



Análisis topológico FEM para un herramental de fin de brazo

Silva Manríquez José Luis✉, Encarnación Robles Ulises

Posgrado CIATEQ, A.C. Sede San Luis Potosí, México
✉ jsilvamz@gmail.com

Resumen

Los herramientas de fin de brazo (EOAT) son elementos manipuladores conectados a los brazos robóticos. Se desarrolló este estudio para para implementar una mejora en un robot manipulador de la marca KUKA que manipula una puerta frontal de un coche comercial. El análisis topológico FEM es una herramienta que permite analizar una estructura y buscar una reducción de masa con el objetivo de optimizar su funcionamiento. Utilizamos el análisis FEM para mejorar un herramental de fin de brazo para trabajar en una celda de manufactura automotriz. El resultado obtenido fue una optimización en el peso final de la estructura, con lo que se redujo el tiempo de manufactura del herramental, así como también el robot trabaja en su punto óptimo.

Palabras clave: Ingeniería y tecnología, Topología, Optimización de geometrías de herramientas de fin de brazo, industria automotriz, celdas de manufactura robóticas, EOAT.

Abstract

End of Arm Tooling (EOAT) are manipulative elements connected to robotic arms. This study was developed to implement an improvement in a KUKA brand robot manipulator that manipulates a front door of a commercial car. The topological analysis FEM is a tool that allows to analyze a structure and look for a reduction in mass in order to optimize its operation. We use FEM analysis to improve an end-of-arm tooling to work in an automotive manufacturing cell. The result obtained was an optimization in the final weight of the structure, which reduced the manufacturing time of the tooling, as well as the robot working at its optimum point.

Keywords: Engineering and technology, Topology, Optimization of end-of-arm tooling geometries, automotive industry, robotic manufacturing cell, EOAT.

1. Introducción

El análisis por elementos finitos (FEA), es una de las herramientas tecnológicas más utilizadas en aplicaciones de simulación para ingeniería, utiliza un algoritmo de Métodos de Elementos Finitos (FEM). En este trabajo se expone un caso práctico, incluyendo las condiciones que se deben tomar para analizar y optimizar una estructura de un herramental de fin de brazo montado en un robot industrial de la marca KUKA y como desarrollando el algoritmo se logró una reducción significativa de peso sin comprometer la capacidad de carga sin comprometer su estabilidad estructural.

Para el desarrollo del estudio, se requiere un modelado 3D o 2D, dependiendo del estudio y el objetivo del estudio, al cual el algoritmo descompone en pedazos más pequeños, a la resultante de

descomponer una geometría en pedazos más pequeños se conoce como malla, estos pequeños pedazos se asemejan a cubos más pequeños. Con este arreglo el algoritmo puede predecir cual es el comportamiento de cada elemento, así como la interacción de estos pequeños elementos con sus elementos vecinos para predecir el comportamiento real de todo el sistema. Algunos de estos estudios comprenden los siguientes tópicos [1]:

- Comportamiento mecánico
- Vibraciones de sistema
- Puntos de fatiga
- Transferencia de calor

Los Métodos de los Elementos Finitos (FEM), es un método que utiliza un número limitado de elementos que tienen un comportamiento homogéneo [2], los pequeños elementos que se comentaron en el apartado anterior pueden tener formas muy variadas como triangulares, cuadrangulares, etc., todo depende del algoritmo que utilice el software utilizado para la solución de los elementos.

El conjunto de nodos, cubos y condiciones de frontera de un sistema que se analice, permitirán obtener una solución numérica de manera aproximada del sistema. Se debe tomar en cuenta que en cuantos más elementos se tengan en el sistema a analizar, el equipo de cómputo puede tardar más tiempo en el resultado del análisis en cuestión, ya que el sistema de ecuaciones y número de ecuaciones analizado será proporcional al número de elementos conectados. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de cómo se visualiza una geometría diseñada en un software FEM con una operación de mallado.

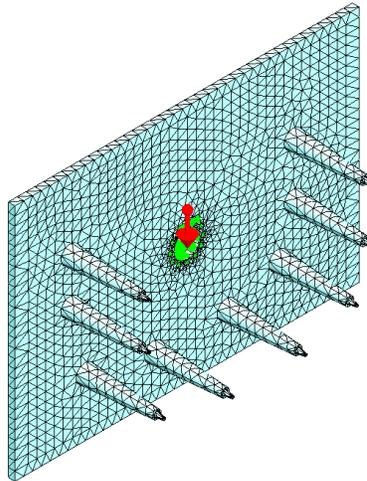


Figura 1. Enmallado de un modelo FEA.

1.1 Condiciones para un análisis estático FEM

Cuando un cuerpo, en un estado inicial de equilibrio o estado no deformado, se somete a una fuerza corporal o una fuerza superficial, el cuerpo se deforma correspondientemente hasta que alcanza un nuevo estado de equilibrio mecánico o estado deformado. Las fuerzas internas del cuerpo son el resultado de un campo de fuerza como la gravedad, mientras que las fuerzas superficiales son fuerzas aplicadas sobre el cuerpo a través del contacto con otros cuerpos [3].

Las relaciones entre las fuerzas externas de tensión y deformación del cuerpo[4], se denominan relaciones Estrés-Deformación. Estas relaciones representan propiedades del material que compone el cuerpo y también se conocen como ecuaciones constitutivas.

