

ANÁLISIS MODAL DE BRACKETS METÁLICOS PARA ARNESES ELÉCTRICOS UTILIZANDO NX NASTRAN

Ing. Indira Cruz Realeño¹, Ing. Alfredo Chávez²,

Resumen— La principal función de un bracket metálico es dar soporte y sujeción a los arneses eléctricos vehiculares, por lo que su desempeño mecánico deberá cumplir con los requerimientos mínimos para evitar rechinado o fallas debido a resonancia. El objetivo de este estudio es determinar la combinación de parámetros de entrada al software NX Nastran (como es el tamaño de elemento, el orden del elemento, el número de elementos a través del espesor del bracket así como el tipo de elemento de conexión 1D), que permitan obtener la frecuencia natural de los brackets y que aproxime el resultado a una diferencia no mayor al 15% con respecto a los resultados proporcionados por el Centro de Ingeniería en India. Las combinaciones de los parámetros de control que mejor aproximen a la validación oficial se obtienen a partir de un diseño de experimentos.

Palabras clave— Brackets, CAD, CAE, TCI, Modal.

Introducción

En la actualidad uno de los principales objetivos de la industria automotriz es reducir tiempo y costo durante el desarrollo de un nuevo vehículo. Una de las principales herramientas de apoyo para llegar a estos objetivos y reemplazar numerosos prototipos y pruebas físicas ha sido el desarrollo de herramientas de análisis virtual CAE.

La ingeniería asistida por computadora (CAE), consiste en el uso de software para simular fenómenos físicos, con el objetivo de diseñar productos robustos y de contribuir a la solución de problemas de ingeniería. Incluye la simulación, validación y optimización de productos, procesos y herramientas de fabricación (1).

Dentro de General Motors, alineándose a los objetivos generales de la industria automotriz, y como parte de su plan de apoyo ambiental, uno de los objetivos es aumentar el número de análisis virtuales y reducir el número de pruebas físicas, de este modo es posible reducir en gran medida la elaboración de prototipos de alta fidelidad, la manufactura de herramientas y el número de pruebas de validación físicas.

Debido a la creciente producción de vehículos híbridos y eléctricos, la demanda de brackets metálicos para arneses eléctricos ha ido en aumento, esto genera la necesidad de llevar a producción un mayor número de brackets que convivan en ambientes complejos y a su vez ayuden a la sujeción de arneses con contenidos vehiculares variables.

Actualmente es posible generar modelos FEM con aproximaciones muy cercanas e incluso que reproducen fielmente los fenómenos físicos, sin embargo, un modelo con estas características requiere un alto costo computacional y humano.

La responsabilidad de un ingeniero de diseño dentro de General Motors es el modelado de componentes mecánicos a través de un sistema CAD, así como también existe un área específica de análisis virtual CAE, a pesar de la división de estas dos ramas existen softwares de diseño, como NX Nastran, que también cuentan con módulos básicos que permiten acercar al diseñador al entendimiento del comportamiento mecánico de sus diseños.

Encontrar los parámetros de entrada para NX que permitan obtener la frecuencia natural del primer modo de vibración ayudará a cumplir con los requerimientos de rigidez estructural impuesto por las normas de GM desde etapas tempranas de diseño.

Descripción del Método

Uno de los objetivos principales de General Motors como parte de la estrategia de negocio es la reducción de costos mediante la eliminación de las validaciones físicas, esto solo será alcanzable con la implementación de metodologías de análisis CAE con un alto grado de correlación entre los resultados numéricos y los resultados físicos.

Una de las principales ventajas de los análisis CAE, es que no se requiere la generación de un componente físico, ni de sus procesos para poder conocer los puntos más débiles de un diseño, hablando estructuralmente. Este tipo de ayuda virtual permitirá desde etapas muy tempranas de desarrollo la optimización de recursos, la reducción de tiempo de diseño y reducción de masa es por esto que el uso de CAE se ha vuelto cada vez más necesario durante varias etapas del desarrollo del producto.

¹ Ing. Indira Cruz es Ingeniera de Diseño en General Motors, Toluca, Estado de México. indira.cruzrealeno@gmail.com Alumno del Posgrado Maestría en Manufactura Avanzada CIATEQ A.C (autor correspondiente).

