# Diseño y Simulación por Elemento Finito de un Sistema de Manufactura Adaptable Modular

Ing. Raúl Zúñiga Colín [1]

***Resumen*—**El diseño de diversos componentes es muy importante en los procesos actuales, desarrollar las pruebas netas del proceso de fabricación con la finalidad de asegurar que el producto cuente con las características para lo que fue diseñado, el análisis de elemento finito permite el desarrollo de simulaciones para efectuar pruebas y validar el sistema de manufactura adaptable modular.
***Palabras clave*—**Simulación, Diseño, análisis elemento finito.

## Introducción

Las cintas transportadoras son elementos auxiliares de las instalaciones, cuya misión es transportar, elevar o distribuir materiales hacia otro punto. Son aparatos que funcionan solos, intercalados en las líneas de proceso y que no requieren generalmente de ningún operario que las manipule directamente de forma continuada (RULMEKA). Son los bastidores los componentes más sencillos de las cintas, y su función es obviamente, la de soportar las cargas de material, banda, rodillos y las posibles cubiertas de protección contra el viento, entre el punto de alimentación y el de descarga del material (GERVASO, Octubre, 2013). Los rodillos son uno de los componentes principales de una cinta transportadora, y de su calidad depende en gran medida el buen funcionamiento de la misma (AENOR, Diciembre 1985). El motivo por el cual se desarrolla el sistema de manufactura adaptable modular ya que el Tecnologico Nacional de México campus Zitácuaro Michoacán no cuenta con un sistema de simulación de procesos, se busca desarrollar infraestructura real de un sistema que permita; adaptarse a los espacios con que se dispone, pueda tener modularidad, y permita ser fabricado con la finalidad de reducir costos comprados con los sistemas que existen actualmente en el mercado.

## Descripción del Método

*Propuesta de diseño*

Desarrollar un sistema de manufactura adaptable modular que permita adaptarse al espacios pequeños, reduciendo e incrementando su longitud y su vez cambie su altura, todo lo anterior buscando resistir cargas específicas.

Se realiza el diseño con la finalidad de reducir costos comparados con los sistemas que se encuentran en el mercado, el sistema se construirá de estructura PTR (Perfil Tubular Rectangular) de dos dimensiones distintas de 3”x1.5” y 2.5”x1.25”, placas de acero, tubos de acero, valeros, tubos tornillería en general. Para cumplir con la características de la altura se diseñó uniendo PTR de las dimensiones para que pudiera deslizarse una sobre otra (figura 1). Adicionalmente se diseña una placa que permita generar uno posición para que a la cama de rodillos le permite tener un grado de inclinación, esta placa se colocara en la parte superior del ensamble exterior ya que este ensamble es el que permitirá el incremento en la altura del sistema (figura 1). Para la característica de incremento longitudinal, se utiliza el mismo principio de extensión de altura, diseñando laterales que permitan la extensión de una longitud inicial de 150 centímetros a 200 centímetros (figura 2). Asu vez se ensamblaron 17 rodillos para conformar las base superior que permitirá el traslado de los productos. Se utilizaron dos ensambles laterales, dos ensambles de patas para conformar el módulo (figura 3).

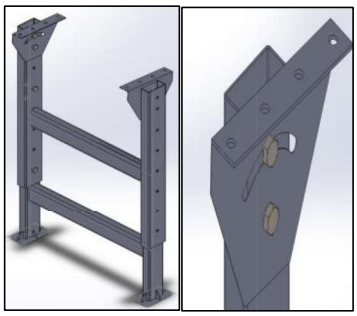


Figura 1 Ensamble patas-placa posición

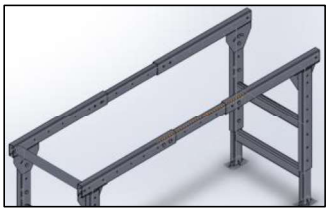


Figura 2 Laterales del módulo

Figura 3 Módulo

[1] Ing. Raúl Zúñiga Colín es estudiante de la Maestría en Manufactura Avanzada en el CIATEQ campus Querétaro rauzuc8220@gmail.com

*Análisis de elemento finito*

El método de los elementos finitos es un procedimiento numérico que se puede utilizar para obtener soluciones. El análisis de elementos finitos se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, está transformación se denomina discretización del modelo el conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpretación de los valores conocidos en los nodos es por tanto la aproximación de valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado finito de puntos (Moaveni, 2015).