- a) Límite elástico: El límite elástico define la región donde no se pierde energía durante el proceso de tensión y tensión. Es decir, los procesos que no superan el límite elástico son reversibles. Este límite también se denomina límite de fluencia. Por encima de ese límite, las deformaciones dejan de ser elásticas y pasan a ser plásticas, y la deformación incluye una pieza irreversible.
- b) Rendimiento superior y rendimiento inferior: Cuando el acero dulce se encuentra en el rango plástico y alcanza un punto crítico, llamado límite de rendimiento superior, caerá rápidamente al límite de rendimiento inferior, desde el cual la deformación ocurre con tensión constante, hasta que comienza a resistir la deformación. de nuevo.
- c) Esfuerzo de ruptura: La ruptura o fractura es la separación de un objeto causada por el estrés. Por lo tanto, en este punto, se espera la fractura del cuerpo. Los materiales como el acero dulce, que tienen la propiedad de fracturarse solo después de grandes deformaciones plásticas, se denominan dúctiles. La fractura que se ilustra aquí se llama fractura dúctil. Puede reconocer una fractura dúctil cuando el diagrama tiene una curva como la que se muestra a continuación. Esto significa que a medida que el material se vuelve más delgado, se aplica más presión hasta que se rompe repentinamente en el punto de tensión de ruptura.

En la siguiente Figura 2 se muestra una gráfica donde se muestra el diagrama esfuerzo deformación[5].

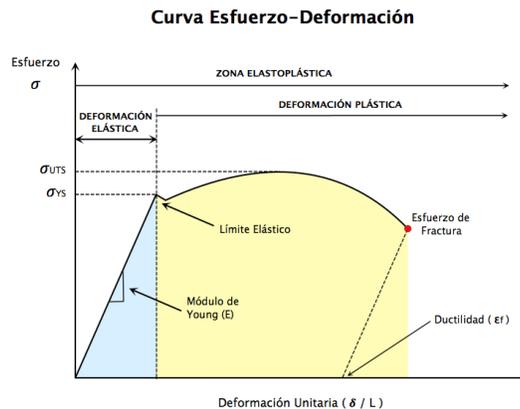


Figura 2. Diagrama esfuerzo – deformación [5].

El algoritmo Von Mises es un valor que se utiliza para determinar si un material se fracturará, se utiliza generalmente para materiales dúctiles como metales, su criterio de cedencia establece que si la tensión de Von Mises de un material bajo carga es igual o mayor que el límite de fluencia del mismo material bajo tensión simple, el material se fracturará [5]. En la Figura 3 se presenta la ecuación de estrés de Von Mises[6].

Otra curva típica es la curva de fuerza inelástica contra deformación como se muestra en la siguiente Figura 4 [8].

Un algoritmo de análisis de elemento finito es un algoritmo que utiliza en sus formas matemáticas más complejas ecuaciones diferenciales y condiciones de frontera mínimas y máximas.

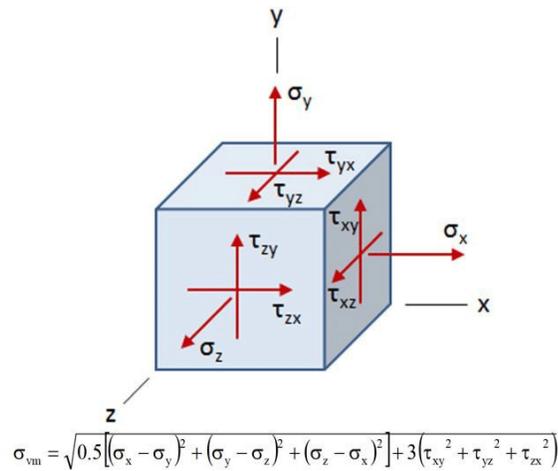


Figura 3. Ecuación de tensión de Von Mises expresada por los 6 componentes de tensión [6].

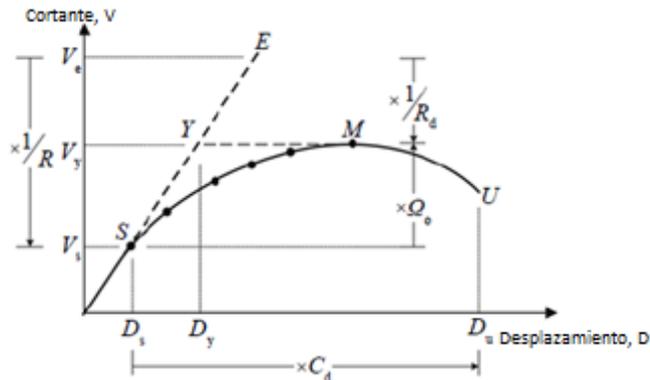


Figura 4. Fuerza inelástica contra deformación [8].

La razón para correr en una primera instancia un análisis de elementos finitos lineal es con el objetivo de que el algoritmo tenga un parámetro de referencia de donde iniciar. Esto quiere decir que, si se pide una reducción de masa, se requiere el análisis lineal para que el algoritmo considere las condiciones actuales del sistema, en estado de reposo y de ahí partir a desarrollar cualquier tipo de análisis, ya sea dinámico, frecuencia, impacto; básicamente el análisis estático busca un estado de equilibrio, en este tipo de análisis, se puede suponer también que el tiempo no juega un papel importante, por lo tanto, no lo se considera en los resultados.

El análisis estático nos permite entonces conocer las condiciones iniciales del sistema, como límites mínimos y máximos, con esta información a la hora de correr el análisis topológico se sabrá con qué valores iniciar el algoritmo y se tendrá certeza en qué momento se considera que el algoritmo debe detenerse. Esta es la razón principal por la cual se debe correr primero un análisis estático antes que cualquier otro tipo de análisis.

