

Trabajo Fin de Máster

Optimización multiobjetivo de la resistencia al
impacto de la estructura frontal de un vehículo
Multi-objective crashworthiness vehicle front end
optimization

Autor/es

Raúl Soriano Alquézar

Director/es

Luis Castejón Herrero
María José Oliveros Colay

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2020/21



D./D^a. Raúl Soriano Alquezar

en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de Estudios de la titulación de Máster Universitario en Ingeniería Mecánica (Título del Trabajo)

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 18 de Noviembre de 2021

Fdo:

Contenido

MEMORIA.....	5
1. Introducción	6
2. Descripción del modelo de elementos finitos	8
3. Criterios de diseño frente a impacto	17
4. Diseño de Experimentos.....	19
5. Modelo subrogado	27
6. Optimización multiobjetivo	29
7. Verificación del modelo subrogado.....	34
8. Conclusión	35
Bibliografía	36
Índice de Figuras	37
Índice de Tablas.....	37
ANEXOS.....	38
ANEXO I Códigos de post-procesamiento en de los resultados FEM	39
ANEXO I.1 Código para Procesar los datos de los materiales.....	39
ANEXO I.2 Código para leer ‘matsum’	41
ANEXO II Código para la automatización del Diseño de Experimentos.....	43
ANEXO II.1 Código para extraer la masa del modelo	43
ANEXO II.2 Código para extraer la energía absorbida del modelo	44
ANEXO II.3 Código para extraer la Fuerza máxima del modelo.....	45
ANEXO II.4 Programa para el lanzamiento del diseño de experimentos.....	46
ANEXO III Resultados de MINITAB	49
ANEXO III.1 Resultados para la masa	49
ANEXO III.2 Resultados para la energía absorbida	51
ANEXO III.3 Resultados para la Fuerza máxima	53
ANEXO IV Código del NSGA-II.....	55
ANEXO IV.1 CÓDIGO LANZAMIENTO.....	55
ANEXO IV.2 FUNCIÓN OBJETIVO	57
ANEXO IV.3 ORDENAR.....	58
ANEXO IV.4 TORNEO	61
ANEXO IV.5 CRUCE	62
ANEXO IV.6 SELECCIÓN	65

MEMORIA

1. Introducción

En la fase de diseño de un vehículo es necesario asegurar el mejor comportamiento frente a un impacto. En una colisión, la resistencia al impacto depende del diseño de la estructura, de los materiales seleccionados y del espesor entre otros factores. Realizar pruebas reales para validar el diseño es muy costoso en tiempo y dinero. Para ahorrar costes y tiempo en el desarrollo se usa el método de los elementos finitos para realizar simulaciones por ordenador del impacto del vehículo. Aun así, la decisión de que materiales o que espesores puede llevar también mucho tiempo para ajustar cuales serían los correctos.

En la última década se ha empezado a usar la metodología del diseño de experimentos seguida de una optimización del modelo subrogado extraído de los datos [1] [2]. El flujo de trabajo queda como el representado en la Figura 1. De esta manera el tiempo computacional disminuye al transformar el modelo de elementos finitos en una función o modelo subrogado que será posteriormente optimizada.

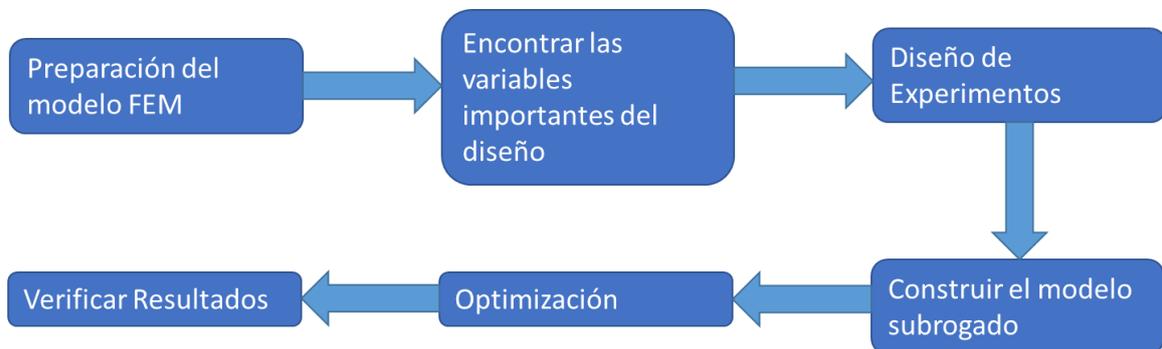


Figura 1 Esquema de la optimización mediante modelo subrogado

Para poder generar este modelo subrogado es necesario primero un diseño de experimentos donde se generan unos puntos del diseño lanzados con el modelo de elementos finitos dentro de los límites del espacio de diseño acordado dando diferentes valores a las variables de entrada y obteniendo las variables de respuesta seleccionadas para la optimización para cada uno de los casos.

Aunque hay varios tipos de modelos subrogados para representar respuestas más o menos complejas se puede capturar el modelo mediante un simple polinomio de orden dos, denominado modelo subrogado de superficie de respuesta [3] y que se detallará en el apartado 5.

Una vez establecida la función o funciones que modelizan las respuestas, se procede a realizar la optimización del problema para encontrar el mejor diseño. Esta optimización consiste en minimizar o maximizar, dependiendo del resultado que se desea conseguir, la respuesta del modelo subrogado. Esta optimización cuando se desea llevar a cabo de más de una función se llama multiobjetivo, y entonces, los criterios ya son de compromiso entre las dos o más funciones.

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

Por último, con algunos de los puntos de diseño obtenidos de la optimización se evalúan con la simulación por elementos finitos para verificar que la respuesta obtenida del modelo subrogado concuerda con la que daría el modelo de simulación.

Con el resumen del proceso de optimización a partir de un modelo subrogado, los objetivos del presente trabajo son:

1. Preparar un modelo de elementos finitos de una simulación de impacto de una estructura frontal de un vehículo.
2. Encontrar las variables más importantes del diseño para plantear un diseño de experimentos.
3. Capturar la función o modelo subrogado de la respuesta extraída de los puntos de diseño.
4. Plantear una optimización multiobjetivo del modelo para encontrar los mejores valores para las variables de entrada dependiendo del comportamiento deseado.
5. Validar el modelo subrogado con la simulación de elementos finitos.

Para realizar el trabajo, el modelo de elementos finitos ha sido preparado con LS-DYNA, software predilecto para cálculos explícitos de elementos finitos de impacto de vehículos. Los datos para elegir las variables de diseño han sido procesados con MATLAB, programa que también se ha usado para automatizar el diseño de experimentos, ya que el coste en tiempo aumentaría al lanzar cada punto de diseño uno a uno. Los diferentes puntos del diseño con su correspondiente respuesta se han importado a MINITAB, para así, aparte de obtener la superficie de respuesta, se ha realizado un análisis de sensibilidad para obtener el efecto de aumentar o disminuir una variable de entrada y sus interacciones. Con el modelo subrogado que definirían las variables de respuesta se ha vuelto a MATLAB para realizar la optimización multiobjetivo y para lanzar la verificación del mismo modo que el diseño de experimentos.

2. Descripción del modelo de elementos finitos

En esta sección se va a exponer el modelo de elementos finitos de la estructura frontal del vehículo objeto de estudio. Se partió del modelo numérico del Toyota Yaris que está en descarga en la página web de la [NHTSA](#) (National Highway Traffic Safety Administration) que se trata de la **Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras**, agencia dependiente del gobierno de los Estados Unidos y ha sido desarrollado por National Crash Analysis Center (NCAC) de la Universidad de George Washington (GWU). El modelo consiste en la simulación por elementos finitos de la prueba de impacto frontal de la NCAP del model Toyota Yaris de 2010 [4].

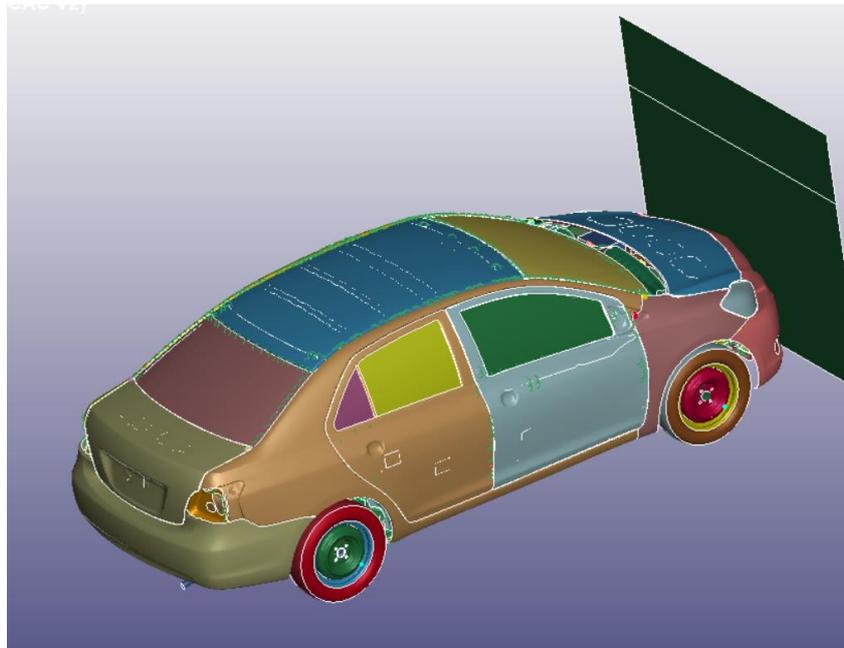


Figura 2 Modelo del Toyota Yaris de la NCAC

Para este trabajo no se empleó el modelo completo, ya que el coste en tiempo y computacional del modelo completo sería muy alto para desarrollar un diseño de experimentos. Antes de lanzar el modelo LS_DYNA hace una estimación del tiempo de la simulación. En este caso, son necesarias 24 h para el modelo completo. Si como se verá más adelante, se han lanzado 54 puntos de diseño, el tiempo total de simulación serían de 54 días. Para el modelo a optimizar se separó la estructura frontal del Toyota Yaris y se eliminaron los demás componentes, siendo ahora el coste en tiempo de 15 minutos y el total del diseño de experimentos de 13 horas y media. Finalmente, el modelo estaba compuesto por 32 partes y un total de 23 266 elementos y 25798 nodos.

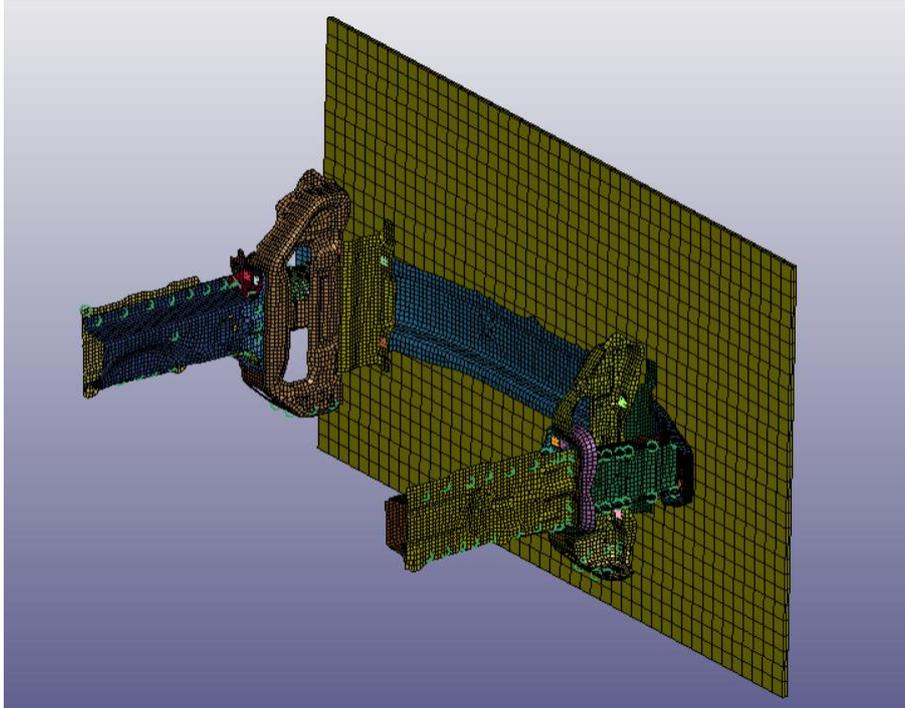


Figura 3 Modelo numérico de la estructura frontal

Para el modelo a estudio se modificaron las condiciones de contorno. Se le impuso al muro rígido una velocidad inicial. Se redujo en un orden de magnitud la velocidad establecida para el vehículo en el modelo del Yaris, quedando así una velocidad de 1565 mm/s. Así resulta más fácil para el observador visualizar la simulación para el tiempo de simulación establecido de 0,2 s. También, se restringió el movimiento completo de los nodos resaltados en la Figura 4. De esta manera el muro rígido avanza hacia la estructura frontal provocando su deformación y no como era al principio que el vehículo iba hacia el muro rígido.

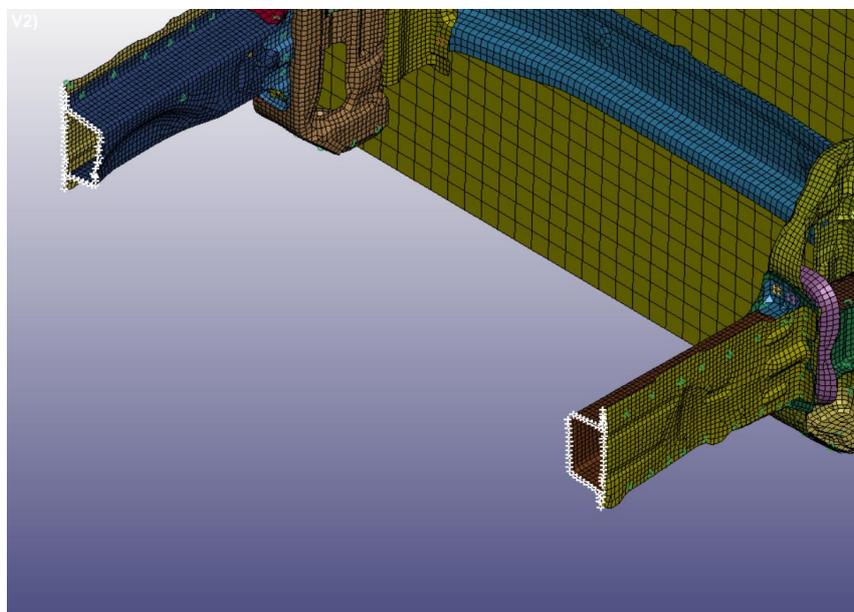


Figura 4 Restricción de movimiento

Respecto a los materiales, aunque ya estaban impuestos en el modelo, se exportaron las curvas de deformación introducidas en LS-DYNA para tener mejor acotado el comportamiento frente al impacto de la solución. Los cinco materiales definidos en los diferentes componentes son los expuestos en la Figura 5. Aunque en el modelo los materiales no estaban definidos con su nombre real sino con numeración se observó que el módulo de Young de todos los materiales es de 200 GPa pero con diferentes límites elásticos.