El análisis de elemento finito se realiza por medio del software ANSYS con la finalidad de validar el diseño en cada uno de sus componentes para soportar la carga para el que fue diseñado 500 kg (4903.35 N).

Aplicando la metodología de elemento finito se inicia con un mallado tetraédrico general de 5mm, se establece una carga de 20,000 N superior a la establecida para el diseño ya que busca aplicar una carga extrema para asegurar la integridad estructural, para la carga total del módulo a su longitud máxima de 200 centímetros. Para el análisis de los rodillos se aplica el mallado general de 5mm, con una carga de 1176.5 N con una carga negativa en la carga Y ya que el diseño completo cuenta con 17 rodillos se dividen la carga entre ellos para determinar la carga individual, se colocan soportes fijos en las cara de las secciones de los laterales, los resultados obtenidos son los siguientes; deformación total máxima es de 0.093 mm (figura 5), máximo estrés principal es de 108.79 Mpa (figura 6), deformación elástica equivalente con un máximo 0.0005 mm/mm, factor de seguridad mínimo con estrés de 4.2283.

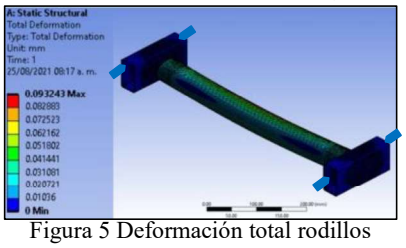



Figura 5 Deformación total rodillos

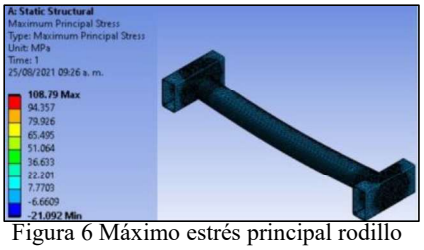



Figura 6 Máximo estrés principal rodillo

Análisis de parte lateral, se aplica un mallado de 5mm, carga de 10,000 N en este análisis se aplica únicamente a una parte lateral, se simula la carga en cada uno de los orificios que soporta a los rodillos, se le aplica un momento a cada barreno de -120 N en Z, se coloca soportes fijos en las cara de la secciones de las patas y en las caras de los laterales. Se obtienen los siguientes resultados; deformación total máxima para este análisis es 1.96 mm (figura 7), máximo estrés principal 218.41 Mpa (figura 8), deformación elástica equivalente con un máximo 0.0019 mm/mm, estrés equivalente 354.87 Mpa, factor de seguridad mínimo 2.1061.

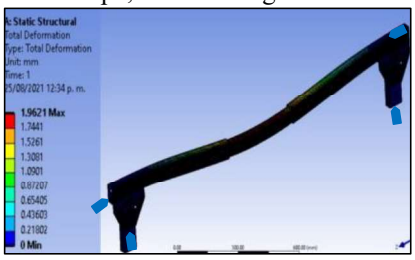



Figura 7 Deformación total lateral

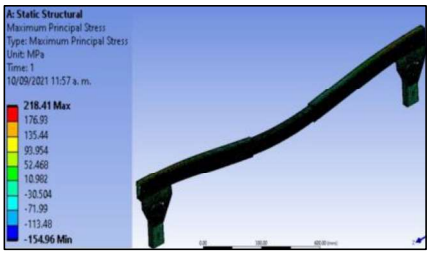



Figura 8 Máximo estrés principal lateral

Análisis de patas se aplica mallado de 5mm, carga de 10,000 N en este análisis se aplica únicamente la carga en los cuatro barreno en donde se colocara la placa de posición que soportaran a los laterales del módulo, se aplica soportes fijos a las bases de las patas. Los resultados del análisis son los siguientes; deformación máxima para este análisis es 0.631 mm (figura 9), máximo estrés principal 83.375 Mpa (figura 10), deformación elástica equivalente con un máximo 0.00076 mm/mm, estrés equivalente 152.94 Mpa, factor de seguridad mínimo 5.3879.