² Ing. Alfredo Chávez Luna es Líder de Proyectos en CIATEQ, A.C. El Marqués, Querétaro. alchavez@ciateq.mx

El modelo de procesos de diseño actual, Figura 1, incluye al menos una etapa de prototipado, y posteriormente una evaluación física, esta evaluación se vuelve iterativa con el diseño y el prototipado hasta que se logra obtener un modelo que cumpla con los mínimos requerimientos para llevarlo a producción. Este tipo de proceso implica una constante pérdida de recursos ya que en muchos casos se prefiere erróneamente el sobre diseño del componente con la intención de disminuir el número de iteraciones entre diseño y prototipado.

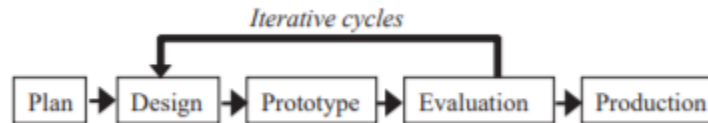


Figura 1. Diagrama de proceso de diseño actual

El modelo de proceso propuesto, Figura 2, muestra la intención de eliminar el prototipado dado que los componentes podrán tener múltiples evaluaciones con NX Nastran o CAE interno, de modo que cuando lleguen a la etapa de evaluación final oficial, el diseño sea lo suficiente robusto para cumplir en su primera iteración de análisis con las especificaciones requeridas.

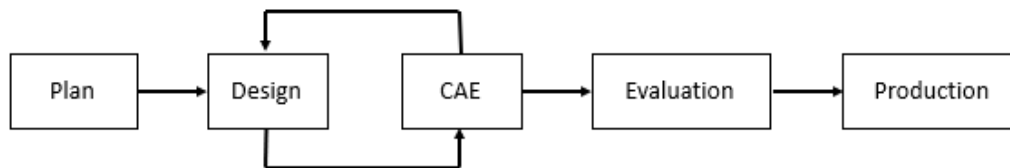


Figura 2. Proceso de diseño propuesto

El software de diseño en el departamento de brackets es NX Unigraphics, que contiene un módulo de Preprocesamiento y Postprocesamiento, se busca generar un proceso que ayude a aprovechar los recursos al alcance de los diseñadores y a partir de un diseño de experimentos se conocerán los parámetros que mejor aproximen a la validación oficial del Centro de Ingeniería en India (TCI).

Diseño de Experimentos (DOE)

El diseño de experimentos está basado en un diagrama de parámetros que en una perspectiva amplia suele ser visto como ayuda para la robustez de los parámetros y confiabilidad de productos (5). Se muestra en la Figura 3, nuestro diagrama en donde el sistema tiene como entrada la necesidad de hacer un análisis modal y conocer la frecuencia natural de los brackets metálicos.

Se usó el módulo de simulación avanzada de NX Nastran, utilizando la solución 103, que corresponde a la extracción de los eigenvalores (frecuencias naturales) y los modos de vibración (eigenvectores) correspondientes al análisis Modal (3).

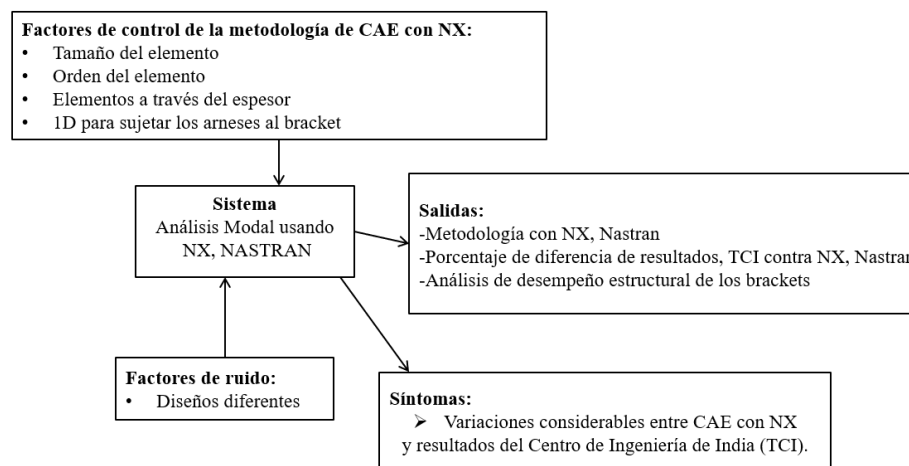


Figura 3: Diagrama de Parámetros.