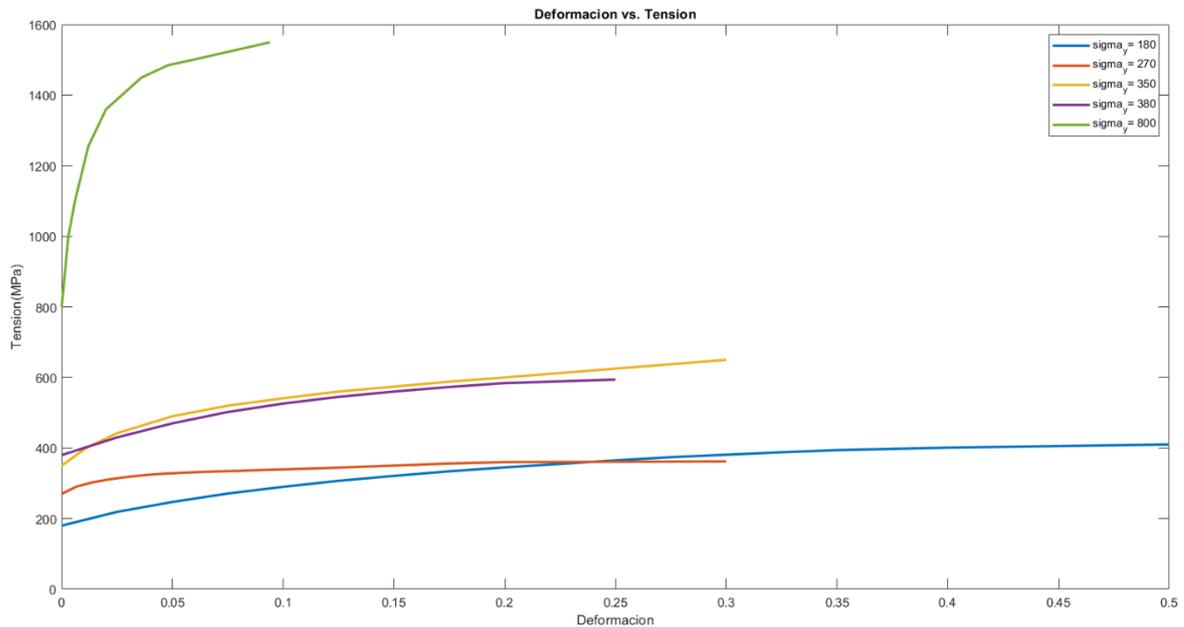


Figura 5 Curvas Tensión deformación Materiales del modelo

Como se verá en el apartado 3, el criterio principal frente a impacto es la energía absorbida por la estructura. Está energía, para un material, se calcula como el área encerrada de su curva tensión deformación. Calculándola para los materiales del modelo se ha obtenido la Tabla 1, el código para procesar estos datos está en el ANEXO I.1.

Limite elástico del material	Area bajo la curva
180	172.52
270	103.33
350	167.37
380	131.65
800	133.26

Tabla 1 Energía de deformación del material

Se observó que el material inicial que más energía absorbía era el de límite elástico de 180 MPa seguido del de límite elástico de 350. El acero de límite elástico de 180 se emplea solo en el soporte del radiador de la Figura 6, por lo que a priori este componente al no tener una función estructural no será significativo para el diseño. El acero de límite elástico de 350 sí que se emplea

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

en bastantes componentes. Que estos materiales sean los que mayor capacidad tienen de absorber energía no quiere decir que los componentes vayan a ser los que mayor energía absorban. También dependerá de los espesores de los componentes o de la orientación que estos tengan hacia el impacto.

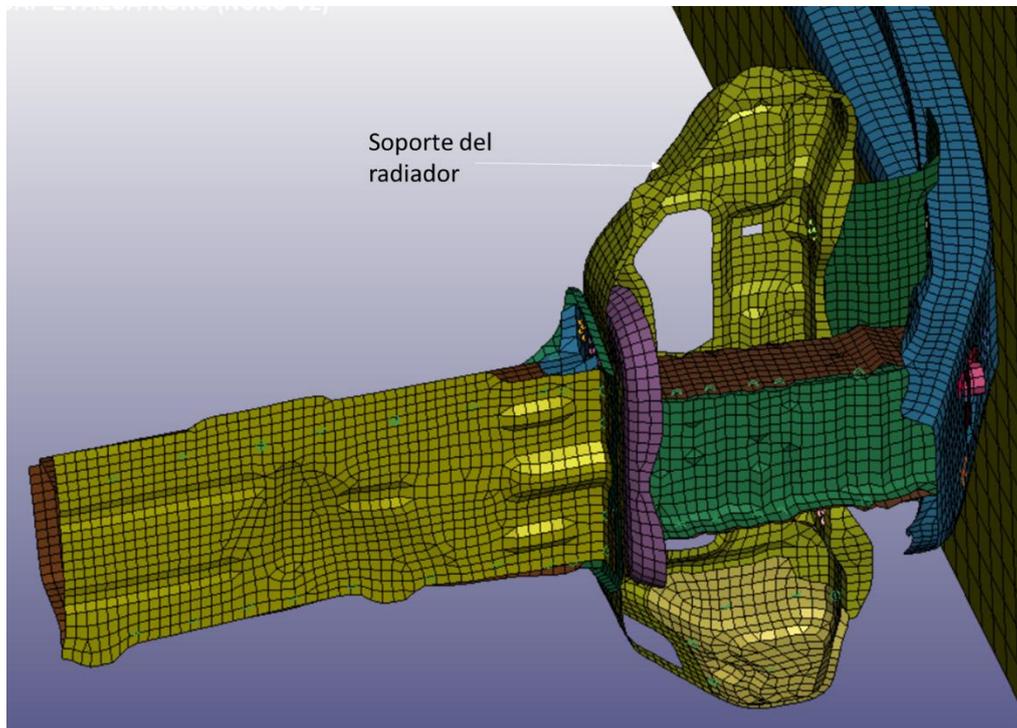


Figura 6 Soporte del radiador

Con todo el modelo definido se lanzó una simulación en LS-DYNA para observar el aporte de cada componente a la energía de deformación global de la estructura. En las siguientes figuras se puede observar la secuencia del modelo.

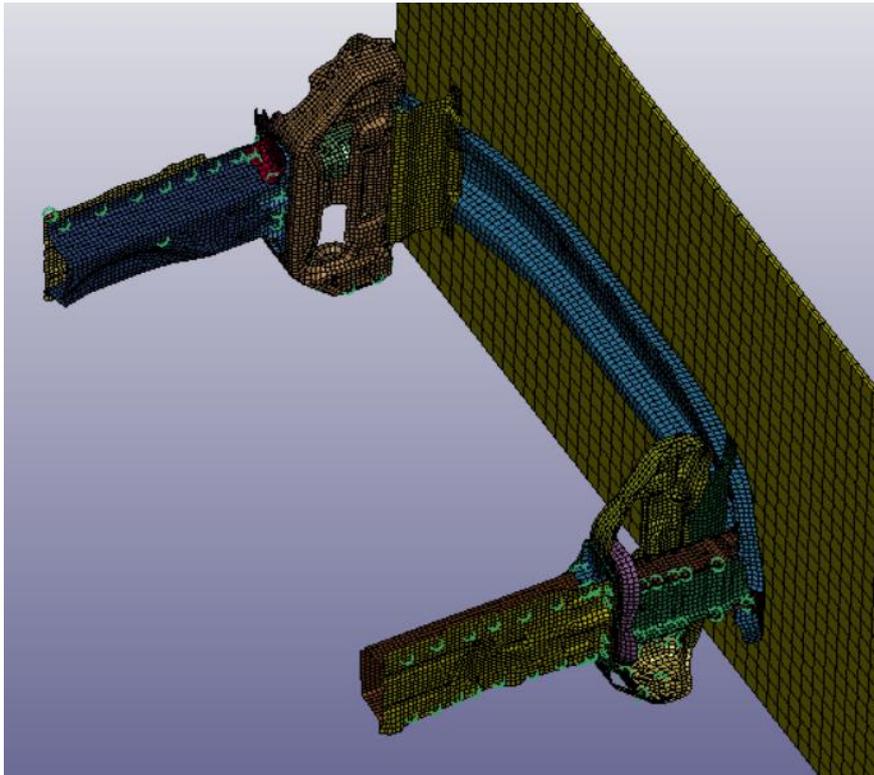


Figura 7 Instante 0 segundos

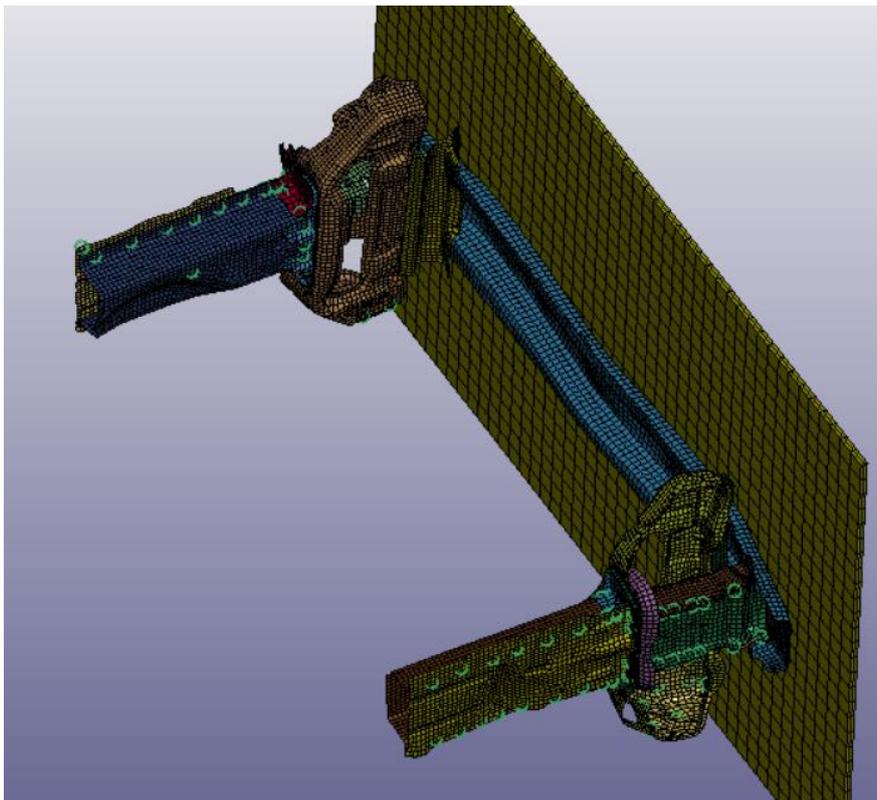


Figura 8 Instante 0.05 segundos

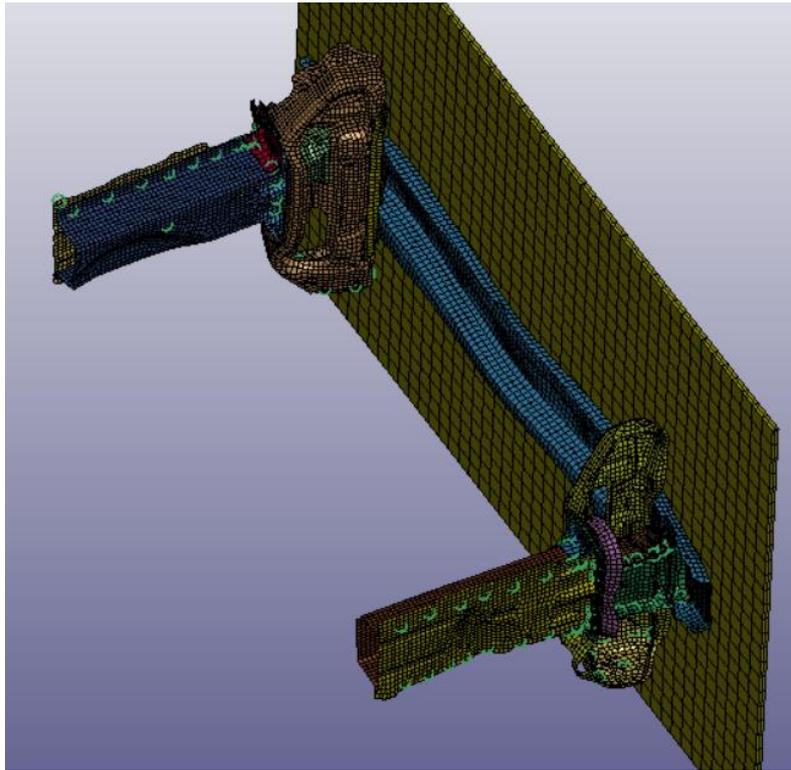


Figura 9 Instante 0.1 segundos

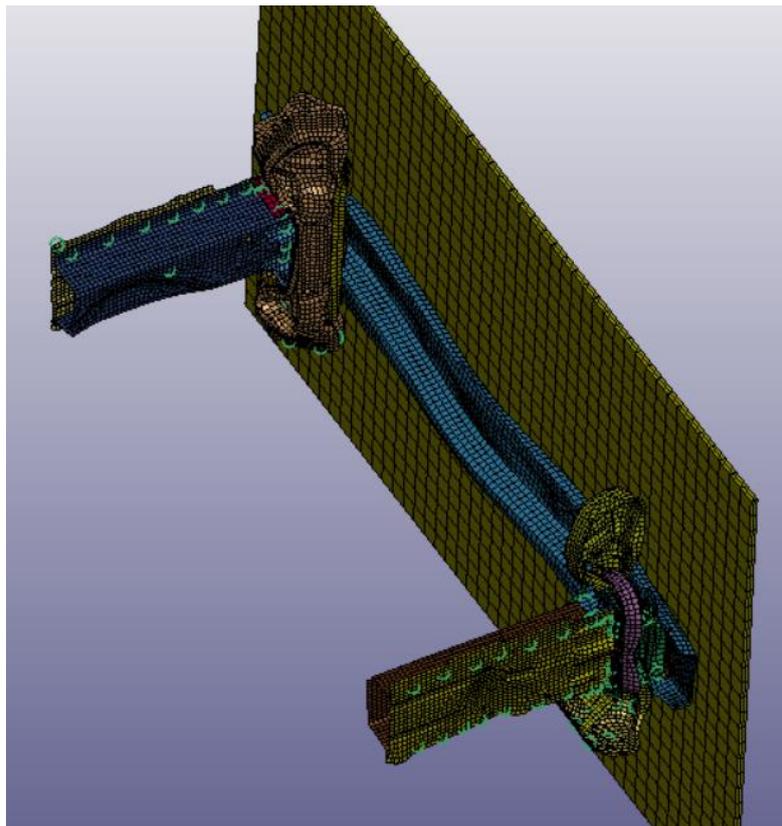


Figura 10 Instante 0.15 segundos

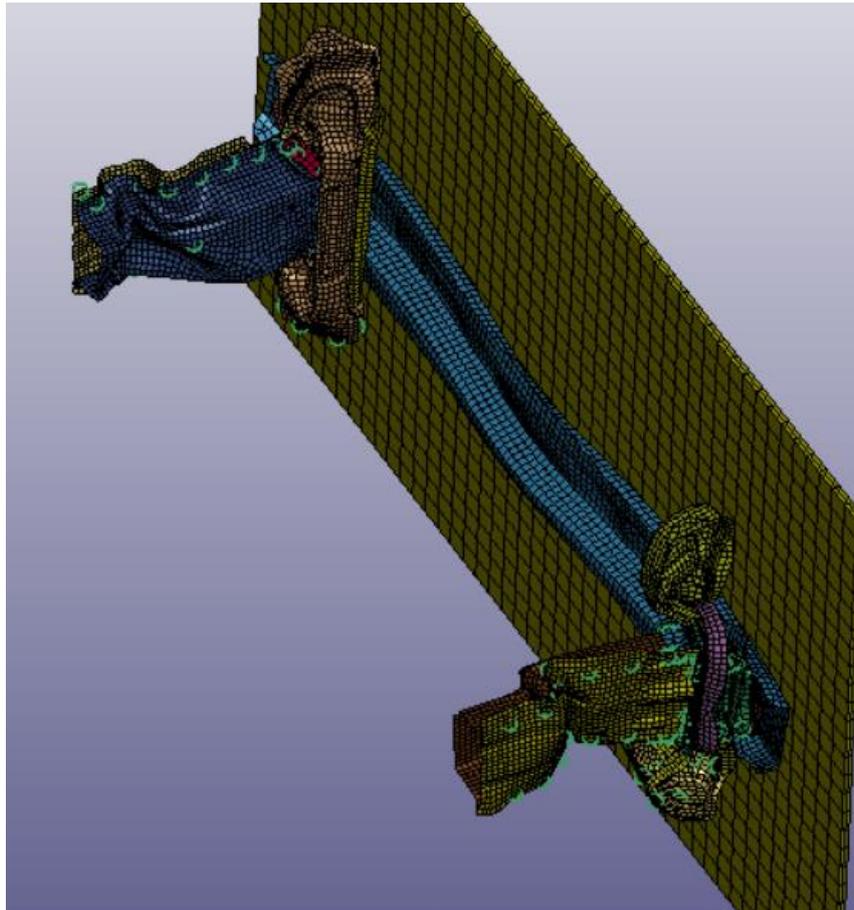


Figura 11 Instante 0.2 segundos

En LS-DYNA se puede indicar los resultados que se quiere exportar en código ASCII ya sea para visualizarlos en el post-procesador de LS-DYNA o en llevar los resultados para su procesamiento en otro programa. En este caso, se necesitaba que LS-DYNA exportara los datos de la energía absorbida por cada uno de los componentes, los cuáles se escribían en el archivo 'matsum'. Este archivo ha sido leído en MATLAB mediante el código en el ANEXO I.2.