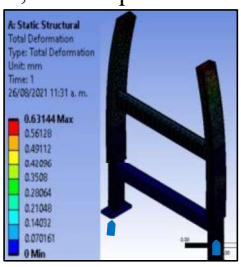



Figura 9 Deformación total patas

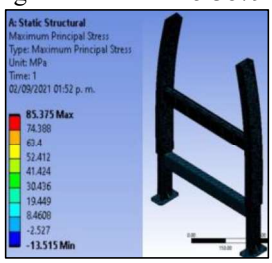



Figura 10 Máximo estrés principal patas

Análisis de Módulo completo se aplica mallado de 5 mm, carga de 20,000 N, la carga de aplica únicamente a las partes laterales, en los 34 barrenos que soporta a los rodillos para simular la carga en toda la superficie del módulo, adicionalmente se le aplica un momento a cada barreno de -120 N en Z, se colocan soportes fijos en las patas y en las cara en donde unirán los módulos para evitar movimiento en estas partes. Los resultados son los siguientes; deformación máxima 2.192 mm (figura 11), máximo estrés principal 290.91 Mpa (figura 12), deformación elástica equivalente con un máximo 0.0054 mm/mm, estrés equivalente 967.99 Mpa, factor de seguridad mínimo 1.5812.

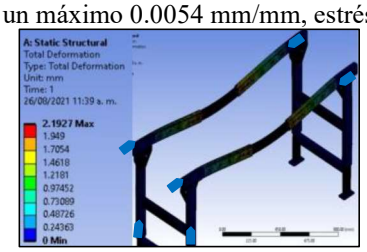



Figura 11 Deformación total módulo

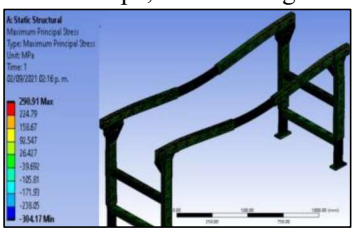



Figura 12 Máximo estrés principal módulo

*Análisis general*

Se identifica en cada análisis inicial que se acentúa un alto grado de estrés máximo principal en distintas zonas de cada parte analizada, se realiza la ubicación de las áreas en donde se presenta el máximo para realizar una análisis particular (Valero, 2004). Para el análisis de los rodillos se presenta el estrés máximo en los orificios de las piezas lateral, se realiza un mallado particular para esta zona, colocando esferas de influencia entre los contactos del rodillos y las piezas laterales (figura 13), el objetivo es realizar un mallado más pequeño en esta áreas en donde se presentan el máximo estrés principal, se realiza parametrización de la malla comenzando con 3 mm hasta llegar a 1.1 mm en estas áreas para encontrar la el punto de convergencia y a si la mejor solución.

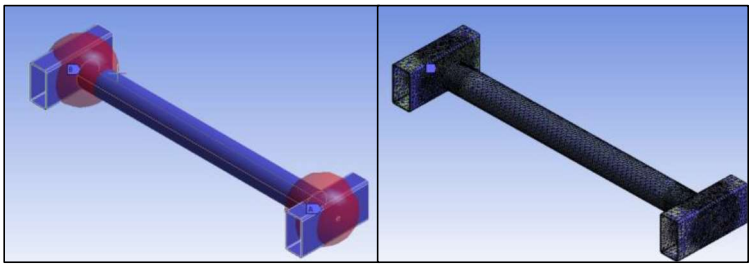


Figura 2 Parametrización de mallado rodillo

Análisis de parte lateral se presenta el estrés máximo en los orificios de la cara lateral de la pieza, se realiza un mallado particular para esta zona, con la opción cara de dimensionamiento para esta área de la pieza (figura 14), el objetivo es realizar un mallado más pequeño en donde se presentan el máxima carga ya que en el análisis inicial presenta falta de uniformidad en los colores, se realiza parametrización del malla comenzando con 3 mm hasta llegar a 0.7 mm en estas áreas para encontrar el punto de convergencia y a si la mejor solución.

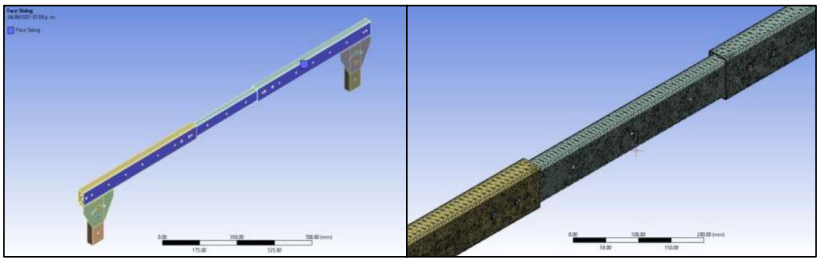


Figura 3 Parametrización de mallado lateral

Análisis de las patas a partir del primer análisis arroja que el comportamiento de la carga que se simulo presenta mayor estrés máximo principal en las caras en donde se sujeta la placa de posición de la piezas laterales específicamente en los barrenos, se procede a realizar esferas de influencia en cada uno de los barrenos (figura 15), se realiza mallado con parametrización de 3.1 a 1.7 mm y carga de 10000 N; se desarrolla el análisis, los resultados que arroja para el estrés máximo principal se comportan con las mismas características que en el estudio inicial. Se modifica el diseño de la pieza realizando un chaflan en esos barreno con la finalidad de evitar el comportamiento detectado anteriormente