Estrategia de Factores de Control

Los factores de control corresponden a los parámetros que el ingeniero de diseño puede modificar a su conveniencia dentro del módulo de análisis avanzado con el fin de refinar el análisis CAE, el arreglo del diseño de experimentos se muestra en la Tabla 1. Cada combinación de los factores puede contribuir a obtener diferencias importantes en los resultados por iteración, cada combinación generará una metodología o proceso de análisis diferente, la descripción correspondiente a cada variable se muestra a continuación.

Tamaño del elemento: De acuerdo con el tamaño recomendado por el software y conociendo la variación de espesor en estos componentes, se propuso como valores iniciales 2mm como mínimo y 4 mm el máximo.

Orden del elemento: variará entre tetraedro de primer orden que consta de 4 nodos o un tetraedro de segundo orden que consta de 10 nodos.

Elementos a través del espesor: Usar un elemento reduce el número de nodos de la malla, por lo tanto el tiempo de procesamiento también se reduce, pero se plantea la posibilidad de que se genere un modelado más rígido del componente o de la pieza, por otro lado si se usan dos elementos a través del espesor es probable que el comportamiento de la malla durante el análisis sea más próximo a la realidad, no existe seguridad de cuánto difiere el uno del otro, el análisis nos llevará a conocer cuál aproxima mejor al resultado oficial de validación.

Tipo de elemento 1D que se usará para sujetar la masa al bracket: se consideraron dos tipos, RBE2 que es un tipo de elemento de 1 dimensión considerado infinitamente rígido y que no transmite ningún desplazamiento en sus nodos y el siguiente tipo es el RBE3 que es un elemento rígido de 1 dimensión con la capacidad de transmitir desplazamientos en sus nodos.

Ruido: El proceso debe ser robusto e insensible a los diferentes diseños, masa de los arneses y las condiciones de sujeción que puedan presentar los brackets, se eligieron 8 diferentes geometrías de brackets para los cuales se usó acero como material.

Síntomas: Observar variaciones considerables en el valor de la primera frecuencia modal obtenida con NX Nastran respecto de la proporcionada por Centro de Ingeniería en India (TCI) como Validación oficial CAE.

Las salidas: el primero corresponde al porcentaje de variación entre resultados TCI contra los resultados obtenidos en NX Nastran, y la segunda salida será la identificación de los factores de control que generan el resultado más próximo al resultado oficial.

Tabla 1. Factores de control y niveles.

Columna	Factor	Nivel	
		1	2
A	Tamaño del elemento	2mm	4mm
B	Orden del elemento	1°	2°
C	C	1	2
D	Elementos a través del espesor	1 elemento	2 elementos
E	E	1	2
F	F	1	2
G	Tipo de elemento 1D	RBE2	RBE3

Diseño de Taguchi

En los diseños de Taguchi los factores de ruido se manipulan para hacer que haya variabilidad y, con base en los resultados, identificar la configuración óptima de los factores de control que haga que el proceso o producto sea robusto al ruido. Valores más altos en la relación de señal a ruido (S/N) identifican configuraciones de factores de control que minimizan los efectos de los factores de ruido, es decir permite encontrar los parámetros óptimos (4). Los experimentos de Taguchi suelen usar un proceso de optimización de 2 pasos. En el paso 1, se utiliza la relación señal a ruido para identificar los factores de control que reducen la variabilidad. En el paso 2, se identifican los factores de control que permiten mover la media al objetivo y tienen poco o ningún efecto sobre la relación de señal a ruido (2).

La relación de señal a ruido mide cómo varía la respuesta en relación con el valor nominal u objetivo bajo condiciones de ruido diferentes. Para diseños estáticos existen diferentes relaciones de señal a ruido, para este caso

se usó “más pequeño es mejor” ya que nos ayuda a minimizar la respuesta y reducir la diferencia contra los resultados de TCI. En la Tabla 2 se muestra el diseño de experimentos generado por la metodología de Taguchi.

Tabla 2. Diseño de Taguchi.