Tomando los párrafos de introducción se aclara que el objetivo general del proyecto es mediante el uso de un software de diseño CAD, desarrollar un modelo 3D de un fin de brazo para un robot, después, mediante una herramienta de análisis de elementos finitos, desarrollar un análisis estático y un estudio de topología del herramental en cuestión, de acuerdo con los resultados obtenidos, proponer un diseño optimizado. Como objetivos específicos para este trabajo tenemos lo siguientes:

- Reducir la cantidad de masa en peso (kilogramos), en el EOAT mediante un proceso de optimización topológica de su geometría.
- Maximizar la resistencia mecánica del EOAT.
- Desarrollar topologías capaces de ser fabricadas mediante un proceso de manufactura competitivo y eficiente por ejemplo un CNC.
- Optimizar el rendimiento en la capacidad de carga en el EOAT.
- Mejorar el costo beneficio en la venta de la solución robótica.

2. Hipótesis

Es posible mediante el uso de herramientas de simulación predecir el comportamiento de los herramientas de fin de brazo, mediante la optimización de topologías de dichos herramientas se puede lograr una reducción en la masa total. Al disminuir la masa se reduce también el peso, por lo que se libera carga al brazo robótico. Con dicha optimización la capacidad de carga de los brazos robóticos hacia la pieza final aumenta en relación con la disminución del peso del fin de brazo. Si se logra mediante el análisis topológico de los herramientas de fin de brazo reducir la masa, se aumenta la capacidad de carga de los brazos robóticos. Con esto se obtiene una reducción en costos de equipos robóticos sin comprometer el rendimiento y tiempo ciclo de trabajo. Mejorar la ingeniería de manufactura y el material empleado en los fines de brazo. Mejorar el costo beneficio en la venta de una solución.

3. Metodología experimental

3.1 Objetivo del estudio

Para el actual estudio, el punto medular fue el desarrollar el análisis en la estación donde se ensambla la puerta lateral frontal izquierda y derecha.

Para el inicio del estudio se desarrolló el EOAT para un robot de la marca KUKA modelo KR 120 R2700 extra HA, este equipo tiene un alcance máximo de 2696 milímetros, su carga útil nominal es de 120 kilogramos, aunque su carga suplementaria nominal es de 50 kilogramos. De acuerdo con su especificación técnica tiene una tolerancia de movimiento de $\pm 0.04\text{mm}$, es un brazo robótico de 6 ejes, se monta mediante una estructura que sirve de base al piso, para aplicaciones de ensamble de chasis, una planta automotriz automatizada maneja alrededor de entre 350 a 450 robots solo para este departamento, este número depende de sus procesos y la optimización de sus recursos. Sus aplicaciones van desde manejo de material, soldadura, remachado, atornillado, ribeteado, inspección de calidad, etc.[9] Su interfaz es mediante un mando de interfaz llamada consola de enseñanza “*Teach pendant KUKA smartPAD*”. Su gráfica de movimiento está mostrada en la Figura 5. Dimensiones en milímetros.

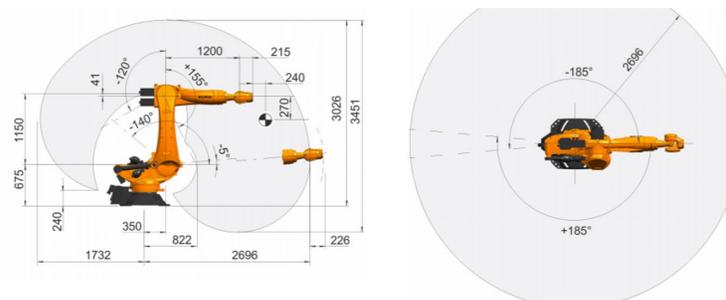


Figura 5. Espacio de trabajo de robot KUKA KR R2700 extra HA, extraído de manual de usuario.

El montaje del fin de brazo de acuerdo con el manual de usuario viene dado por la Figura 6. Dimensiones en milímetros.

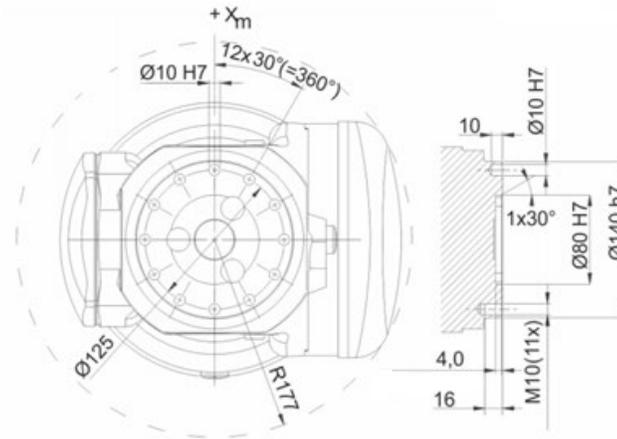


Figura 6. Dimensiones para montaje de EOAT de KUKA KR 120 R2700 extra HA, extraído de manual de usuario.

La puerta del coche es una puerta fabricada mediante el proceso de forja en un material AISI 1020. Su masa es de aproximadamente 13.19 kilogramos, sus dimensiones generales son de 1147.15 x 1255 x 241 milímetros. El espesor de la puerta es de 1 milímetro. En la Figura 7 se muestran las puertas izquierda y derecha.