De las partes que componen el modelo, cinco de ellas fueron identificadas como las principales y las que mayor contribución hacían a la energía absorbida. En la Figura 12 se puede observar la evolución de la Energía interna en los diferentes componentes conforme pasa el tiempo. Mientras que en la Tabla 1 se han expuesto el porcentaje de energía absorbida por cada componente sobre el total de energía absorbida.

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

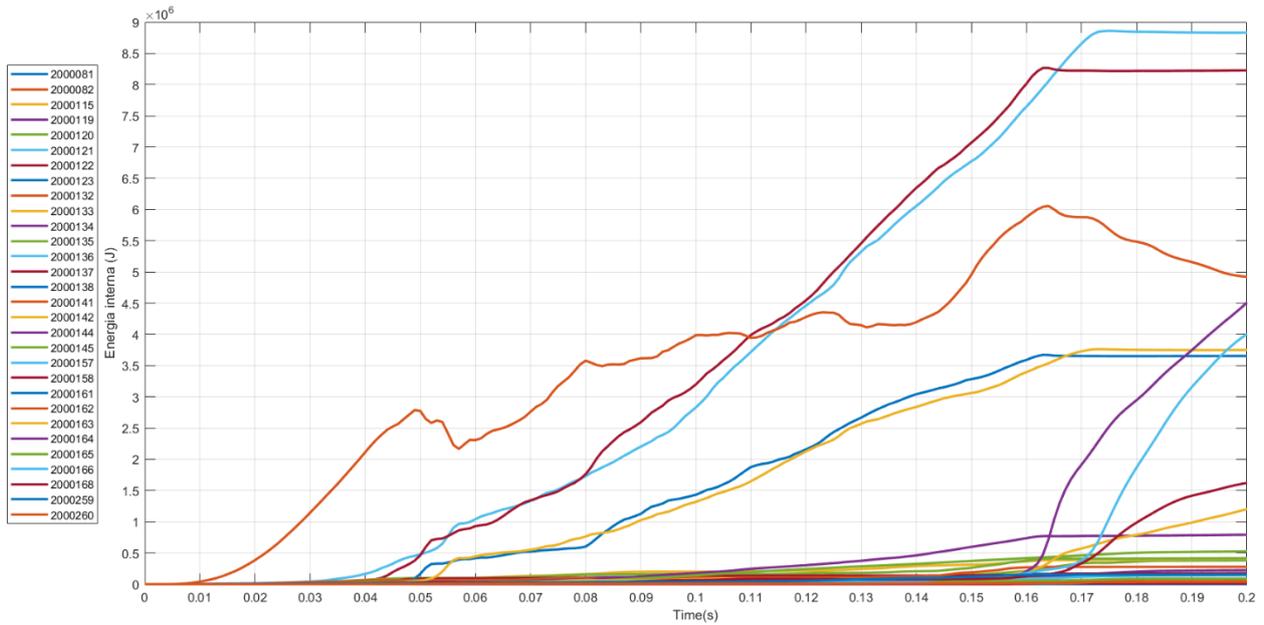


Figura 12 Energía absorbida por las diferentes partes del modelo

Componente	Energía(J)	Porcentaje
'2000121'	8832200	19.73%
'2000122'	8227700	18.38%
'2000132'	4921400	11.00%
'2000164'	4509000	10.07%
'2000166'	4004800	8.95%
'2000142'	3751100	8.38%
'2000138'	3654400	8.16%
'2000168'	1620800	3.62%
'2000163'	1201400	2.68%
'2000144'	791910	1.77%
'2000145'	526850	1.18%
'2000135'	415820	0.93%
'2000133'	410890	0.92%
'2000120'	382050	0.85%
'2000141'	277920	0.62%
'2000134'	224390	0.50%
'2000137'	175340	0.39%
'2000123'	161350	0.36%
'2000259'	154960	0.35%
'2000157'	141900	0.32%
'2000165'	87356	0.20%
'2000162'	47511	0.11%
'2000119'	42086	0.09%
'2000115'	41088	0.09%
'2000136'	40200	0.09%
'2000161'	38598	0.09%
'2000260'	37046	0.08%
'2000082'	23296	0.05%
'2000158'	12453	0.03%
'2000081'	1467.6	0.00%

Tabla 2 Energía interna por componente

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

Con estos resultados se han seleccionado los cinco componentes que serán objeto de optimización del espesor. Los componentes '2000121' y '2000122' se tratan de los crash-box interiores, el componente '2000132' es el bumper, los componentes '2000166' y '200164' son los raíles frontales interiores, los componentes '2000138' y '2000142' son los crash-box exteriores y los componentes '2000168' y 2000163' los raíles frontales externos. En la Figura 13 quedan reflejados estos componentes.

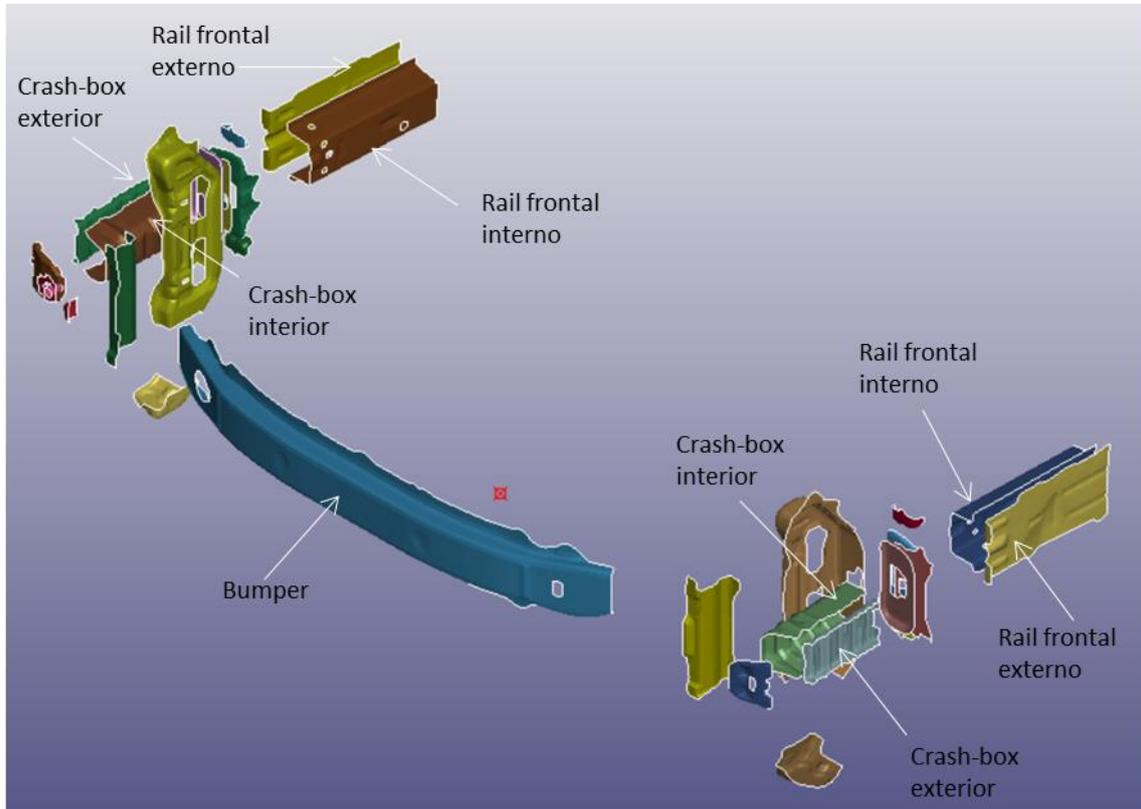


Figura 13 Componentes a objeto de estudio

3. Criterios de diseño frente a impacto

En general, hay varios parámetros que pueden ser empleados para evaluar el comportamiento de un vehículo frente a impacto. El principal indicador se trata de la energía específica absorbida (SEA, por sus siglas en inglés) [5]. La energía absorbida de un automóvil mide la capacidad de disipar la energía del impacto durante el choque. Maximizándola protegerá a los ocupantes de que le llegue una mayor fuerza de impacto y puede ser determinada matemáticamente como:

$$EA = \int_0^{\varphi} F(\varphi) d\varphi$$

Donde $F(\varphi)$ es la fuerza de impacto instantánea en función del desplazamiento φ .

SEA sería la energía absorbida por unidad de masa.

$$SEA = \frac{EA}{M}$$

Para obtener el SEA tenemos que extraer la energía interna absorbida por la estructura y la masa. Estos resultados se obtienen en los archivos ASCII exportados por LS-DYNA nombrados como 'glstat' y 'd3hsp'. En el ANEXO II.1 y el ANEXO II.2, están los códigos para extraer la energía y la masa respectivamente.

El segundo indicador que se ha usado ha sido el la Fuerza máxima de reacción durante el impacto (PCF, por sus siglas en inglés). Minimizar la Fuerza máxima hará que la aceleración sufrida por los ocupantes sea menor. Este indicador se extrae del histórico de la Fuerza de reacción, que se encuentra en el archivo ASCII llamado como 'spcforc'. Este parámetro se extrae con la función que se encuentra en el ANEXO II.3.

En principio se iba a usar el CFE el cuál se describe como la Fuerza media entre la Fuerza máxima y el final del impacto. Este indicador mide la capacidad de la estructura de mantener la Fuerza una vez ha llegado a su nivel máximo [6]. En la Figura 14 se observa gráficamente este fenómeno.

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

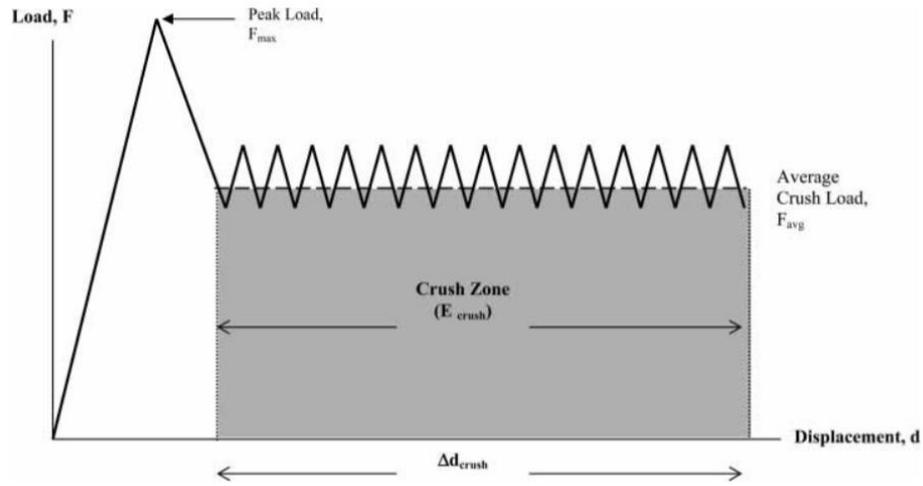


Figura 14 Crush Force Efficiency [6]

Este criterio no se ha usado ya que como se observa en la Figura 15, donde se exponen varios históricos de la Fuerza durante la simulación de diferentes puntos de diseño del posterior diseño de experimentos, la Fuerza en este modelo es creciente y se alcanza su máximo casi al final, que se trata de cuando el muro rígido alcanza los raíles frontales. Por ello se ha usado el criterio de la Fuerza máxima de reacción durante el impacto como indicador a optimizar.

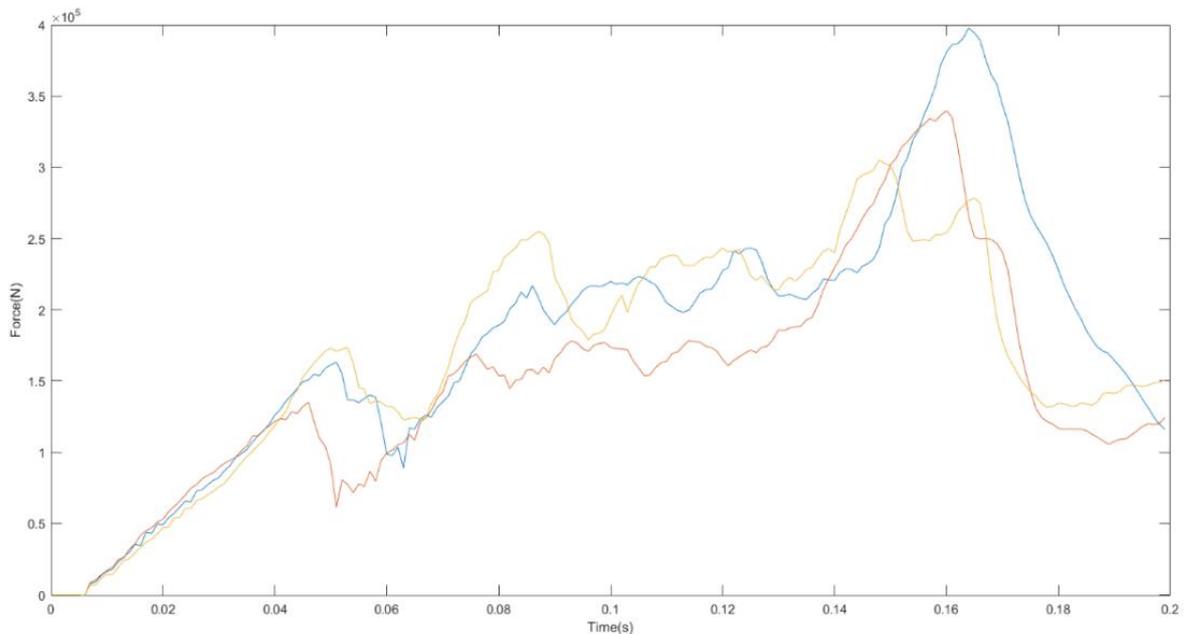


Figura 15 Fuerza vs tiempo de diferentes variaciones en espesor del modelo

4. Diseño de Experimentos

Con las variables de respuesta que se quieren obtener del modelo de elementos finitos se procede a definir el diseño de experimentos para poder modelar la superficie de respuesta que definirá el modelo subrogado.