Más pequeño es mejor Optimization							
	A	B	C	D	E	F	G
	Tamaño del elemento	Orden del elemento	C	Elementos a través del espesor	E	F	Tipo de elemento 1D
1	2mm	1°	1	1 elemento	1	1	RBE2
2	2mm	1°	1	2 elementos	2	2	RBE3
3	2mm	2°	2	1 elemento	1	2	RBE3
4	2mm	2°	2	2 elementos	2	1	RBE2
5	4mm	1°	2	1 elemento	2	1	RBE3
6	4mm	1°	2	2 elementos	1	2	RBE2
7	4mm	2°	1	1 elemento	2	2	RBE2
8	4mm	2°	1	2 elementos	1	1	RBE3

Comentarios Finales

Resumen de resultados

Los resultados arrojados por el diseño de experimentos se encuentran en la Tabla 3, de acuerdo al arreglo de Taguchi fue requerido correr 8 diferentes combinaciones con 8 geometrías diferentes de brackets, la salida será la obtención de las frecuencias naturales que serán comparadas contra los resultados oficiales del Centro de Ingeniería en India (TCI), también en la tabla 3 se puede observar que la combinación 3 produce la mejor aproximación.

Los factores de control para la combinación ganadora son: tamaño de elemento de 2mm, elemento de orden 2, 1 elemento a través del espesor, y RBE3 como elementos para sujetar la masa concentrada.

Podemos observar una diferencia es mínima entre la combinación 3 y combinación 4, sin embargo, el costo computacional es menor cuando usamos 1 elemento a través del espesor, pues el número de nodos del modelo también se reduce, por lo tanto, se opta por usar 1 elemento a través del espesor.

Tabla 3. Resultados del Diseño de Experimentos (DOE): Comparación NX Nastran contra TCI. Resultados de frecuencias naturales para las combinaciones con respecto a cada bracket y su comparación contra TCI.

Bracket	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
Combinación 1	100.34	143.84	298.35	334.56	58.75	98.61	62.32	99.85
Combinación 2	79.90	114.69	198.77	286.65	44.89	69.60	51.39	74.59
Combinación 3	40.04	84.11	222.82	252.48	35.96	39.73	39.77	53.27
Combinación 4	40.45	84.83	180.04	253.29	37.94	60.89	39.72	55.93
Combinación 5	69.32	168.34	293.53	380.54	61.97	100.70	76.33	116.72
Combinación 6	60.48	138.13	162.65	233.14	55.55	100.62	61.06	100.43
Combinación 7	41.05	85.92	158.66	255.21	38.33	61.69	39.89	56.53
Combinación 8	40.23	84.16	158.46	252.34	34.54	50.51	39.76	53.96
TCI resultado	41.81	84.42	201.72	287.4	38.5	40.39	40.99	58.17

Graficas de Media y Señal Ruido

Gráfica Señal-Ruido

Dentro de la Figura 4, se pueden identificar los factores que influyen para que el procedimiento sea robusto a los ruidos de entrada. Se puede observar que los parámetros 1 y 4 tienen variaciones pequeñas por ende son insensibles al ruido y se observa también que el orden del elemento, factor 2, contiene la variación más grande, para este caso el nivel dos de ese factor, es decir el orden del elemento 2 es el adecuado. En cuanto a tercer factor de control, se define como óptimo el nivel 1, es decir un elemento a través del espesor a pesar de que en la gráfica el sugerido sea el nivel 2, esto es debido al costo computacional que representa.