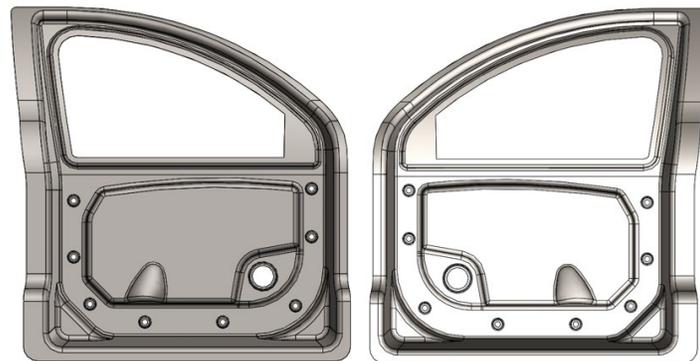


Figura 7. Vistas de la puerta a manipular por medio de EOAT.

Con la información básica se procede con el diseño del EOAT, otro punto importante es verificar el centro de masa de la pieza, cuando se hace esto, en la etapa de diseño, se evita que la pieza rote o haga movimientos que no estén en su posición natural, esto quiere decir que se debe buscar siempre su posición de reposo o equilibrio, en el presente estudio, el centro de masa de la pieza está dado por las siguientes coordenadas:

$$X=-42.33597 / Y= -179.17561 / Z = 176.70401$$

En la siguiente figura se muestra en color rosa la coordenada con origen en el centro de masa. En la Figura 8 se muestra el centro de masa de la puerta.

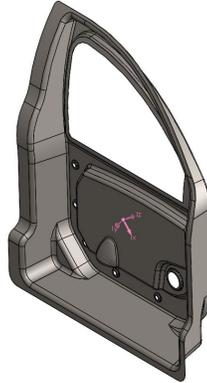


Figura 8. Centro de masa en puerta.

Con la información recolectada anteriormente se inicia la propuesta de diseño del herramental, como primera parte de la propuesta tenemos una placa base en aluminio (AL6061-T6), se utilizó esta aleación de aluminio por requerimiento del cliente para este tipo de aplicaciones, este requerimiento puede variar de cliente a cliente, aparte de que es una aleación que es muy comercial, sumado a su tiempo de entrega y costo lo vuelven muy buena opción.

Con dimensiones generales de 1300 x 900 x 25.4 milímetros, esta placa tiene una masa de 79.90 kilogramos, esto es solo la placa sin componentes adicionales. En la Figura 9 se observa la geometría frontal de la placa propuesta.

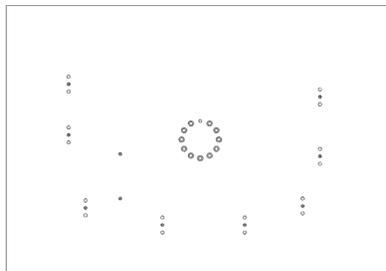


Figura 9. Vista frontal de placa base del EOAT.

Después de haber desarrollado una propuesta mecánica de la placa, el siguiente paso es el diseño del soporte para sostener la puerta, esto se muestra en la Figura 10. Hasta aquí, el EOAT sin la puerta tiene un peso de 93.7 kilogramos.

La propuesta final con la puerta en su posición tiene un peso de 106.9 kilogramos y se mantuvo el centro de gravedad de la pieza en su posición para en futuros estudios de FEM, el algoritmo de simulación recalcula el centro de gravedad automáticamente, ya que el centro de gravedad cambia en relación con la geometría y distribución de la masa. La Figura 11 muestra una vista del ensamble con el centro de masa.

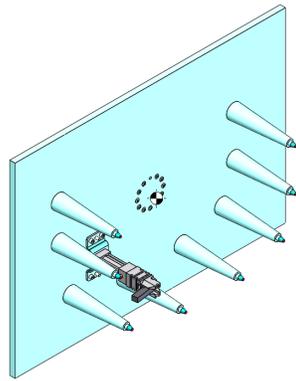


Figura 10. Propuesta de EOAT.

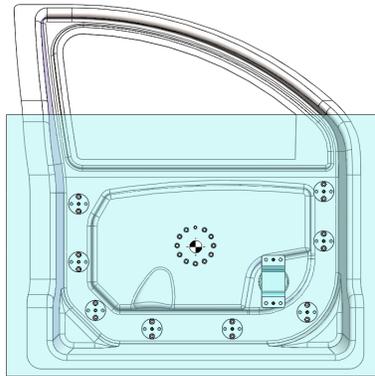


Figura 11. Vista de EOAT con posición del centro de masa.

El EOAT propuesto se ensambla en la parte final del robot, la Figura 12 muestra el ensamble junto al brazo y su proporción en tamaño respecto al brazo robótico donde ha sido montado.

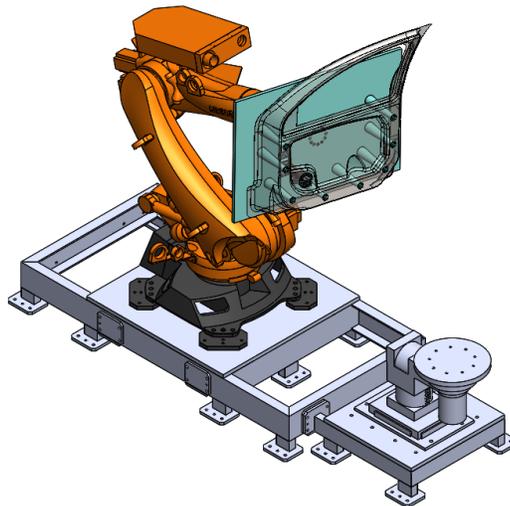


Figura 12. Manipulación de puerta lateral frontal LH & RH.