(figura 16), se realiza una adición a las características de mallado se incluye las curvaturas de los orificios (figura 17). Se realiza la parametrización de los valores 3.1 a 1.7 mm para encontrar el punto de convergencia y la mejor solución.

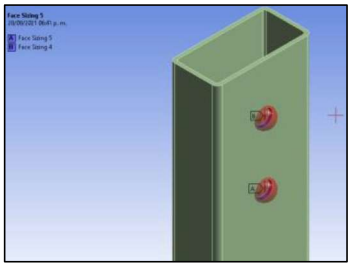


Figura 4 Esferas de influencia patas

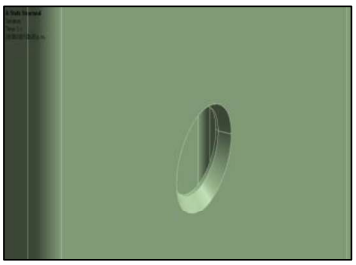


Figura 5 Rediseño de barreno (chaflan)

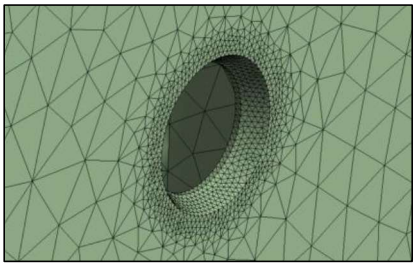


Figura 6 Mallado de barrenos

Análisis de modulo se detecta en la simulación inicial que se presentan los máximos esfuerzos en las esquinas de las en las dos placas posición de las patas derechas se busca encontrar la mejor solución a partir de la prueba de convergencia, se aplica esferas de convergencia en las esquinas de la placas (figura 18), se parametriza con rango de 4.9 a 2.2 mm para la generación de la malla (figura 19).

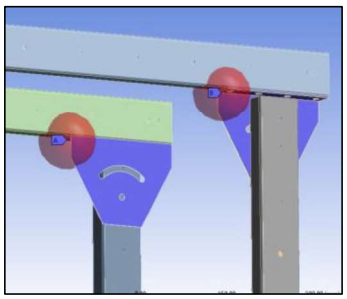


Figura 7 Aplicación de esferas en placas

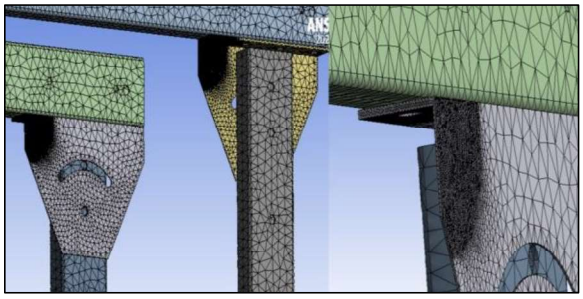
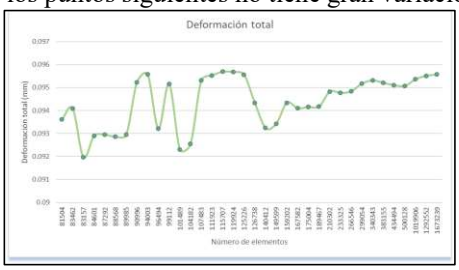


Figura 8 Aplicación de malla

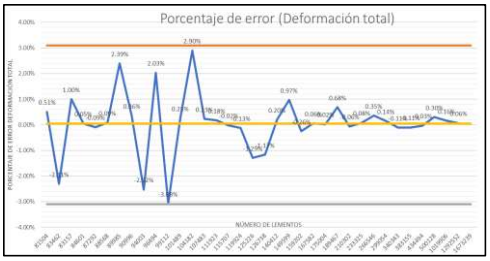
*Análisis de convergencia*

El objetivo de realizar un modelo de elementos finitos radica en determinar las tensiones y deformaciones producidas en los miembros del módulo al aplicar una carga (MARTÍN ROS MARTÍN, 2017). Los análisis de convergencia que se determinó analizar para los componentes fueron los de deformación total y el máximo estrés principal.

