi-y71BdrskUJM

[2] Estadísticas a propósito del día mundial de la población, (2017) INEGI. Obtenida 16 de abril de 2018. http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2017/poblacion2017_Nal.pdf

[3] Luna, M. M.; Rodríguez, C. A. (2015). Diseño Mecánico de un exoesqueleto de cadera y rodilla. México D. F.: Autor.

[4] Ayala, J. F. (2015). Diseño mecánico de un exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior. Revista Colombiana de Biotecnología, 17

(1). Consultada 16 de abril de 2018. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/44188/51976>

[5] Parga, C. R. (2018). Diseño de un exoesqueleto para hombro humano y controlado por su modelo de movimiento. Ciudad de México: Autor. <http://www.ctrl.cinvestav.mx/xyuw/pdf/DoCP.pdf>

[6] Mexicanos desarrollan exoesqueletos para rehabilitación (2015). Obtenida 16 de abril de 2018, de la página electrónica: <http://www.eluniversal.com.mx/articulo/techbit/2015/09/10/mexicanos-desarrollan-exoesqueletos-para-rehabilitacion>.

[7] Chávez M. A., Rodríguez F., Baradica A. "Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación". Revista Ingeniería Biomédica, volumen 4, número 7, enero-junio (2010), págs. 63-73.

[8] Homayoon Kazerooni., Adam Zoss., Nathan Harding y Rusndon Angold., (2011). US 11-716,135., Power generating leg, US7883546 (B2). Lugar: Estados Unidos., Espacenet.

[9] Nathan Harding, Kurt Amundson, Jon Burns, Rusndon Angold, Adam Zoss y Homayoon Kazerooni, (2013). US 13/639,984., Exoskeleton load handling System and Method of Use., US2013303950 (A1). Lugar Estados Unidos, Espacenet.

[10] Homayoon Kazerooni., Kurt Amundson y Nathan Harding, (2015). US 14/605,343, Device and Method for Decreasing energy Consumption of a Person by Use of a Lower Extremity Exoskeleton., US2015134078 (A1), Lugar: Estados Unidos, Espacenet.

[11] Little Richard y Irving Robert Alexander, (2011). US 12/801,809, Self contained powered exoskeleton walker for a disabled user, US2011066088 (A1), Lugar: Estados Unidos, Espacenet.

[12] Diferencia entre tuberías PVC y CPVC, (2016) Expotile. Obtenida el 16 de abril de 2018. <http://expotile.com.mx/diferencia-entre-tuberias-pvc-y-cpvc/>

[13] CANAIVE (2012).

[14] Creus A., Enero (2011), Neumática e hidráulica, México, Alfaomega Grupo Editor.

[15] Primaflow., Sistema de tuberías y conexiones CPVC, México, (Consultado el 17 de marzo de 2017).