3.2 Condiciones de frontera para el análisis estático

Para realizar un análisis estático, lo primero para tener en cuenta son los puntos de carga del brazo robótico, en este caso son los puntos donde se coloca la tornillería y puntos de conexión del EOAT al robot, en la Figura 13 se muestra el anclaje utilizado.

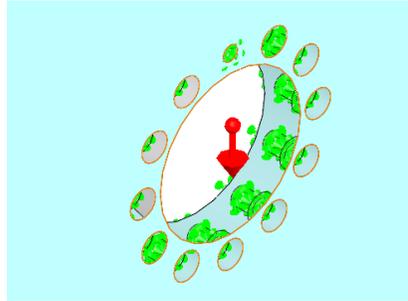


Figura 13. Zona de anclaje entre el Robot y el EOAT.

La siguiente sección es colocar los puntos donde se distribuye la masa de la pieza que se carga en el EOAT, en este caso son los puntos finales donde los soportes cargan la puerta, aunque la masa de la puerta es de casi 15 kilogramos, para el actual estudio en particular se considera 25 kilogramos. En la Figura 14 se muestran las áreas que se consideraron para la distribución de cargas.

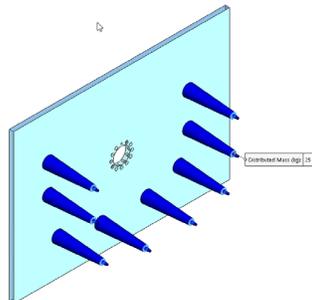


Figura 14. Puntos de distribución de carga.

Después de esto, se genera la condición de gravedad de la Tierra, en este caso se considera una fuerza de gravedad como se muestra en la Figura 15 dibujado con una flecha color rojo.

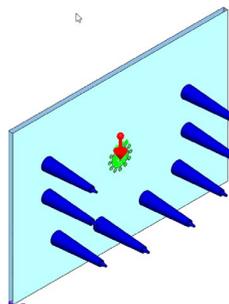


Figura 15. Figura de condición de fuerza de gravedad.

La siguiente condición es una condición de manufactura, en este caso de estudio, se preservó 25.4 mm alrededor de la zona donde se colocan los tornillos, esto con el fin de que la placa tenga suficiente material para hacer un buen ensamble de la tornillería. La razón de dejar 25.4 mm alrededor es con el fin solamente de mantener una zona con suficiente material alrededor de la cuerda de los tornillos, esta es una condición que puede ser diferente según la apreciación de cada grupo de diseño, puede ser más, incluso menos, aunque la condición mínima de materia sería que el área a ocupar sea al menos igual al área de la base del tornillo. La Figura 16 muestra la región que mantendremos con material.

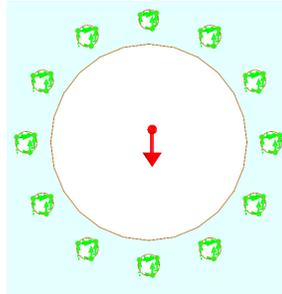


Figura 16. zona a mantener con material.

Por último, se agrega una condición de manufactura para poder fabricar la pieza final en un CNC, por lo que la condición es que remueva material en la dirección que marca la flecha morada, el área total de manufactura son las dimensiones de largo y ancho consideradas al inicio del estudio, esto con el fin de que la geometría resultante permita hacer una adecuada manufactura de la placa.

En la Figura 17 se muestra la dirección considerada para la manufactura.

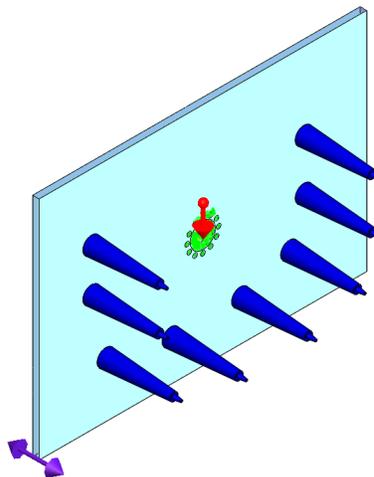


Figura 17. Dirección de manufactura de la placa mostrado en la flecha morada.

En este punto se inicia con el mallado del modelo, existen diversos tamaños de malla, para este estudio se consideró un mallado de 3 milímetros entre componentes, esto por condiciones de cómputo utilizadas en este estudio, podemos adecuar un mallado de acuerdo con diferentes criterios y

condiciones de cómputo, el objetivo de este trabajo no es crear polémica en el tamaño de malla. El mallado se muestra en la Figura 18.

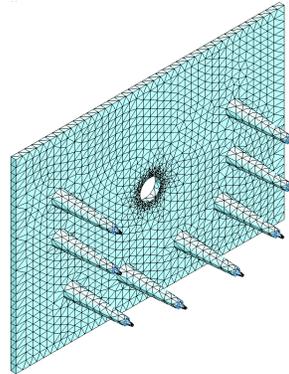


Figura 18. Mallado del EOAT.

3.3 Condiciones de frontera para el análisis topológico

Para el análisis topológico en FEM, se requiere utilizar el resultado estático obtenido en el estudio anterior y utilizar estos resultados como base en el nuevo estudio, las condiciones de frontera del análisis topológico son las siguientes:

- El material es el mismo que se utilizó en el estudio estático (AL6061-T6).
- Los orificios de unión considerados en el análisis estático se mantienen, esto para mantener la sujeción y cargas de acuerdo con el análisis estático.
- La suma de cargas totales es de 250 Newtons que corresponden a la puerta que estará cargando nuestro EOAT.
- Se propone para este trabajo utilizar un factor de seguridad de 2, aunque dependiendo de la industria o sector este factor puede variar dependiendo de los requerimientos.