Análisis de rodillo a partir del de la parametrización del mallado se realizó el refinamiento de tamaño de 4.5 mm a 1.1 mm obteniendo el comportamiento para la deformación total que se muestra en la gráfica 1, se muestra el porcentaje de error de la deformación total se puede observar que converge en la iteración 11 con refinamiento de 2 mm en la malla, con 340343 elementos analizados con un porcentaje de error de deformación 0.14%, se determina lo anterior ya que en los demás cálculos no existe variación mayor 6 % entre los cálculos posteriores (grafica 2), adicionalmente los puntos siguientes no tiene gran variación comparados con la linea promedio de los porcentajes.

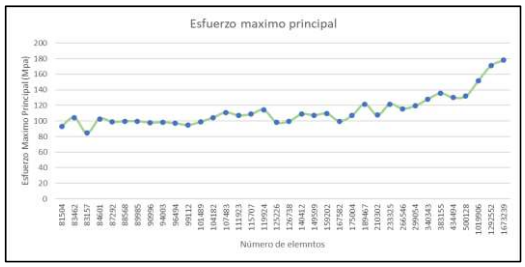



Grafica 1 Comportamiento de la deformación total

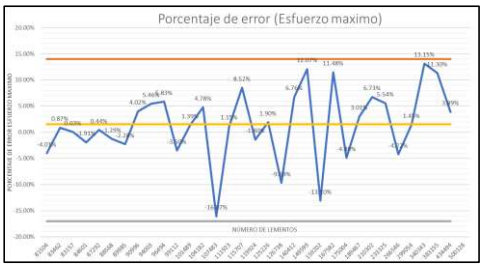



Grafica 2 Porcentaje de error de deformación

Comportamiento del máximo estrés principal que se muestra en la gráfica 3, en la (gráfica 4) se muestra el porcentaje de error del máximo de estrés principal, se puede observar que se logra la convergencia con tamaño de malla de 4.3 mm con 89,985 elementos; se continua con el análisis para determinar si realizando el mallado más refinado se pueden obtener mejores resultados.




Grafica 3 Comportamiento de esfuerzo máximo




Grafica 4 Porcentaje de error de esfuerzo máximo

Análisis de parte lateral a partir del de la parametrización del mallado se realizó el refinamiento de tamaño de 4.9 mm a 0.7 mm obteniendo el comportamiento para la deformación total se observa que no tiene gran variación. En el porcentaje de error de la deformación total se puede observar que converge con la iteración 3 con 109268 elementos con refinamiento de 4.7 mm, el porcentaje de variación en promedio es de 0.05%.

Comportamiento del máximo estrés principal de la parte lateral muestra poca variabilidad del esfuerzo, para el porcentaje de error del máximo de estrés principal, se puede observar que existen poca variación ya se logra la convergencia en los 109602 elementos con tamaño de malla 4.6 mm los porcentaje de error son no mayor al 6%, por esta razón es aceptable.

Análisis de patas a partir del de la parametrización del mallado se realizó el refinamiento de tamaño de 4.9 mm a 1.7 mm obteniendo el comportamiento para la deformación total se observa que no tiene gran variación. En el porcentaje de error de la deformación total se puede observar que converge con tamaño de malla de 4.6 y 274387 elementos, el porcentaje de error tiene una variación promedio es de 0.00005%.

Comportamiento del máximo estrés principal del módulo muestra poca variabilidad del esfuerzo, para el porcentaje de error del máximo de estrés principal, se puede observar que existen poca variación se logra la convergencia en 274387 elementos, con mallado de 4.6 mm de este punto en adelante no existe mayor variación en el porcentaje de error con un promedio de 0.000013%, por esta razón es aceptable.

Análisis de módulo a partir del de la parametrización del mallado se realizó el refinamiento de tamaño de 4.9 mm a 2.2 mm obteniendo el comportamiento para la deformación total se observa que no tiene gran variación. En el porcentaje de error de la deformación total se puede observar que converge con 273590 elementos con refinamiento de 4.7 mm, el porcentaje de variación en promedio es de 0.01%.