Para adaptar un modelo lineal, se necesitan dos niveles de cada variable. Si en cambio, se desea adaptar un polinomio de segundo orden, como es este caso, se necesita un mínimo de tres niveles para cada variable. Un diseño 3^k debería ser el utilizado, pero eso requeriría demasiados puntos de diseño. Con cinco variables los puntos de diseño a lanzar serían, $3^5 = 243$.

En su lugar, para adaptar un modelo de segundo orden puede usarse un diseño central compuesto (CCD). El CCD se trata de un diseño factorial de dos niveles aumentado por un punto central y puntos axiales a una distancia α del origen o punto central. En la siguiente imagen se puede observar un CCD para 2 y 3 factores [7].

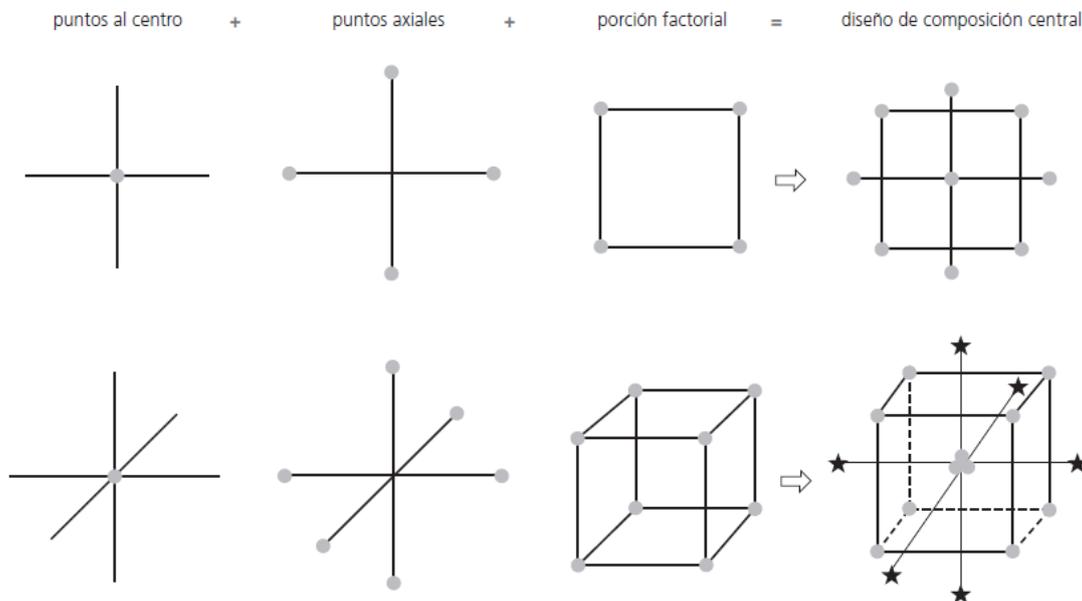


Figura 16 Diseño de experimentos CCD [7]

En el caso a estudio se tienen cinco factores que son los espesores de los componentes de mayor peso en la energía absorbida que se han elegido para plantear la optimización. El rango de cada factor se observa en la Tabla 3. También, en la Figura 17 se pueden ver a que componentes pertenecen los espesores de las variables definidas.

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

Variable	Nivel Inferior (mm)	Nivel Superior (mm)
t1	1	2
t2	2	3
t3	1	2
t4	1.5	2.5
t5	1.5	2.5

Tabla 3 Niveles de los factores o variables

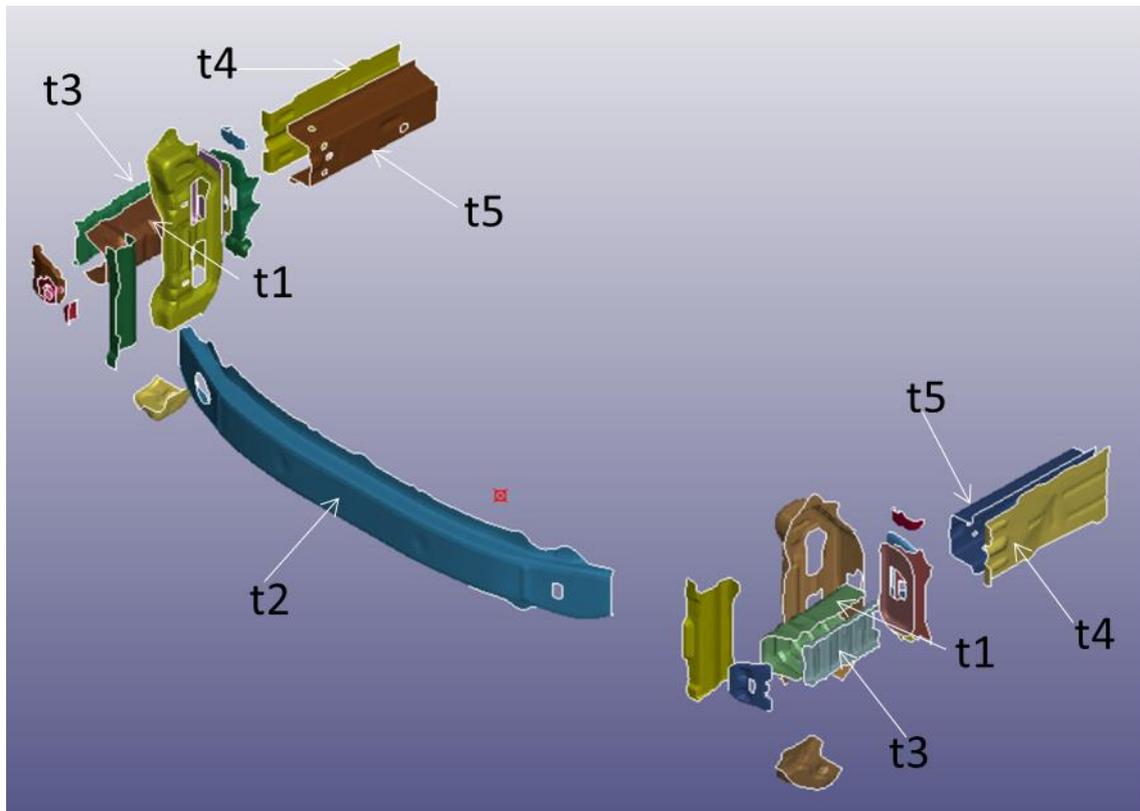


Figura 17 Componentes con sus respectivas variables

Cuando se realizó la primera prueba se observó que algunos puntos de diseño daban un comportamiento que no era el adecuado, dado que no cumplía con el principio de que en una estructura frontal la rigidez debía ir aumentando desde la zona delantera de la estructura frontal a la final. Un diseño correcto de una estructura frontal sería el que se deformase progresivamente en el momento del impacto [2]. Se observó como empezaban a deformarse por los raíles frontales, los componentes de espesor t4 y t5 y debería hacerlo por los crash-box, los componentes de t1 y t3, tal y como se puede ver en la Figura 18.

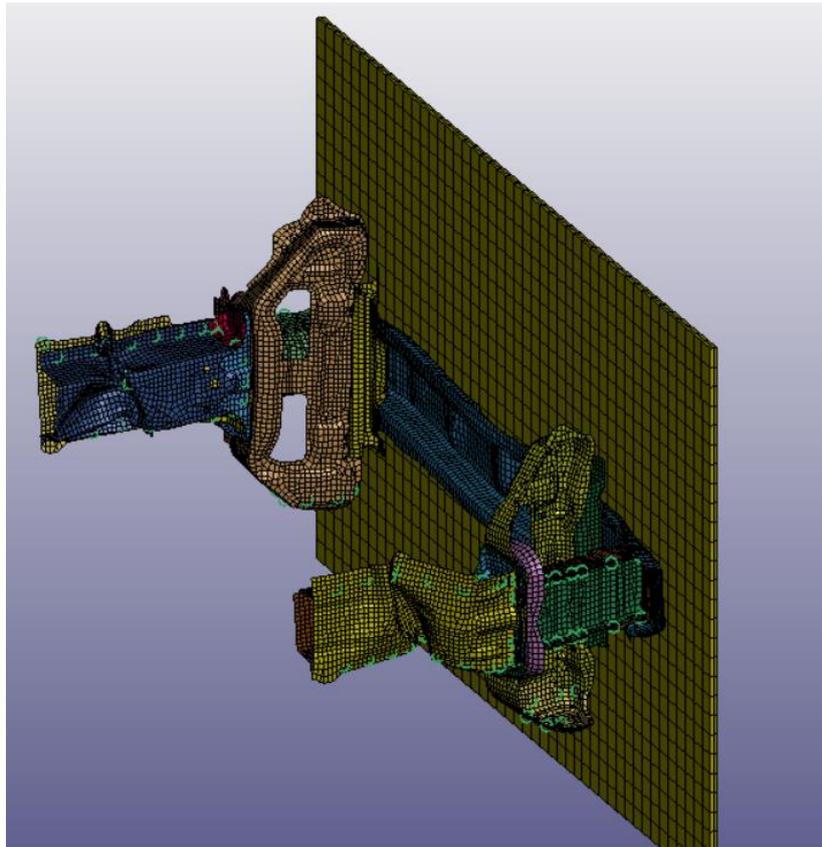


Figura 18 Diseño inadecuado de la estructura frontal

Por ello, para solucionar este fenómeno y que el modelo subrogado no estuviera influenciado por esta anomalía, se dividió el diseño de experimentos en dos subconjuntos para abordar el problema y tratar de que en ningún caso la rigidez de los raíles frontales fuese menor que la de los crash-box. De esta forma se pasó de aplicar un CCD completo de 43 puntos de diseño con una diferencia entre los dos niveles de 1 mm a aplicar dos CCD fraccionados con 0,5 mm de diferencia con 54 puntos en total.

Variable	Nivel Inferior (mm)	Nivel Superior (mm)
t1	1	1.5
t2	2	2.5
t3	1	1.5
t4	1.5	2
t5	1.5	2

Tabla 4 Niveles del diseño CCD 1

Variable	Nivel Inferior (mm)	Nivel Superior (mm)
t1	1.5	2
t2	2.5	3
t3	1.5	2
t4	2	2.5
t5	2	2.5

Tabla 5 Niveles del diseño CCD 2

Para realizar el diseño de experimentos de manera automatizada, se ha programado una interacción entre LS-DYNA y MATLAB de forma que mediante un bucle MATLAB cambia los espesores en el archivo de lanzamiento de la simulación que se trata de un archivo de texto en formato .key que lee LS-DYNA y lanza la simulación desde el sistema de comandos. En el ANEXO II.4 se puede ver el código para su programación.

En la Tabla 6 se puede ver los resultados obtenidos de realizar el diseño de experimentos.

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

Run	t1(mm)	t2(mm)	t3(mm)	t4(mm)	t5(mm)	M(Kg)	EA(J)	F(N)
1	1	2	1	1.5	2	60.2325034	31974	297880
2	1	2	1	2	1.5	60.0501714	27016.6	241490
3	1	2	1.5	1.5	1.5	59.8142397	28130.8	197780
4	1	2	1.5	2	2	60.9055317	36691.6	352260
5	1	2.5	1	1.5	1.5	60.6394703	27579	209950
6	1	2.5	1	2	2	61.7307623	35817.8	405250
7	1	2.5	1.5	1.5	2	61.4948306	37643.5	276400
8	1	2.5	1.5	2	1.5	61.3124986	30685.9	252450
9	1.5	2	1	1.5	1.5	59.9922152	30613.3	166480
10	1.5	2	1	2	2	61.0835072	39116.9	359290
11	1.5	2	1.5	1.5	2	60.8475756	41198.3	288300
12	1.5	2	1.5	2	1.5	60.6652436	32101.8	216700
13	1.5	2.5	1	1.5	2	61.6728061	38774.3	341940
14	1.5	2.5	1	2	1.5	61.4904741	32504.2	204900
15	1.5	2.5	1.5	1.5	1.5	61.2545425	28194	190540
16	1.5	2.5	1.5	2	2	62.3458345	45350.8	354710
17	0.6555	2.25	1.25	1.75	1.75	60.4992139	29649	244660
18	1.8445	2.25	1.25	1.75	1.75	61.4423066	40692.7	213270
19	1.25	1.6555	1.25	1.75	1.75	59.7295009	34375.9	289860
20	1.25	2.8445	1.25	1.75	1.75	62.2120335	36688.1	271770
21	1.25	2.25	0.6555	1.75	1.75	60.7108634	34680.5	286310
22	1.25	2.25	1.8445	1.75	1.75	61.2306589	36694.1	238820
23	1.25	2.25	1.25	1.1555	1.75	60.4302931	33140.3	249540
24	1.25	2.25	1.25	2.3445	1.75	61.5112311	37928.3	392650
25	1.25	2.25	1.25	1.75	1.1555	60.2134631	21538.3	137090
26	1.25	2.25	1.25	1.75	2.3445	61.7280581	44657.8	393410
27	1.25	2.25	1.25	1.75	1.75	61.7280581	44657.8	393410
28	1.5	2.5	1.5	2	2.5	62.9826445	52365.7	452740
29	1.5	2.5	1.5	2.5	2	62.8003155	45764.9	373730
30	1.5	2.5	2	2	2	62.5643827	46745.9	318130
31	1.5	2.5	2	2.5	2.5	63.6556737	55238.8	430590
32	1.5	3	1.5	2	2	63.3896152	45018.6	339790
33	1.5	3	1.5	2.5	2.5	64.4809062	56826.4	453800
34	1.5	3	2	2	2.5	64.2449734	56613.6	403520
35	1.5	3	2	2.5	2	64.0626444	48144.6	365950
36	2	2.5	1.5	2	2	62.7423595	49342.4	276300
37	2	2.5	1.5	2.5	2.5	63.8336505	61174.6	470370
38	2	2.5	2	2	2.5	63.5977177	64780.9	456040
39	2	2.5	2	2.5	2	63.4153887	56837.3	342480
40	2	3	1.5	2	2.5	64.4229502	60384	486370
41	2	3	1.5	2.5	2	64.2406212	51182.9	278660
42	2	3	2	2	2	64.0046884	45806.9	297290
43	2	3	2	2.5	2.5	65.0959794	62434.8	357840
44	1.1555	2.75	1.75	2.25	2.25	63.4679057	48228.4	308090
45	2.3445	2.75	1.75	2.25	2.25	64.4109981	62692.4	360390
46	1.75	2.1555	1.75	2.25	2.25	62.6981889	56621	385490
47	1.75	3.3445	1.75	2.25	2.25	65.1807103	61262.6	424550
48	1.75	2.75	1.1555	2.25	2.25	63.159755	49970.3	421990
49	1.75	2.75	2.3445	2.25	2.25	64.7191461	49629.3	292390
50	1.75	2.75	1.75	1.6555	2.25	63.3989854	52078.8	288040
51	1.75	2.75	1.75	2.8445	2.25	64.4799244	59599.8	443900
52	1.75	2.75	1.75	2.25	1.6555	63.1821574	37613.4	245210
53	1.75	2.75	1.75	2.25	2.8445	64.6967504	67946.6	533300
54	1.75	2.75	1.75	2.25	2.25	63.7209041	54213.1	397930

Tabla 6 Resultados del diseño de experimentos

Con el resultado del diseño de experimentos realizado, se procede a importar los resultados a Minitab para elaborar la superficie de respuesta de la Energía absorbida por unidad de masa y la fuerza máxima que se detallará en el siguiente apartado.