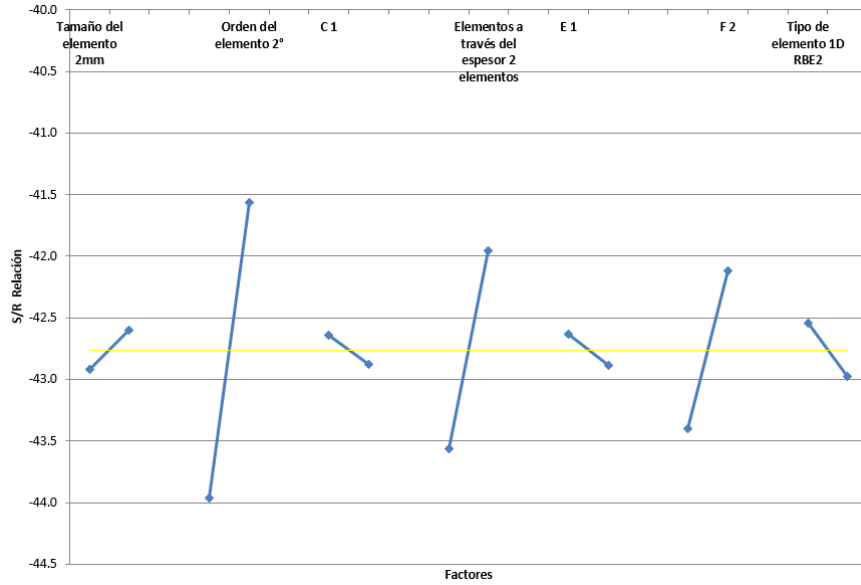


Figura 4: Gráfica Señal-Ruido

Gráfica de la media

La gráfica de media, Figura 5, muestra los niveles de cada factor de control que permiten que el resultado tenga una variación cercana a cero, esto corresponde a la aproximación con respecto al resultado de la validación oficial, en este caso podemos observar que la variación entre 2 mm y 4 mm es imperceptible, sin embargo, al analizar la geometría de los brackets se definió que el de 2 mm permite aproximar de mejor manera.

En cuanto al orden del elemento podemos observar que el orden de elemento 2 permite reducir la diferencia de resultados.

El número de elementos a través del espesor que más acerca al resultado es 2, sin embargo, el seleccionado es 1 pues la variación es mínima entre ambos al analizar los resultados en la tabla 3, entre combinación 3 y combinación 4, sin embargo, se obtiene un modelo más simple haciendo que el costo computacional baje prácticamente a la mitad.

En cuanto al tipo de elemento 1D para sujetar las masas se seleccionó el tipo RBE2, pues reduce la diferencia entre resultados.

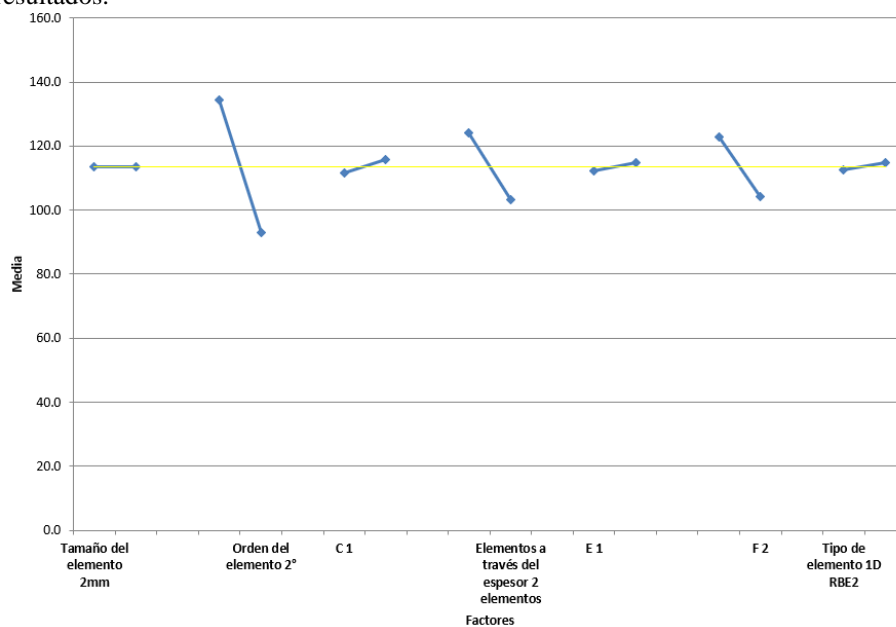


Figura 5: Gráfica de Media

Resultados de la Implementación

En la Figura 6 se muestra una comparativa entre los resultados de TCI, (figura izquierda) y los resultados de NX Nastran (figura derecha), como se puede observar, los modos de vibración y la distribución de desplazamientos a través del bracket es idéntica, la primera frecuencia natural en el caso de la validación oficial corresponde a 113 Hz mientras que en el caso de NX Nastran el resultado obtenido es de 113.5 Hz, esto demuestra que el procedimiento obtenido nos acerca al resultado deseado.

Como parte de este proyecto una de las etapas finales ha sido la verificación del procedimiento con diferentes geometrías, espesores y aceros, de modo que se revalide que proceso obtenido como la solución óptima.