Al inicio del diseño mecánico se mencionaba la importancia del centro de masa de la pieza, para el análisis topológico es fundamental tener el sistema en equilibrio, esto permite mecánicamente tener un mejor control de nuestro diseño, en la Figura 19 se muestra la masa del estudio calculada de manera virtual, como se observa en la figura con líneas de color lila, la placa está al centro del sistema.

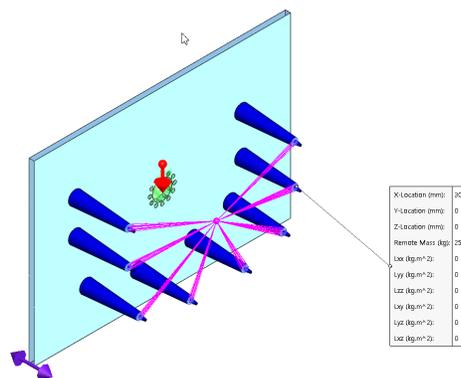


Figura 19. Cálculo de masa en análisis FEM.

Después de haber propuesto las condiciones de frontera y tener listos los mallados, ya se pueden desarrollar las pruebas de simulación FEM.

Para este trabajo, se corrieron las siguientes pruebas en el EOAT:

- Análisis estático
- Topología con una reducción de masa del 30%
- Topología con una reducción de masa del 40%
- Topología con una reducción de masa del 45%
- Topología con una reducción de masa del 50%
- Topología con una reducción de masa del 60%
- Topología con una reducción de masa del 75%

El hecho de considerar estos valores porcentuales de reducción de masa es con el fin de tener un parámetro de referencia, realmente no sabemos que comportamiento tendrá la placa, ni sabemos en qué comento tendremos una placa optimizada, los valores considerados de esta forma mostrarían un comportamiento lineal.

4. Resultado

4.1 Resultados FEM para estrés von Mises

El resultado FEM para estrés Von Mises muestra que la carga aplicada a la placa no presenta un estrés considerable, en la Figura 20 se muestra el estrés real de lado izquierdo y de lado derecho el desplazamiento maximizado 2000 veces. La referencia es un punto de deformación de 2.75×10^8 N/m², nuestro objeto de estudio se encuentra en un punto máximo de 6.139×10^6 N/m².

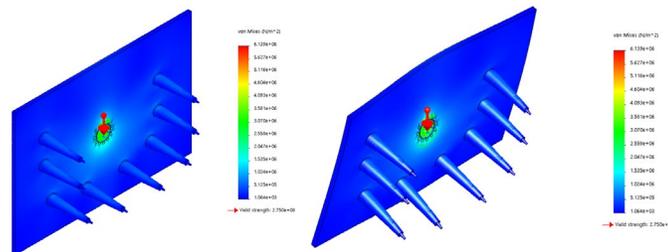


Figura 20. Estrés en análisis FEM de placa.

4.2 Resultados FEM para desplazamiento

El resultado FEM para desplazamiento Von Mises muestra un desplazamiento en las secciones más alejadas del anclaje o soporte de la estructura, este comportamiento tiene sentido físicamente, entre más alejado esté un punto del anclaje sometido a una fuerza se genera una reacción de la estructura a cualquier fuerza que trate de romper su estado de mínima energía.

En la Figura 21 se muestra el desplazamiento real de lado izquierdo y de lado derecho el desplazamiento maximizado 2000 veces, el desplazamiento es muy pequeño, casi imperceptible para la estructura esto es porque tiene un desplazamiento máximo de 0.005 milímetros. En un sistema robótico donde la tolerancia de posición es de 0.04 milímetros, el desplazamiento mostrado en la estructura se puede considerar como despreciable.

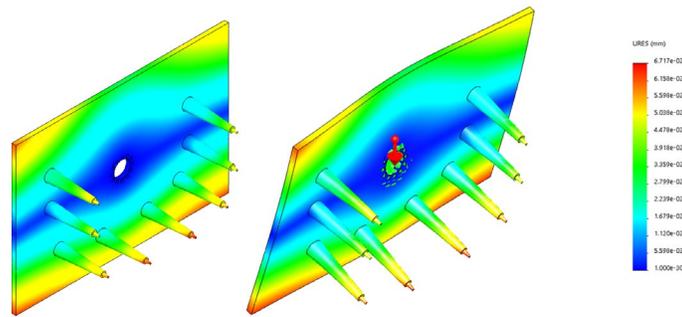


Figura 21. Desplazamiento de placa en análisis FEM.

4.2.1 Resultados FEM topológico para una reducción de masa del 30%

En la primera interacción para reducción de masa tenemos material en el exterior de la placa que al no estar conectado a la estructura principal se considera como material que es despreciable, en la Figura 22 se muestran las condiciones a 30% de reducción de material.

Como este estudio trata de buscar una reducción de masa, vemos aún muchas zonas con oportunidad de reducción de material, de acuerdo con el estudio podemos correr otra interacción buscando una mejor reducción.

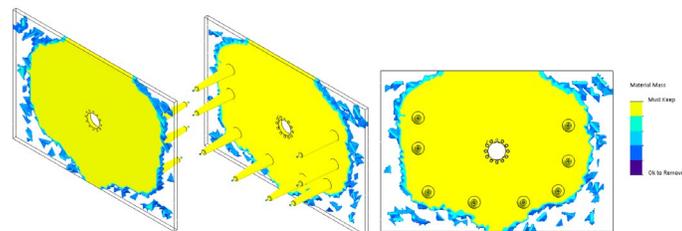


Figura 22. Topología FEM con una reducción al 30%.