Comportamiento del máximo estrés principal del módulo muestra poca variabilidad del esfuerzo, para el porcentaje de error del máximo de estrés principal, se puede observar que existen poca variación, se logra la convergencia en 359714 elementos, con mallado de 4.6 mm de este punto en adelante no existe mayor variación en el porcentaje de error, con un promedio de 0.0046%, por esta razón es aceptable.

## Comentarios Finales

*Resumen de resultados*

*Factor de seguridad*

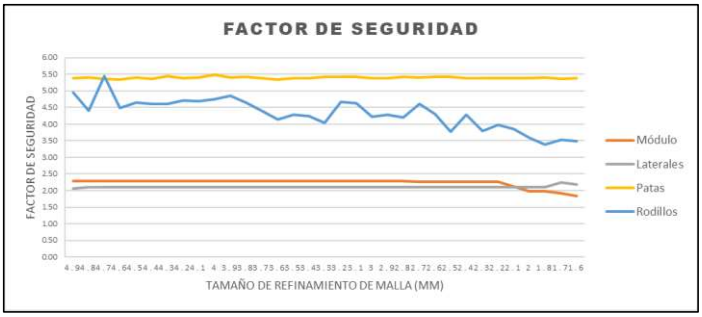
El factor de seguridad es la relación de la resistencia real entre la resistencia requerida de un material elástico sometido a diversas cargas (Solidworks, 2021). El factor de seguridad se calcula dentro del intervalo limitante elástico y mediante el esfuerzo último o de rotura, con el fin de conocer si existen deformaciones permanentes o colapso de la estructura debido a las fuerzas aplicadas en cada una de las pruebas (Ricardo stalin Borja Robilino, 2017).

$$F.S=\frac{P_{max}}{P_{allowable}} \qquad (1)$$

Para el análisis en consideración se desarrolló el cálculo del factor de seguridad para cada uno de los componentes del módulo (ecuación 1) , en la ilustración 1 se muestra los resultados encontrados de acuerdo a la relación de la resistencia del material y la carga que se aplicó en cada análisis. Se puede observar que al momento de la parametrización los cálculos están por encima del valor permisible para considerarse aceptable que es de 1.5, la gráfica 17 muestra el comportamiento del factor de seguridad a través del refinamiento del mallado; análisis de patas no existe una variación notable en el factor de seguridad, caso contrario para los el análisis del módulo existe un decremento cuando la malla alcanza un tamaño de 2.2 mm, la parte lateral tiene un incremento del factor de seguridad cuando el refinamiento alcanza un tamaño de 2.1 mm, para el análisis de rodillos existe un decremento en cada refinamiento hasta llegar a un factor de seguridad de 1.8 con un tamaño de malla 1.6 mm.

| Factor de seguridad | Tamaño de malla (mm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 4.9 | 4.8 | 4.7 | 4.6 | 4.5 | 4.4 | 4.3 | 4.2 | 4.1 | 4 | 3.9 | 3.8 | 3.7 | 3.6 | 3.5 | 3.4 | 3.3 | 3.2 | 3.1 | 3 | 2.9 | 2.8 | 2.7 | 2.6 | 2.5 | 2.4 | 2.3 | 2.2 | 2.1 | 2 | 1.8 | 1.7 | 1.6 |
| Módulo | 2.2765 | 2.2764 | 2.2765 | 2.2769 | 2.2768 | 2.2769 | 2.2764 | 2.2768 | 2.2768 | 2.2769 | 2.2764 | 2.2765 | 2.2766 | 2.2766 | 2.2766 | 2.2768 | 2.2769 | 2.2765 | 2.276 | 2.2762 | 2.2762 | 2.2761 | 2.2759 | 2.2755 | 2.2739 | 2.2738 | 2.2736 | 2.2737 | 2.1513 | 1.9845 | 1.9771 | 1.9234 | 1.8353 |
| Laterales | 2.0676 | 2.1051 | 2.0993 | 2.1004 | 2.0965 | 2.1017 | 2.1041 | 2.1033 | 2.1026 | 2.1047 | 2.1064 | 2.1095 | 2.1105 | 2.1052 | 2.1039 | 2.1077 | 2.1091 | 2.1001 | 2.1102 | 2.1061 | 2.1009 | 2.103 | 2.1069 | 2.1056 | 2.096 | 2.1039 | 2.1035 | 2.0995 | 2.1061 | 2.1008 | 2.1009 | 2.2487 | 2.1916 |
| Patas | 5.388 | 5.3925 | 5.3589 | 5.3327 | 5.4105 | 5.3685 | 5.4452 | 5.3809 | 5.4012 | 5.4884 | 5.3914 | 5.4159 | 5.3804 | 5.336 | 5.379 | 5.3795 | 5.4209 | 5.4125 | 5.4125 | 5.3889 | 5.3869 | 5.4244 | 5.4085 | 5.4146 | 5.42 | 5.3743 | 5.3786 | 5.3743 | 5.3875 | 5.3896 | 5.4024 | 5.3527 | 5.3853 |
| Rodillos | 4.9455 | 4.4112 | 5.4485 | 4.4775 | 4.6571 | 4.6166 | 4.6153 | 4.7035 | 4.6826 | 4.743 | 4.851 | 4.6562 | 4.402 | 4.1455 | 4.2907 | 4.2309 | 4.0287 | 4.676 | 4.6221 | 4.2284 | 4.2876 | 4.206 | 4.6124 | 4.3015 | 3.7822 | 4.2778 | 3.7869 | 3.972 | 3.8524 | 3.593 | 3.3938 | 3.3369 | 3.4856 |