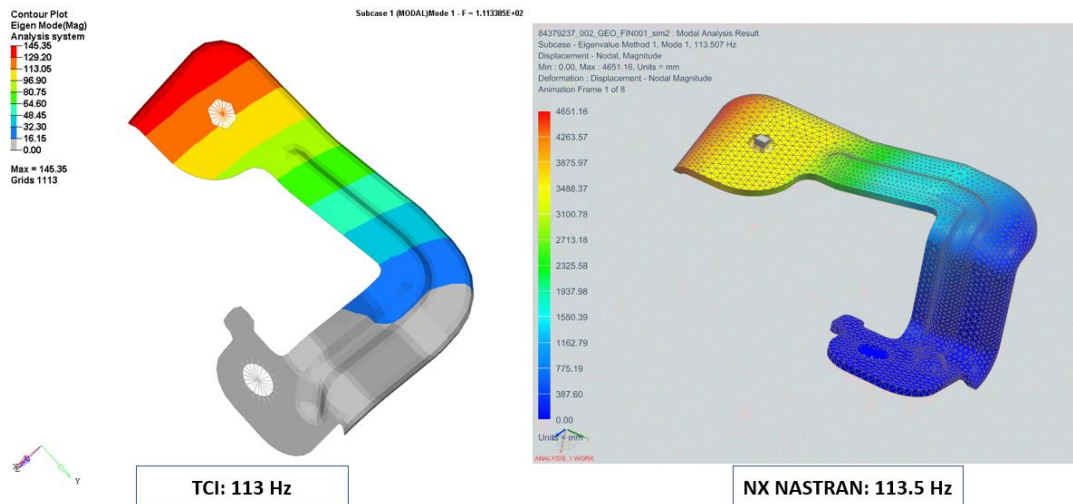


Figura 6. Comparación TCI contra NX Nastran.

Conclusiones

La industria automotriz se encuentra en un momento sin precedentes, la transición que se vive actualmente entre vehículos de combustión interna y vehículos eléctricos autónomos ha llevado a las grandes OEM's a buscar nuevos recursos de innovación donde el uso de herramientas de CAE jugará un rol importantísimo al permitir acelerar el desarrollo de productos, mejorar el desempeño, la seguridad y la durabilidad de los componentes.

El uso de softwares CAD con módulos de análisis CAE o análisis de elemento finito resulta ser una herramienta de gran ayuda para los ingenieros de diseño, ya que permite conocer los puntos críticos a través de la interpretación de los resultados y desde etapas tempranas usarse en el desarrollo de los diferentes productos, el entendimiento de los diseñadores en cuanto al comportamiento estructural generará componentes robustos y permitirá un mejor uso de los recursos de la empresa.

Recomendaciones

Como parte de una segunda etapa se plantea la posibilidad de automatizar parte del proceso con ayuda de un código basado en NX, esto ayudará a tener una mejor eficiencia con el equipo de diseño.

Se buscará expandir el procedimiento aquí discutido a diferentes áreas de diseño con la intención de agilizar el proceso de diseño en componentes de mayor volumen.

Referencias

1. *Ingeniería asistida por computadora y Optimización de productos*. **Rodríguez, Rafael Glen**. 23 de 11 de 2016, INFORMÁTICA, pág. 6.
2. **Minitab**. Support Minitab. [En línea] 2019. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/what-is-the-signal-to-noise-ratio/>.
3. **Siemens Product Lifecycle Management Software Inc**. plm.automation.siemens. *Advanced Dynamic Analysis User's Guide*. [En línea] 2014. https://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nxnastran/10/help/en_US/tdocExt/pdf/basic_dynamics.pdf.
4. **Taguchi, Genichi, Chowdhury, Subir y Wu, Yuin**. *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. s.l. : Hoboken, NJ : Wiley, 2005.
5. *Using parameter-diagrams in automotive engineering*. **Fritzsche, R**. 2006, ATZ Worldw, págs. 108, 17–21.

Notas Biográficas

La Ing. **Indira Cruz Realeño** es Ingeniera de Diseño de General Motors de México, tiene 5 años de experiencia en el desarrollo de brackets metálicos para arneses. Ingeniera de Liberación de componentes plásticos y metálicos durante 3 años. Terminó sus estudios de Ingeniería Mecánica en la Universidad Autónoma del Estado de México. Actualmente aspirante al grado de Maestría en Procesos de Manufactura Avanzada por CIATEQ.