4.2.2 Resultados FEM topológico para una reducción de masa del 75%

En esta interacción para reducción de masa se muestran las condiciones a 75% de reducción de material. De acuerdo con el estudio, se debe de tomar de base esta topología para desarrollar una propuesta de ingeniería, ya que el material a reducir se encuentra muy cerca de la zona de los soportes. En la Figura 23 se muestra el resultado con una reducción de masa del 75%.

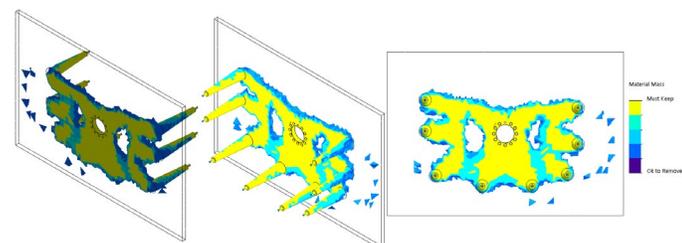
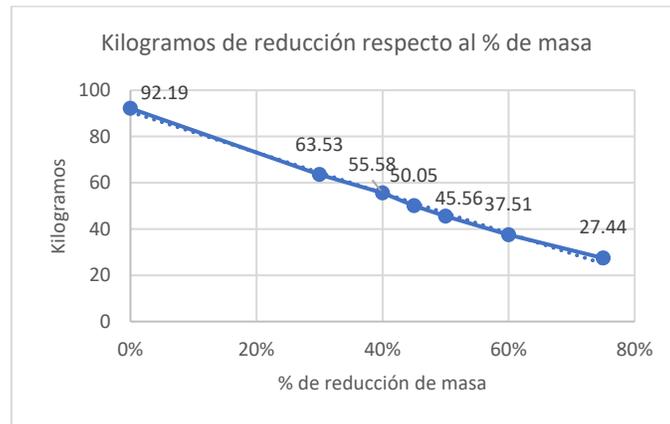


Figura 23. Topología FEM con una reducción del 75%.

Las interacciones iniciaron con una masa de 92.17 Kilogramos, se observa al final del estudio un área de oportunidad de reducir la masa del EOAT en un 75%, lo que representa una masa final de 27.44 kilogramos.

En la Tabla 1 podemos ver prácticamente un comportamiento lineal en la reducción de masa y es lo esperado en este comportamiento, aunque antes del estudio no teníamos idea donde pararíamos las interacciones.

Tabla 1. Kilogramos reducidos en el EOAT con respecto al estudio de reducción de masa



5. Conclusiones

El análisis topológico con el fin de buscar una reducción de masa de estructuras mecánicas sin comprometer su capacidad de carga es un algoritmo que tiene un gran futuro en la ingeniería; por eso es importante que las empresas desarrollen a sus ingenieros en esta área, pues pueden dependiendo de los proyectos desarrollados las empresas pueden obtener geometrías más eficientes.

El desempeño en campo de este estudio demostró que el análisis topológico empleado en el rediseño de un EOAT permitió a la solución tener un rendimiento óptimo, en la Figura 24 se muestra de manera esquemática la zona de operación de la solución robótica y la zona de ensamble.

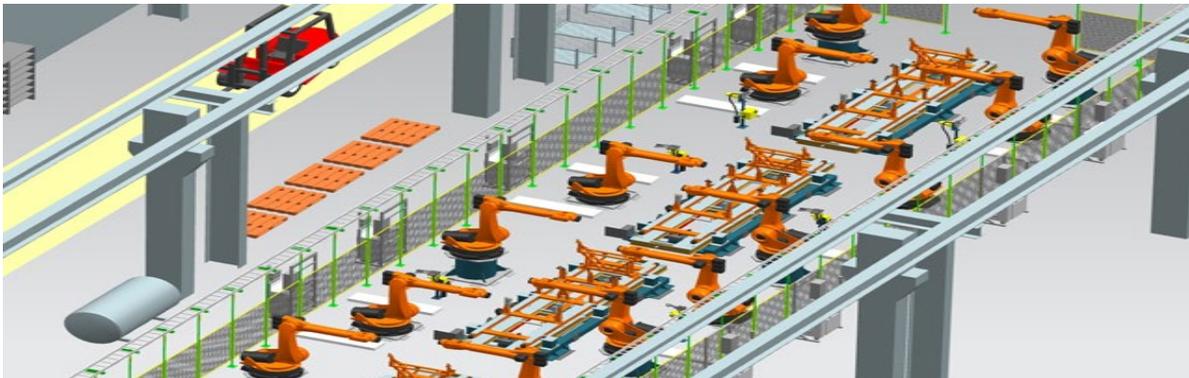


Figura 24. Zona esquemática de arreglo de manufactura (imagen de referencia).



El desarrollo aplicado del análisis FEM para el rediseño del EOAT permitió agregar una mayor cantidad de periféricos para la gestión de control de calidad de la línea de ensamble, esto en el proyecto se consideró como un ahorro ya que no fue necesario agregar una estación más a la línea de ensamble para hacer esta actividad. En la Figura 25 se muestra el diseño esquemático de la línea de ensamble.