En Minitab se aprovecha también para realizar el análisis de sensibilidad de los factores de entrada. Con un análisis de sensibilidad, se puede estudiar la influencia de los espesores seleccionados como variables de entrada en los criterios frente a impacto que se han seleccionado. Que los componentes elegidos sean los de mayor peso en la Energía absorbida no quiere decir que el aumentar o disminuir su espesor repercuta en mejorar o empeorar notablemente este criterio ya que esta energía no dependerá solo de esta variable del componente. Como ya se ha dicho en la introducción esta depende también de la orientación hacia el impacto y del material del componente.

El Diagrama de Pareto es la herramienta más representativa que nos reporta el análisis de sensibilidad. Este diagrama representa los valores absolutos de los efectos estandarizados desde el efecto más grande hasta el efecto más pequeño. Los efectos estandarizados son estadísticos t que prueban la hipótesis nula de que el efecto es 0. El diagrama también muestra una línea de referencia para indicar que efectos son estadísticamente significativos. Por opción predeterminada, Minitab utiliza un nivel de significancia de 0.05 para dibujar la línea de referencia. Las barras que cruzan la línea de referencia son estadísticamente significativas. A continuación, se muestran los resultados para las diferentes variables de respuesta. [8]

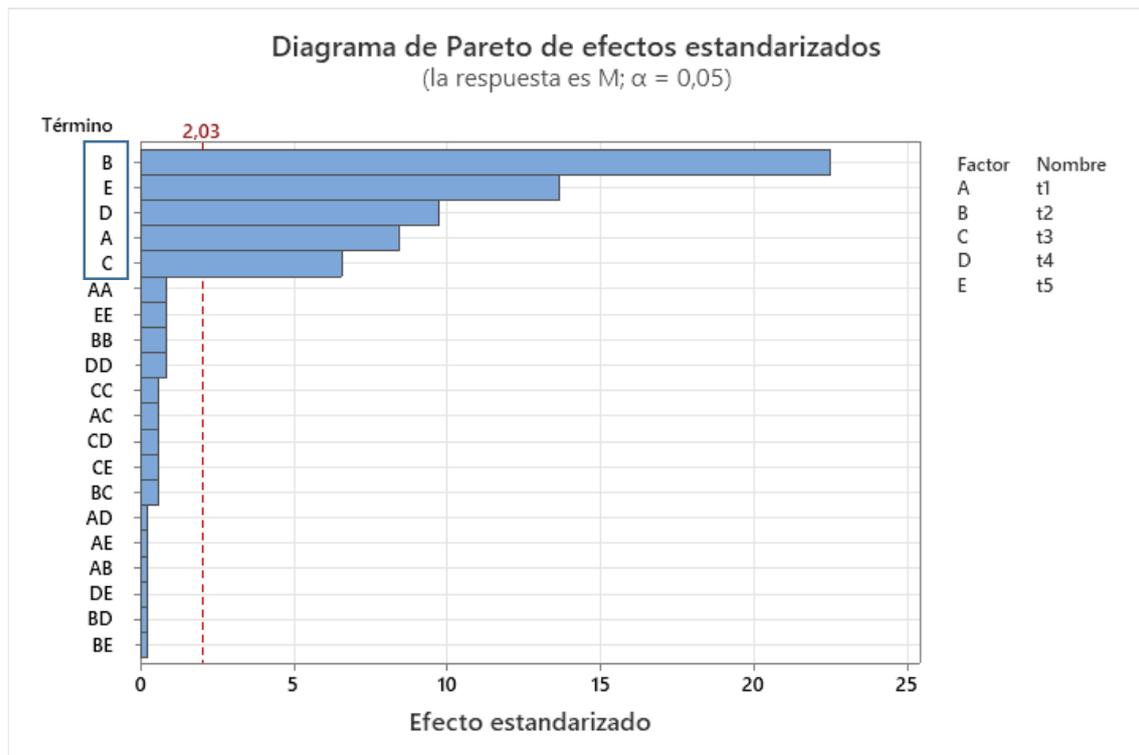


Figura 19 Diagrama de Pareto de la Masa

Como se puede ver, para la masa los efectos que sobrepasan la línea de referencia son solo todos los factores y no sus interacciones. Esto es lógico ya que la masa dependerá de la suma de

las masas de los componentes y por lo tanto la masa total podría ser expresada con un modelo de primer orden.

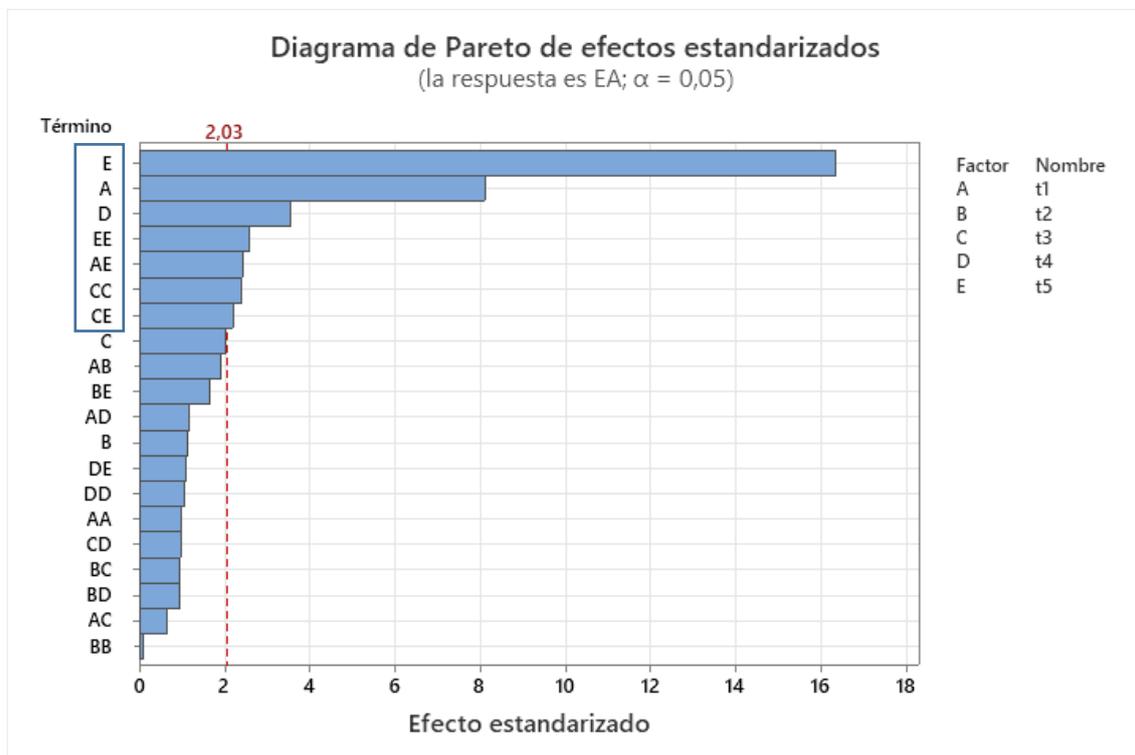


Figura 20 Diagrama de Pareto para la Energía absorbida

Para la energía absorbida se observa como los componentes interiores son los que más influyen en ella, además de manera muy significativa. Los cuadrados de ambas también tienen bastante peso sobre la solución, mientras que el espesor t2 y t3 están por debajo del umbral de efectos estandarizados significativos. Cambiar el espesor t2, que corresponde al bumper de la estructura, es el que menos influencia tiene y se podría eliminar de las variables.

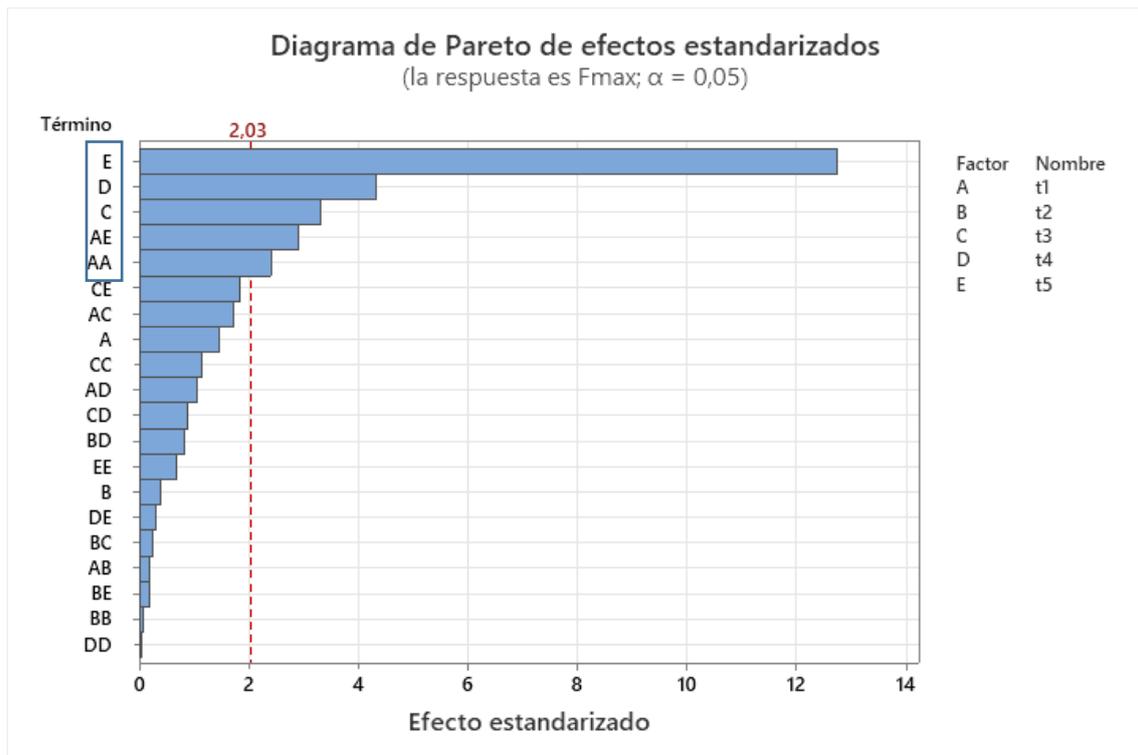


Figura 21 Diagrama de Pareto para la Fuerza máxima

Para la Fuerza máxima el componente de mayor efecto sigue siendo el mismo, los railes frontales internos. Aquí el espesor t1 que corresponde al crash-box interior tiene menor influencia, estando por debajo incluso de la línea de referencia. T2 tampoco influiría así que se podría también quitar.

En el ANEXO III se encuentran mas detalles de los resultados reportados por MINITAB, que también han servido para definir el modelo subrogado del que se hablará en el siguiente apartado.

5. Modelo subrogado

El análisis de sensibilidad anterior también nos proporciona una regresión de los puntos de diseño introducidos, dando así a las superficies de respuesta para la masa, la energía absorbida y la Fuerza máxima. Estas superficies de respuesta van a ser la que definirá las dos funciones objetivo, la energía absorbida por unidad de masa y la fuerza máxima.

De este modo, el modelo subrogado es representado matemáticamente con la siguiente ecuación:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j$$

Donde x_i es la variable de diseño i , β_0 un valor constante y el ultimo sumatorio representa la interacción entre dos variables. Como se ha explicado la Masa, M, se ha dejado como una función de primer orden, anulando el término cuadrático y el de interacción, y la energía absorbida, EA, y la Fuerza máxima, Fmax como función de segundo orden.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned} M = & 51,06 + 0,635 t_1 + 2,581 t_2 - 0,803 t_3 + 1,077 t_4 + 1,441 t_5 - 0,279 t_1*t_1 - 0,279 t_2*t_2 \\ & - 0,200 t_3*t_3 - 0,279 t_4*t_4 - 0,279 t_5*t_5 + 0,093 t_1*t_2 + 0,251 t_1*t_3 + 0,093 t_1*t_4 \\ & + 0,093 t_1*t_5 + 0,251 t_2*t_3 + 0,093 t_2*t_4 + 0,093 t_2*t_5 + 0,251 t_3*t_4 + 0,251 t_3*t_5 \\ & + 0,093 t_4*t_5 \end{aligned}$$

Figura 22 Superficie de respuesta para la masa

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned} EA = & -10438022 + 3149917 t_1 - 1847366 t_2 + 5605132 t_3 + 2623545 t_4 + 13836743 t_5 \\ & - 4427853 t_1*t_1 - 362389 t_2*t_2 - 10720307 t_3*t_3 - 4659435 t_4*t_4 - 11528885 t_5*t_5 \\ & - 11360238 t_1*t_2 + 3855328 t_1*t_3 + 7031492 t_1*t_4 + 14367009 t_1*t_5 - 5709296 t_2*t_3 \\ & + 5616468 t_2*t_4 + 9724985 t_2*t_5 + 5762633 t_3*t_4 + 13008951 t_3*t_5 - 6413085 t_4*t_5 \end{aligned}$$

Figura 23 Superficie de respuesta para la energía absorbida

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned}
 F_{\max} = & -591763 - 138429 t_1 + 79313 t_2 + 160761 t_3 + 319356 t_4 + 277209 t_5 - 154345 t_1*t_1 \\
 & + 5540 t_2*t_2 - 73866 t_3*t_3 + 1917 t_4*t_4 - 43343 t_5*t_5 + 17161 t_1*t_2 + 146975 t_1*t_3 \\
 & - 89269 t_1*t_4 + 245326 t_1*t_5 - 21756 t_2*t_3 - 70380 t_2*t_4 + 16935 t_2*t_5 + 74974 t_3*t_4 \\
 & - 156890 t_3*t_5 - 26335 t_4*t_5
 \end{aligned}$$

Figura 24 Superficie de respuesta para la Fuerza máxima

En el análisis de sensibilidad también se proporciona los valores del coeficiente de correlación múltiple (R^2) y el mismo ajustado (R_{adj}^2). Estos parámetros proporcionan la precisión con la que el modelo subrogado representa los puntos de diseño con los que se ha construido. Para hablar de que un modelo tiene un ajuste satisfactorio es necesario que ambos coeficientes tengan valores superiores al 70% [7].

	M	EA	Fmax
R²	99.14%	97.14%	90.18%
R² adj	98.62%	95.41%	84.23%

Tabla 7 Coeficientes de correlación

Como se puede ver, para la masa y para la Energía absorbida el R^2 y R_{adj}^2 son muy parecidos. En este caso, hubiera sido posible solo usar como términos solo los que tienen influencia. Como MINITAB devuelve la función completa se ha decidido dejar entera para la función objetivo.

6. Optimización multiobjetivo

Para la optimización multiobjetivo se ha empleado un algoritmo genético conocido como Non Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) [9]. Este algoritmo usa un procedimiento de clasificación no dominado y un enfoque elitista, el cual se explica a continuación. El modelo matemático del problema es el siguiente

$$\begin{cases} \text{Min}(f_{PCF}), \text{Max}(f_{SEA}) \\ x_i^l < t_i < x_i^u, i = 1, \dots, n \end{cases}$$

Donde f_{PCF} y f_{SEA} son las funciones objetivo calculadas a partir del diseño de experimentos y del modelo subrogado, t es un vector de dimensión n con todas las variables de diseño, t_i es la i -ésima variable de diseño del vector t y, x_i^l y x_i^u , los límites de cada una de las variables expresados en la Tabla 3.