Ilustración 1 Factores de seguridad




Grafica 17 Comportamiento de factores de seguridad en cada componente

*Conclusiones*

*Viabilidad del diseño*

A partir de las mejoras en el diseño, refinamiento para la aplicación de malla para el análisis de convergencia, cálculo del factor de seguridad se concluye que cada componente cumple con el diseño y resistencia para soportar las cargas y los trabajos para lo que fue diseñado ya que las simulaciones que se efectuaron se aplicó una carga extrema para asegurar la integridad estructural de 20000 N, los resultados que se encontraron son: porcentaje menores al 6% en el error para la deformación total y máximo estrés principal, se determina que para cada componente se tiene factores de seguridad mínimo superiores al 1.5 permisible. Por los resultados anteriores se determina que el módulo de manufactura adaptable modular tiene viabilidad en su diseño.

*Recomendaciones*

Para el análisis de rodillos se recomienda utilizar un equipo con mayores características de memoria RAM con la finalidad de realizar la parametrización con tamaño de malla más pequeño, ya que por las características que tiene el equipo en donde se realizó el análisis, la capacidad de memoria fue insuficiente, por la cantidad de elementos que se requieren analizar por la parametrización.
Se recomendar aplicar análisis de fatiga para determinar el punto de falla en cada ensamble que constituye el módulo.

*Agradecimientos*

Agradecimiento al Tecnológico Nacional de México campus Zitácuaro Michoacán por las facilidades brindadas para la realización de este artículo, al Centro de Manufactura Avanzada (CIATEQ) mediante el doctor Víctor López Garza por las asesorías dadas para el desarrollo del análisis de elemento finito y estructuración del artículo, a CONACYT por el apoyo entregado al otorgar la beca posgrado con la industria.

## Referencias

(AENOR. (Diciembre 1985). *Bandas transportadoras compuestas de goma con núcleo de tejido textil.* Asociación española de normalización y certificación.

GERVASO, M. S. (Octubre, 2013). *PROYECTO FIN DE CARRERA "DISEÑO DE UNA BANDA TRANSPORTADORA MEDIANTE GUIDE DE MATLAB".* Madrid, España.

MARTÍN ROS MARTÍN, D. J. (2017). *EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ROTACIÓN DE UNIONES DE ACERO SEMIRRÍGIDAS UTILIZANDO MODELOS MICROMECÁNICOS DE FRACTURA Y ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS.* Cartegena, Colombia: Industriales etsil.

Moaveni, S. (2015). *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS.* England: Pearson.

Ricardo stalin Borja Robilino, P. S. (2017). *Análisis estructural mediante el método de elemento finito del chasis del vehículo fórmulas SAE eléctrico de la universidad politécnica salesiana* . Ecuador.

RULMEKA. (s.f.). *Manual de cintas transportadoras.*

Solidworks. (7 de septiembre de 2021). *Dassault Sistemes*. Obtenido de http://help.solidworks.com/2020/spanish/SolidWorks/cworks/r_Maximum_Normal_Stress_Criterion.htm?verRedirect=1

Valero, E. F. (2004). *Aportaciones al estudio de maquinas electricas de flujo axial mediante la aplicación del metodo de lemento finito. Tesis doctoral.*