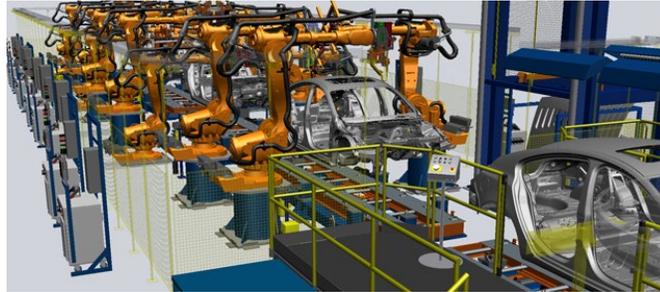


Figura 25. Propuesta de línea de ensamble final, (imagen de referencia).

Las geometrías generadas en los EOAT fueron optimizadas para que fueran manufacturables en equipos CNC's de 3 ejes, por lo que no fue necesario implementar recursos de manufactura no convencionales.

Conforme tengamos mejores equipos de cómputo y herramientas tecnológicas más avanzadas, así como elementos de manufactura que permitan generar geometrías más orgánicas y caprichosas los análisis topológicos serán día a día más utilizados en las diferentes áreas de la ingeniería.

Al optimizar la capacidad de carga se agregaron más operaciones y puntos de validación en un solo EOAT, permitiendo al proceso ser más eficiente, el tiempo de inspección se considera de 7 segundos, teniendo la capacidad de validar en el mismo EOAT se logró una reducción de 2 segundos por los movimientos que se ahorraron al hacer la inspección en la misma operación, este dato tal vez no diga mucho pero al ser una línea de ensamble de estructuras Body in White, cualquier reducción en el tiempo ciclo repercute de manera positiva en la utilidad de la empresa.

Por un tema de ética y propiedad industrial de los cuales los autores no poseen los derechos, no se puede revelar la información del cliente final, en este caso del ensamblador del coche, ni la plataforma de este. Algunas imágenes referentes al proceso y línea de ensamble fueron modificadas con el fin de proteger la propiedad intelectual.

6. Referencias

- [1] "Wayback Machine."
<https://web.archive.org/web/20070629213233/http://www.colorado.edu/engineering/CAS/Felippa.d/FelippaHome.d/Publications.d/Report.CU-CAS-00-13.pdf> (accessed Jul. 24, 2021).
- [2] U. S. Dixit, "FINITE ELEMENT METHOD: AN INTRODUCTION."
- [3] T. Materials and I. Company, "Wrought Stainless Steels," *Prop. Sel. Irons, Steels, High-Performance Alloy.*, pp. 841–907, 2018, doi: 10.31399/asm.hb.v01.a0001046.
- [4] L. Lorenzo Iparraguirre, "Colección: LAS CIENCIAS NATURALES Y LA MATEMÁTICA Distribución de carácter gratuito. ADVERTENCIA MECÁNICA BÁSICA Fuerza y Movimiento," 2010.
- [5] R. G. Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, *Mechanical Engineering Design*. 1369.
- [6] R. Patel *et al.*, "A Transdisciplinary Approach for Analyzing Stress Flow Patterns in Biostructures," *Math. Comput. Appl.*, vol. 24, no. 2, p. 47, Apr. 2019, doi:



10.3390/MCA24020047.

- [7] S. K. Kunutsor, A. W. Blom, M. R. Whitehouse, P. G. Kehoe, and J. A. Laukkanen, "Renin-angiotensin system inhibitors and risk of fractures: a prospective cohort study and meta-analysis of published observational cohort studies," *Eur. J. Epidemiol.*, vol. 32, no. 11, pp. 947–959, Nov. 2017, doi: 10.1007/S10654-017-0285-4).
- [8] "Inelastic force-deformation curve (SEAOC, 2008) | Download Scientific Diagram." https://www.researchgate.net/figure/inelastic-force-deformation-curve-SEAOC-2008_fig1_257760133 (accessed Jul. 25, 2021).
- [9] D. Mattison, "Autodesk® Automotive Solutions Superior, Efficient, and Complete Automotive Concept Design," Accessed: Jul. 25, 2021. [Online]. Available: www.autodesk.com/manufacturing.

Autores

Silva Manríquez José Luis. Ingeniero físico de profesión por parte de la UASLP, estudiante de Maestría en Manufactura Avanzada por parte del CIATEQ Campus SLP, Six Sigma Black Belt por el Tecnológico de Monterrey. En el área laboral se ha dedicado a desarrollar tecnología para el sector industrial, como en ABB donde colaboró en el diseño, pruebas y liberación de Centros de Control de Motores y equipo eléctrico para el mercado NAFTA. Tiene más de 10 años colaborando en el diseño, puesta en marcha y liberación de líneas de ensamble automotrices para empresas como Robert Bosch, Draexlmaier, Continental, GM, BMW, Volkswagen, Audi y Tesla por mencionar algunos. Actualmente incursiona en aplicaciones de industria 4.0, celdas de manufactura para coches eléctricos, etc.

Encarnación Robles Ulises. Ingeniero mecánico de profesión por parte del Centro de Enseñanza Técnica Industrial, Maestría en Diseño Industrial por el Tecnológico de Monterrey, Doctorado en Manufactura Avanzada en el CIATEQ Campus Guadalajara; ha trabajado como ingeniero de diseño para compañías como Flex, Nokia, Intel, y actualmente diseñando switches para servidores en Arista Network. Ha desarrollado componentes de hardware utilizados en servidores, redes, plataformas de almacenamiento, conmutadores de red multicapa, computación en la nube, computación de alto rendimiento y entornos comerciales de alta frecuencia.