El procedimiento del algoritmo es el siguiente [3], [10], [11]:

1. La población es generada de manera aleatoria dentro de los niveles establecidos en el problema. Una vez inicializada, se procede a calcular las respuestas de las dos funciones objetivo. El script utilizado para el lanzamiento se encuentra en el ANEXO IV.1, mientras que la función objetivo en el ANEXO IV.2.
2. El siguiente paso es el ordenamiento basado en no dominancia en el que se van comparando los individuos uno a uno para clasificarlos en Frentes de Pareto. Los individuos que menos dominados se establecen el Frente de Pareto 1. Se van ordenando en los diferentes frentes según la dominación sobre cada individuo El código de esta función se encuentra en el ANEXO IV.3.
 - a. Para ordenar los individuos se comparan sus funciones objetivo, si las dos funciones objetivo del individuo i son mejores que las del individuo j con el que se le compara, se dice que i domina a j .
 - b. Dentro de un mismo frente se emplea el criterio de crowing distance o distancia de apilamiento para individuos de un mismo frente. Esta distancia de apilamiento se calcula con la siguiente fórmula:

$$d_i = \sum_{j=1}^m \left| \frac{f_j^{i+1} - f_j^{i-1}}{f_j^{max} - f_j^{min}} \right|$$

Donde m es el número de funciones objetivo, f_j^{max} , f_j^{min} son el valor máximo y mínimo de la función objetivo de los individuos del mismo frente de Pareto y f_j^{i+1} , f_j^{i-1} los valores de la función objetivo de los individuos más cercanos.

3. -Una vez los individuos han sido ordenados según el criterio de no dominancia y la distancia de apilamiento, la selección es llevada a cabo mediante torneo. Esta parte del algoritmo consiste en escoger aleatoriamente dos individuos de la población y compararlos según los dos criterios anteriores. La función para realizar la selección de los padres se encuentra en el ANEXO IV.4.

-Con los padres ya seleccionados, se avanza a los operadores genéticos de cruce binario simulado (SBX) y mutación polinomial. Normalmente los algoritmos genéticos están planteados de forma que los valores de las diferentes variables están codificados en

números binarios. De esta forma, para el cruce se elige un punto y se intercambian la secuencia binaria en dos nuevos hijos [12]. Esto hace que los valores genéticos de los hijos tienen la misma distancia del valor genético promedio de los padres.

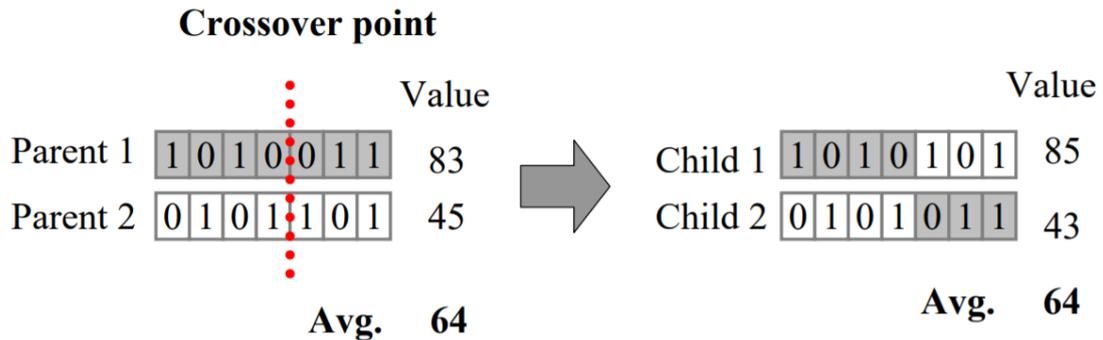


Figura 25 Cruce entre dos individuos de la población [13]

El cruce binario simulado utiliza la función de densidad de probabilidad que simula el cruce de en algoritmos genéticos codificados binariamente. El proceso del SBX es el siguiente [14]:

Se seleccionan dos padres y se genera un número aleatorio $u \in [0,1]$ para calcular β como:

$$\beta \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{\eta+1}}, & \text{si } u \leq 0.5 \\ \left(\frac{1}{2(1-u)}\right)^{\frac{1}{\eta+1}}, & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Donde η es el coeficiente de distribución. Grandes coeficientes de distribución generan hijos cercanos a los padres, mientras que valores pequeños generan hijos lejanos de los padres.

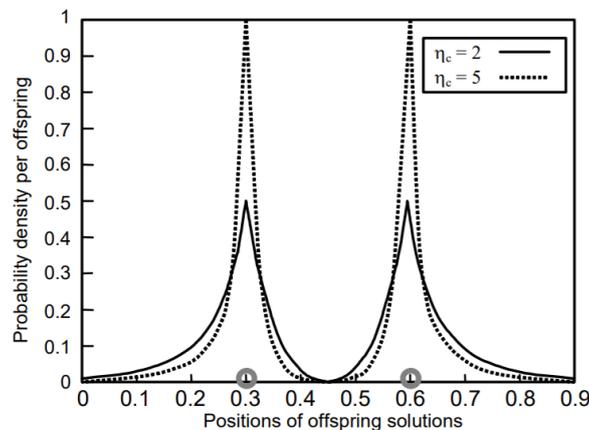


Figura 26 Posición de los hijos respecto a los padres [13]

Los hijos se generan mediante las siguientes ecuaciones:

$$x_1^{hijo} = 0,5[(1 + \beta)x_1 + (1 - \beta)x_2]$$

$$x_2^{hijo} = 0,5[(1 + \beta)x_1 + (1 - \beta)x_2]$$

De este modo:

$$\frac{x_1^{hijo} + x_2^{hijo}}{2} = \frac{x_1 + x_2}{2}$$

Hay un 90% de posibilidades de que se produzca el cruce. El 10% restante es la posibilidad de que se produzca una mutación en el padre. La mutación se lleva a cabo con la siguiente ecuación:

$$x^{hijo} = x^{padre} + \delta L$$

Siendo L el rango de niveles de la variable y δ una pequeña variación calculada de la misma manera que β al aleatorizar un número u :

$$\delta = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{\eta+1}}, & \text{si } u \leq 0,5 \\ \left(\frac{1}{2(1-u)}\right)^{\frac{1}{\eta+1}}, & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

El código del cruce binario simulado se encuentra en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

- Una vez generada la población de hijos, se unen con la población de padres y se vuelve a clasificar con la función Ordenar. Con una nueva función, se seleccionan los individuos mejor clasificados tras el ordenamiento para formar la nueva población para la siguiente iteración. En la Figura 27 se observa el esquema de esta selección elitista. Para más detalle del código de esta función se puede consultar el ANEXO IV.6.

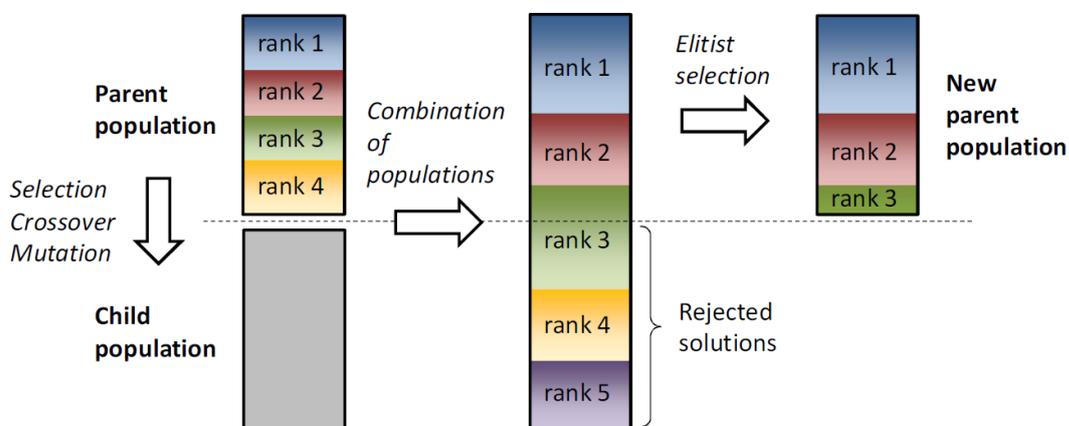


Figura 27 Esquema de la selección elitista

Con la nueva población se vuelve a repetir el ciclo de ordenamiento, cruce y selección el número de veces indicado por el usuario. Una vez terminadas las iteraciones, los

individuos del Frente 1 se representan en el frente de Pareto optimo. Estos individuos al ser los que menos son dominados por otros individuos son las mejores soluciones posibles para el problema. Este frente ayuda a tomar la decisión para saber la variación de las dos funciones objetivo al aumentarlas o disminuirlas. Con ello se puede deducir cuanto se estaría perjudicando una función a la hora de optimizar el otro parámetro de diseño.

En la siguiente imagen se representa el frente de Pareto con todas las soluciones obtenidas de rango 1.

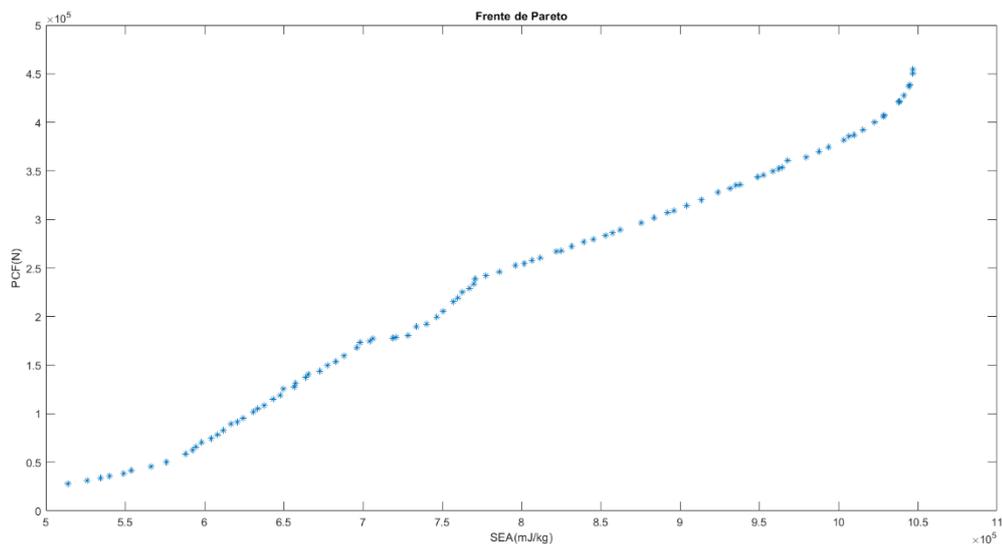


Figura 28 Frente de Pareto con las mejores soluciones

Para esta solución los parámetros del algoritmo han sido:

- Tamaño de población inicial = 100 individuos.
- número de generaciones = 100.
- $\eta=2$.

Con este frente lo que se pretende es conseguir un abanico de mejores soluciones posibles para decidir el punto de diseño optimo, de manera que se puede ver el compromiso de minimizar o maximizar una con respecto a la otra. El Frente concuerda con la forma que debería dar de la Figura 29, puesto que para el espacio de diseño se está minimizando una función y maximizando otra.

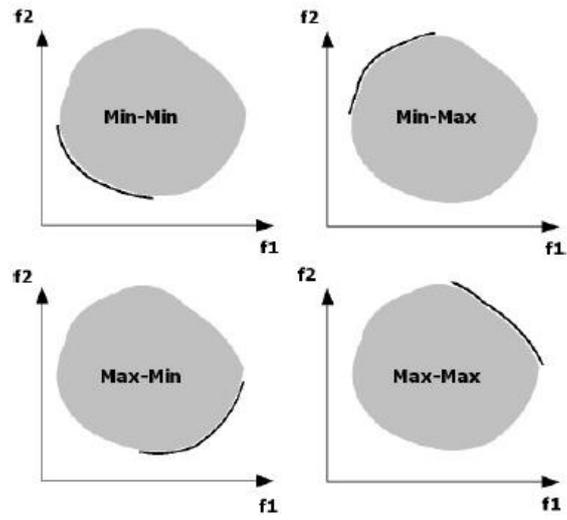


Figura 29 Frentes óptimos para el mismo espacio de soluciones

7. Verificación del modelo subrogado

Para finalizar se han seleccionado cinco puntos del Frente de Pareto obtenido para simular el modelo en LS-DYNA y verificar el modelo subrogado. Los puntos seleccionados fueron los de la Tabla 8. Estos puntos se lanzaron en el modelo de simulación y se obtuvo la Tabla 9

t1	t2	t3	t4	t5	SEA(mJ/kg)	Fmax(N)
1.04	3	2	1.83	2.5	768345.167	230922.034
2	2.01	2	2.05	2.5	1036887.83	419852.337
2	2	1.99	1.61	2.4	968694.699	357903.538
2	2	1.43	1.99	1.83	772865.306	237002.177

Tabla 8 Puntos de diseño para la verificación del modelo

t1	t2	t3	t4	t5	M(Kg)	EA(mJ)	Fmax(N)	SEA(mJ/N)	error SEA	error Fmax
1.04	3	2	1.83	2.5	63.73	49579000	778007.02	294370	1%	27%
2	2.01	2	2.05	2.5	62.62	62023500	990470.00	465690	4%	11%
2	2	1.99	1.61	2.4	62.07	52372400	843794.57	291360	13%	19%
2	2	1.43	1.99	1.83	61.44	44122200	718106.98	256660	7%	8%

Tabla 9 Puntos de diseño lanzados en el modelo de simulación

Como se puede ver, el error obtenido es menor para la energía absorbida que para la Fuerza máxima, que el error ya empieza a ser un poco alto. Estos errores transmiten que el modelo subrogado de superficie de respuesta responde mejor para la energía absorbida que para la Fuerza máxima.

8. Conclusión

Este trabajo surge de la intención de querer abordar y conectar los conocimientos aprendidos por los que tenía preferencia del máster de ingeniería mecánica, como son el cálculo por elementos finitos y la optimización por metaheurísticas, la cuál considero que se ha logrado con éxito.

El intento de lograr los objetivos marcados en la introducción provocó la profundización de en softwares de referencia en el ámbito de la ingeniería. Para preparar el modelo de simulación, se profundizó en el manejo de un software de elementos finitos como es LS-DYNA y además de cálculos explícitos. Para encontrar las variables más importantes del diseño, plantear un diseño de experimentos y capturar la función o modelo subrogado de la respuesta extraída de los puntos de diseño, se ha profundizado en el uso de MATLAB, software de programación en ingeniería y MINITAB, software de análisis estadístico. Además, MATLAB ha servido para plantear la optimización multiobjetivo y encontrar los mejores valores para las variables de entrada dependiendo del comportamiento deseado y validar el modelo subrogado con la simulación de elementos finitos.

Como trabajos futuros, plantearía el uso de otro modelo subrogado como puede ser el Kriging o el modelo de función de base radial, ya sea como función o como red neuronal. De esta forma, observar si se puede mejorar el error producido en la Fuerza máxima. Además, se pueden probar otro tipo de Diseño de experimentos como el hipercubo latino para la generación de los puntos. Con respecto a la optimización se puede plantear otros tipos de algoritmo genético o enfocar de otra manera la optimización multiobjetivo, ya sea por pesos o incluso añadir restricciones como puede ser un límite de masa.

Bibliografía

- [1] L. W. e. al., «Crashworthiness analysis and multi-objective optimization of a commercial vehicle frame: A mixed meta-modeling-based method,» *SAGE*, vol. 10, nº 5, pp. 1-12, 2018.
- [2] Z. L. e. al., «Crashworthiness and lightweight optimization to applied multiple materials and foam-filled front end structure of auto-body,» *SAGE*, vol. 9, nº 8, pp. 1-21, 2017.
- [3] R. D. L. N. Ann-Britt Ryberg, *Metamodel-Based Multidisciplinary Design Optimization for Automotive Applications*, Linköping, 2012.
- [4] NHTSA, «NHTSA,» [En línea]. Available: <https://www.nhtsa.gov/about-nhtsa>.
- [5] S. E. M. S. Pirmohammad, «Crashworthiness optimization of combined straight-tapered tubes using genetic algorithm and neural networks,» *Thin-Walled Structures*, vol. 127, pp. 318-332, 2018.
- [6] T. F. e. al., «Composite sandwich structures for crashworthiness applications,» *Journal of Materials Design and Applications*, vol. 221, nº 2, pp. 121-130, 2007.
- [7] R. d. I. V. S. Humberto Gutiérrez Pulido, *ANÁLISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS*, MC GRAW HILL, 2012.
- [8] «Soporte técnico de Minitab,» [En línea]. Available: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/20/?SID=0>.
- [9] K. e. al., «A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II,» *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, vol. 6, nº 2, pp. 182-195, 2002.
- [10] R. A. B. A. M. CARLOS ADRIÁN CORREA, «ALGORITMO MULTI OBJETIVO NSGA-II APLICADO AL PROBLEMA DE LA MOCHILA,» *Scientia et Technica*, vol. XIV, nº 39, pp. 206-211, 2008.
- [11] A. N. Joaquim R. R. A. Martins, *Engineering design optimization*, Electronic, 2021.
- [12] K. Deb y H.-G. Beyer, «Self-Adaptive Genetic Algorithms with Simulated Binary Crossover,» *Technical Report*, Vols. %1 de %2CI-61, 1999.
- [13] «Lecture 4: Real-Coded Genetics-Algorithms,» [En línea]. Available: <https://engineering.purdue.edu/~sudhoff/ee630/Lecture04.pdf>.
- [14] A. SESHADRI, A FAST ELITIST MULTI OBJECTIVE GENETIC ALGORITHM: NSGA-II.

Índice de Figuras

Figura 1 Esquema de la optimización mediante modelo subrogado	6
Figura 2 Modelo del Toyota Yaris de la NCAC	8
Figura 3 Modelo numérico de la estructura frontal	9
Figura 4 Restricción de movimiento	9
Figura 5 Curvas Tensión deformación Materiales del modelo	10
Figura 6 Soporte del radiador.....	11
Figura 7 Instante 0 segundos.....	12
Figura 8 Instante 0.05 segundos.....	12
Figura 9 Instante 0.1 segundos.....	13
Figura 10 Instante 0.15 segundos.....	13
Figura 11 Instante 0.2 segundos.....	14
Figura 12 Energía absorbida por las diferentes partes del modelo	15
Figura 13 Componentes a objeto de estudio	16
Figura 14 Crush Force Efficiency [6]	18
Figura 15 Fuerza vs tiempo de diferentes variaciones en espesor del modelo	18
Figura 16 Diseño de experimentos CCD [7]	19
Figura 17 Componentes con sus respectivas variables.....	20
Figura 18 Diseño inadecuado de la estructura frontal	21
Figura 19 Diagrama de Pareto de la Masa	24
Figura 20 Diagrama de Pareto para la Energía absorbida	25
Figura 21 Diagrama de Pareto para la Fuerza máxima	26
Figura 22 Superficie de respuesta para la masa	27
Figura 23 Superficie de respuesta para la energía absorbida	27
Figura 24 Superficie de respuesta para la Fuerza máxima	28
Figura 25 Cruce entre dos individuos de la población [13].....	30
Figura 26 Posición de los hijos respecto a los padres [13].....	30
Figura 27 Esquema de la selección elitista	31
Figura 28 Frente de Pareto con las mejores soluciones	32

Índice de Tablas

Tabla 1 Energía de deformación del material.....	10
Tabla 2 Energía interna por componente.....	15
Tabla 3 Niveles de los factores o variables	20
Tabla 4 Niveles del diseño CCD 1.....	21
Tabla 5 Niveles del diseño CCD 2.....	22
Tabla 6 Resultados del diseño de experimentos	23
Tabla 7 Coeficientes de correlación	28
Tabla 8 Puntos de diseño para la verificación del modelo	34
Tabla 9 Puntos de diseño lanzados en el modelo de simulación	34

ANEXOS

ANEXO I Códigos de post-procesamiento en de los resultados FEM

ANEXO I.1 Código para Procesar los datos de los materiales

```

opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", 2);

% Specify range and delimiter
opts.DataLines = [3, Inf];
opts.Delimiter = ",";

% Specify column names and types
opts.VariableNames = ["Deformacion", "Tension"];
opts.VariableTypes = ["double", "double"];

% Specify file level properties
opts.ExtraColumnsRule = "ignore";
opts.EmptyLineRule = "read";

% Import the data
c180 = readtable("C:\TFM\02 Matlab archivos\DoE CCD alpha
nuevo\Run 20\180.csv", opts)
c270 = readtable("C:\TFM\02 Matlab archivos\DoE CCD alpha
nuevo\Run 20\270.csv", opts)
c350 = readtable("C:\TFM\02 Matlab archivos\DoE CCD alpha
nuevo\Run 20\350.csv", opts)
c380 = readtable("C:\TFM\02 Matlab archivos\DoE CCD alpha
nuevo\Run 20\380.csv", opts)
c800 = readtable("C:\TFM\02 Matlab archivos\DoE CCD alpha
nuevo\Run 20\800.csv", opts)

%Representación de las gráficas
p1 =
plot(c180.Deformacion,c180.Tension,'Marker','none','DisplayName'
,'sigma_y= 180','LineWidth',2);

hold on

p2 =
plot(c270.Deformacion,c270.Tension,'Marker','none','DisplayName'
,'sigma_y= 270','LineWidth',2);
p3 =
plot(c350.Deformacion,c350.Tension,'Marker','none','DisplayName'
,'sigma_y= 350','LineWidth',2);
p4 =
plot(c380.Deformacion,c380.Tension,'Marker','none','DisplayName'
,'sigma_y= 380','LineWidth',2);
p5 =
plot(c800.Deformacion,c800.Tension,'Marker','none','DisplayName'
,'sigma_y= 800','LineWidth',2);

hold off
% Add xlabel, ylabel, title, and legend

```

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

```
xlabel('Deformacion')
ylabel('Tension(MPa)')
legend
title('Deformacion vs. Tension')

%Función para calcular el área encerrada por cada curva

p180area = trapz(c180.Deformacion,c180.Tension)
p270area = trapz(c270.Deformacion,c270.Tension)
p350area = trapz(c350.Deformacion,c350.Tension)
p380area = trapz(c380.Deformacion,c380.Tension)
p800area = trapz(c800.Deformacion,c800.Tension)
```

ANEXO I.2 Código para leer 'matsum'

```

%Archivo a leer
file = 'matsum';
fidd = fopen(file);

%Se lee el archivo de texto generado
results = textscan(fidd, '%s', 'TextType', 'string');
results=results{1,1};

%Se leen los resultados en busca de los componentes
leyenda=find(results=='LEGEND');
comienzoleyenda =leyenda(1,1);
finalleyenda=leyenda(2,1);
leyenda=results(comienzoleyenda:finalleyenda,1);
j=1

for i=1:length(leyenda)
    aux=str2double(leyenda(i,1));
    if ~ismissing(aux)==1
        parts(j,1)=leyenda(i,1);
        parts(j,2)=leyenda(i+1,1);
        j=j+1;
    end
end
results = results(finalleyenda+1:end,1);
table = parts(1:end-1,1);
table = table';

% Se extraen los datos de cada uno de los componentes para
exportarlos en
% una tabla
time = find(results=='time');
time = time + 2;
time = results(time);
time = str2double(time);
total = [];
for k=2:length(table)
    aux2 = table(k);
    aux3 = find(results==aux2);
    aux3 = aux3+2;
    aux3 = results(aux3);
    total = [total aux3];
end

total = str2double(total)

totaltabla = array2table(total, "VariableNames", table(2:end));

%Representación de la energía absorbida
plot(time,totaltabla.Variables, "LineWidth", 2)
legend(table(2:end))

```

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

```
grid on
xlabel('Time(s)')
ylabel('Energia interna (J)')

%Máximos absorbidos por cada componente
maximos = max(totaltabla.Variables)

A = totaltabla(end,:)

A = rows2vars(A)
A = sortrows(A, 'Var1', 'descend')
```

ANEXO II Código para la automatización del Diseño de Experimentos

ANEXO II.1 Código para extraer la masa del modelo

```
function [masatotal] = Extraermasa(file)
fidd = fopen(file);
i=0
masa = []
while ( ~feof(fidd) ) %Lee y muestra una linea hasta que alcance
el final del archivo status = feof(fileID) returns the status of
the end-of-file indicator. The feof function returns a 1
    %if a previous operation set the end-of-file indicator for
the specified file. Otherwise, feof returns a 0.

    tline = fgetl(fidd); %devuelve la linea de un archivo
especifico, eliminando el caracter de nueva linea

    i = i+1;

    %    if (regexp(tline, ' t o t a l m a s s          = ')>0)
%devuelve el índice inicial de cada subcadena de str
%    %que coincide con los patrones de caracteres
especificados por la expresión regular,
%    %Si no coincide no entra al bucle
%    extraermasatotal = tline
%    end
    if (regexp(tline,' part id  =')>0) %devuelve el índice
inicial de cada subcadena de str
        %que coincide con los patrones de caracteres
especificados por la expresión regular,
        %Si no coincide no entra al bucle
        extraermasa = split(tline, '=');
        aux = split(extraermasa(2));
        aux = str2double(aux{2,1});
        aux2 = split(extraermasa(3));
        aux2 = str2double(aux2{2,1});
        aux3 = [aux, aux2];
        masa=[masa; aux3];

    end
end
masatotal = sum(masa(2:end,2))*1000

fclose(fidd);
end
```

ANEXO II.2 Código para extraer la energía absorbida del modelo

```

function [maxenergy] = Extraerenergia(file)
fidd = fopen(file);
i=0
energy = []
tiempo = []
while ( ~feof(fidd) ) %Lee y muestra una linea hasta que alcance
el final del archivo status = feof(fileID) returns the status of
the end-of-file indicator. The feof function returns a 1
    %if a previous operation set the end-of-file indicator for
the specified file. Otherwise, feof returns a 0.

    tline = fgetl(fidd); %devuelve la linea de un archivo
especifico, eliminando el caracter de nueva linea

    i = i+1;
    %   if (regexp(tline,' time step..... ')>0)
    %       continue
    %   end
    %   if (regexp(tline,'time per zone cycle.(nanosec)..')>0)
    %       continue
    %   end
    if (strfind(tline,' time.....')>0)
        extraertiempo =
split(tline,'.....');
        aux = split(extraertiempo(2));
        aux = str2double(aux{2,1});
        tiempo = [tiempo; aux];
    end
    if (strfind(tline,' internal energy.....')>0)
%devuelve el índice inicial de cada subcadena de str
    %que coincide con los patrones de caracteres
especificados por la expresión regular,
    %Si no coincide no entra al bucle
        extraerenergia = split(tline,'.....');
        aux = split(extraerenergia(2));
        aux = str2double(aux{2,1});
        energy = [energy; aux];
    end
end
end
maxenergy = max(energy);
fclose(fidd);
end

```

ANEXO II.3 Código para extraer la Fuerza máxima del modelo

```
function [maxFuerza] = Extraerfuerza(file)
fidd = fopen(file);
results = textscan(fidd, '%s', 'TextType', 'string');
results=results{1,1};

time = find(results=='time');
time = time + 2;
time = results(time);
time = str2double(time);

%Encuentra donde están los valores de las fuerzas
force = find(results=='resultants');
%Devuelve la fuerza en x, en y y en z
forces = [results(force + 2) results(force + 3) results(force +
4)];
forces = str2double(forces);
absoluto = sqrt(forces(:,1).^2+forces(:,2).^2+forces(:,3).^2);
forces = [forces absoluto];

%Extrae la fuerza máxima
maxFuerza = max(forces(:,1));
fclose(fidd);
end
```

ANEXO II.4 Programa para el lanzamiento del diseño de experimentos

```

%Generación del diseño de experimentos

doe = ccdesign(5, 'fraction', 1)
doe = doe(1:27, :)
%Valores de los niveles del primer diseño de experimentos
ValoresFactores = [1.5 2; 2.5 3; 1.5 2; 2 2.5; 2 2.5]

% tamaño del DoE
[runs factores] = size(doe)
%Bucle para cambiar los valores de la matriz generada con los
niveles
%codificados por los valores de estudio
for run=1:runs
    for factor = 1:factores
        if doe(run, factor) == -1
            doe(run, factor) = ValoresFactores(factor, 1);
        elseif doe(run, factor) == 1
            doe(run, factor) = ValoresFactores(factor, 2);
        elseif doe(run, factor) == 0
            doe(run, factor) = (ValoresFactores(factor, 2) +
ValoresFactores(factor, 1))/2;
        else
            doe(run, factor) =
doe(end, factor) + (ValoresFactores(factor, 2) +
ValoresFactores(factor, 1))/2;
        end
    end
end

Resultados = [];
%Bucle para inicializar cada una de las simulaciones
for run=1:runs

    t1 = doe(run, 1);
    t2 = doe(run, 2);
    t3 = doe(run, 3);
    t4 = doe(run, 4);
    t5 = doe(run, 5);
    key_initial(t1, t2, t3, t4, t5);

    !C:\LSDYNA\program\ls-dyna_smp_s_R11_1_0_winx64_ifort160.exe
i=Combine.key ncpu=16 memory=999m

    while exist('disk8', 'file') == 2
        pause(0.1)
    end
    Masa = Extraermasa('d3hsp');
    Energia = Extraerenergia('glstat');
    Fuerza = Extraerfuerza('spcforc');

```

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

```
Resultados = [Resultados; t1 t2 t3 t4 t5 Masa Energia  
Fuerza;];
```

```
fclose all
```

```
carpeta = 'Run ' + string(run);  
directorio = 'C:\TFM\02 Matlab archivos\' + carpeta  
mkdir(carpeta, 'newdir');  
movefile("matsum", directorio);  
movefile("d3hsp", directorio);
```

```
for d=1:9  
    d3plot = 'd3plot0' + string(d);  
    movefile(d3plot, directorio);
```

```
end
```

```
for d=10:42  
    d3plot = 'd3plot' + string(d);  
    movefile(d3plot, directorio);
```

```
end
```

```
movefile('d3dump01', directorio);  
movefile('d3plot', directorio);  
movefile('d3thdt', directorio);  
movefile('dyna.bigid', directorio);  
movefile('dyna.inc', directorio);  
movefile('elout', directorio);  
movefile('glstat', directorio);  
movefile('messag', directorio);  
movefile('group_file', directorio);  
movefile('nodout', directorio);  
movefile('rbdout', directorio);  
movefile('rwforc', directorio);  
movefile('spcforc', directorio);  
movefile('ssstat', directorio);  
movefile('status.out', directorio);  
movefile('YarisD_V2g.key', directorio);
```

```
% movefile('lspost.cfile', directorio);
```

```
% movefile('lspost.msg', directorio);
```

```
copyfile('Combine.key', directorio);  
copyfile('YarisD_Set1_V2g.key', directorio);  
copyfile('NCAP_Wall.key', directorio);
```

```
end
```

ANEXO II.5 Código para generar la función para exportar el .key modificado

```

% Now creates the 2nd text file like inputfile
clc; clear all; close all
%S = mfilename('fullpath'); %Devuelve el directorio en el que
está alojada la llamada
%f = filesep; %Devuelve el caracter de separación entre carpetas
y nombres de archivo
% ind=strfind(S,f);
% S1=S(1:ind(end)-1);
% cd(S1)
% write the constructor m file
OutputFileName = 'key_initial.m';
fileID = fopen(OutputFileName,'wt');
fprintf(fileID, ' function key_initial(t1,t2,t3,t4,t5)\n'); %
fprintf(fileID, '%s,%s\n', num2str(E), num2str(Nu));
fprintf(fileID, ' OutputFileName = ''YarisD_V2g.key'';\n');
fprintf(fileID, ' fileID = fopen(OutputFileName, ''wt'');\n');
% Load the input file
fid = fopen('YarisD_V2g.key');
C = textscan(fid, '%s', 'delimiter', '\n');

lines=C{1,1}(:, :, :); % number of lines in the input file.
[lines useless]=size(lines);
n= '\n';
for i=1: lines
    C_line = C{1}{i}; % Reads the current line
%     line188_changed =strrep(line188,'0.0453, 0.0453, 0.0453,
0.0453', num2str(sathh))
    fprintf(fileID, 'fprintf(fileID, ''%s%s''); \n', C_line, n);
end

fprintf(fileID, ' fclose(fileID);\n');
fclose(fileID);

```

ANEXO III Resultados de MINITAB

ANEXO III.1 Resultados para la masa

HOJA DE TRABAJO 1

Regresión de superficie de respuesta: M(Kg) vs. t1(mm); t2(mm); t3(mm); t4(mm); t5(mm)

Coefficientes codificados

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	62,4680	0,0950	657,48	0,000	
t1(mm)	0,6591	0,0779	8,46	0,000	1,66
t2(mm)	1,7524	0,0779	22,50	0,000	1,66
t3(mm)	0,5114	0,0779	6,56	0,000	1,66
t4(mm)	0,7570	0,0779	9,72	0,000	1,66
t5(mm)	1,0650	0,0779	13,67	0,000	1,66
t1(mm)*t1(mm)	-0,199	0,237	-0,84	0,408	4,01
t2(mm)*t2(mm)	-0,199	0,237	-0,84	0,408	4,01
t3(mm)*t3(mm)	-0,143	0,237	-0,60	0,552	4,01
t4(mm)*t4(mm)	-0,199	0,237	-0,84	0,408	4,01
t5(mm)*t5(mm)	-0,199	0,237	-0,84	0,408	4,01
t1(mm)*t2(mm)	0,066	0,314	0,21	0,834	3,08
t1(mm)*t3(mm)	0,179	0,314	0,57	0,573	3,08
t1(mm)*t4(mm)	0,066	0,314	0,21	0,834	3,08
t1(mm)*t5(mm)	0,066	0,314	0,21	0,834	3,08
t2(mm)*t3(mm)	0,179	0,314	0,57	0,573	3,08
t2(mm)*t4(mm)	0,066	0,314	0,21	0,834	3,08
t2(mm)*t5(mm)	0,066	0,314	0,21	0,834	3,08
t3(mm)*t4(mm)	0,179	0,314	0,57	0,573	3,08
t3(mm)*t5(mm)	0,179	0,314	0,57	0,573	3,08
t4(mm)*t5(mm)	0,066	0,314	0,21	0,834	3,08

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0,186667	99,14%	98,62%	97,85%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	20	132,891	6,6446	190,69	0,000
Lineal	5	132,756	26,5512	761,99	0,000
t1(mm)	1	2,495	2,4947	71,59	0,000
t2(mm)	1	17,633	17,6332	506,05	0,000
t3(mm)	1	1,502	1,5018	43,10	0,000
t4(mm)	1	3,291	3,2907	94,44	0,000
t5(mm)	1	6,513	6,5127	186,91	0,000
Cuadrado	5	0,039	0,0078	0,22	0,949
t1(mm)*t1(mm)	1	0,024	0,0245	0,70	0,408
t2(mm)*t2(mm)	1	0,024	0,0245	0,70	0,408
t3(mm)*t3(mm)	1	0,013	0,0126	0,36	0,552
t4(mm)*t4(mm)	1	0,024	0,0245	0,70	0,408
t5(mm)*t5(mm)	1	0,024	0,0245	0,70	0,408
Interacción de 2 factores	10	0,073	0,0073	0,21	0,994
t1(mm)*t2(mm)	1	0,002	0,0016	0,04	0,834
t1(mm)*t3(mm)	1	0,011	0,0113	0,32	0,573
t1(mm)*t4(mm)	1	0,002	0,0016	0,04	0,834
t1(mm)*t5(mm)	1	0,002	0,0016	0,04	0,834
t2(mm)*t3(mm)	1	0,011	0,0113	0,32	0,573
t2(mm)*t4(mm)	1	0,002	0,0016	0,04	0,834
t2(mm)*t5(mm)	1	0,002	0,0016	0,04	0,834
t3(mm)*t4(mm)	1	0,011	0,0113	0,32	0,573
t3(mm)*t5(mm)	1	0,011	0,0113	0,32	0,573
t4(mm)*t5(mm)	1	0,002	0,0016	0,04	0,834
Error	33	1,150	0,0348		
Total	53	134,041			

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$M(Kg) = 51,06 + 0,635 t1(mm) + 2,581 t2(mm) - 0,803 t3(mm) + 1,077 t4(mm) + 1,441 t5(mm) - 0,279 t1(mm)*t1(mm) - 0,279 t2(mm)*t2(mm) - 0,200 t3(mm)*t3(mm)$$

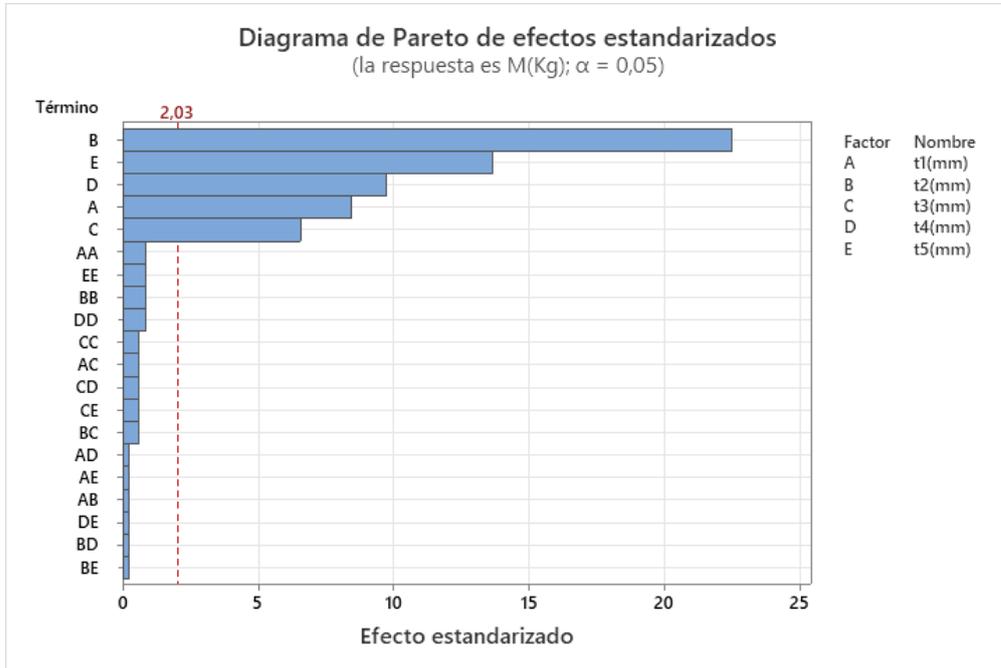
Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

$$\begin{aligned}
 & - 0,279 t_4(\text{mm}) * t_4(\text{mm}) - 0,279 t_5(\text{mm}) * t_5(\text{mm}) + 0,093 t_1(\text{mm}) * t_2(\text{mm}) \\
 & + 0,251 t_1(\text{mm}) * t_3(\text{mm}) + 0,093 t_1(\text{mm}) * t_4(\text{mm}) + 0,093 t_1(\text{mm}) * t_5(\text{mm}) \\
 & + 0,251 t_2(\text{mm}) * t_3(\text{mm}) + 0,093 t_2(\text{mm}) * t_4(\text{mm}) + 0,093 t_2(\text{mm}) * t_5(\text{mm}) \\
 & + 0,251 t_3(\text{mm}) * t_4(\text{mm}) + 0,251 t_3(\text{mm}) * t_5(\text{mm}) + 0,093 t_4(\text{mm}) * t_5(\text{mm})
 \end{aligned}$$

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	M(Kg)	Ajuste	Resid	Resid est.
27	61,728	61,079	0,649	3,95 R
49	64,719	64,267	0,452	3,21 R

Residuo grande R



ANEXO III.2 Resultados para la energía absorbida

HOJA DE TRABAJO 1

Regresión de superficie de respuesta: EA(J) vs. t1(mm); t2(mm); t3(mm); t4(mm); t5(mm)

Coefficientes codificados

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	46124	1277	36,13	0,000	
t1(mm)	8484	1047	8,10	0,000	1,66
t2(mm)	1199	1047	1,14	0,260	1,66
t3(mm)	2109	1047	2,01	0,052	1,66
t4(mm)	3709	1047	3,54	0,001	1,66
t5(mm)	17119	1047	16,35	0,000	1,66
t1(mm)*t1(mm)	-3158	3189	-0,99	0,329	4,01
t2(mm)*t2(mm)	-258	3189	-0,08	0,936	4,01
t3(mm)*t3(mm)	-7646	3189	-2,40	0,022	4,01
t4(mm)*t4(mm)	-3323	3189	-1,04	0,305	4,01
t5(mm)*t5(mm)	-8222	3189	-2,58	0,015	4,01
t1(mm)*t2(mm)	-8102	4226	-1,92	0,064	3,08
t1(mm)*t3(mm)	2750	4226	0,65	0,520	3,08
t1(mm)*t4(mm)	5015	4226	1,19	0,244	3,08
t1(mm)*t5(mm)	10246	4226	2,42	0,021	3,08
t2(mm)*t3(mm)	-4072	4226	-0,96	0,342	3,08
t2(mm)*t4(mm)	4006	4226	0,95	0,350	3,08
t2(mm)*t5(mm)	6936	4226	1,64	0,110	3,08
t3(mm)*t4(mm)	4110	4226	0,97	0,338	3,08
t3(mm)*t5(mm)	9278	4226	2,20	0,035	3,08
t4(mm)*t5(mm)	-4574	4226	-1,08	0,287	3,08

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
2508,37	97,14%	95,41%	92,71%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	20	7055182885	352759144	56,07	0,000
Lineal	5	6876610011	1375322002	218,59	0,000
t1(mm)	1	413246362	413246362	65,68	0,000
t2(mm)	1	8248756	8248756	1,31	0,260
t3(mm)	1	25534388	25534388	4,06	0,052
t4(mm)	1	78989061	78989061	12,55	0,001
t5(mm)	1	1682722439	1682722439	267,44	0,000
Cuadrado	5	77318929	15463786	2,46	0,053
t1(mm)*t1(mm)	1	6170313	6170313	0,98	0,329
t2(mm)*t2(mm)	1	41331	41331	0,01	0,936
t3(mm)*t3(mm)	1	36168907	36168907	5,75	0,022
t4(mm)*t4(mm)	1	6832623	6832623	1,09	0,305
t5(mm)*t5(mm)	1	41830741	41830741	6,65	0,015
Interacción de 2 factores	10	153779340	15377934	2,44	0,026
t1(mm)*t2(mm)	1	23130295	23130295	3,68	0,064
t1(mm)*t3(mm)	1	2663967	2663967	0,42	0,520
t1(mm)*t4(mm)	1	8861379	8861379	1,41	0,244
t1(mm)*t5(mm)	1	36994663	36994663	5,88	0,021
t2(mm)*t3(mm)	1	5842134	5842134	0,93	0,342
t2(mm)*t4(mm)	1	5653703	5653703	0,90	0,350
t2(mm)*t5(mm)	1	16950568	16950568	2,69	0,110
t3(mm)*t4(mm)	1	5951800	5951800	0,95	0,338
t3(mm)*t5(mm)	1	30331289	30331289	4,82	0,035
t4(mm)*t5(mm)	1	7371236	7371236	1,17	0,287
Error	33	207633306	6291918		
Total	53	7262816191			

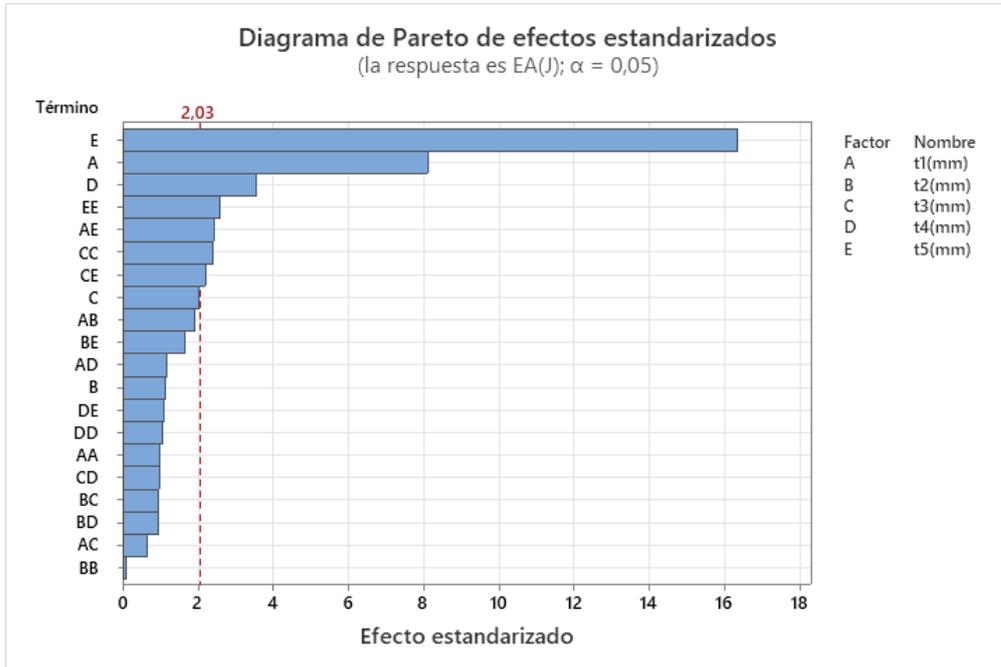
Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$EA(J) = -10438 + 3150 t1(mm) - 1847 t2(mm) + 5605 t3(mm) + 2624 t4(mm) + 13837 t5(mm) - 4428 t1(mm)*t1(mm) - 362 t2(mm)*t2(mm) - 10720 t3(mm)*t3(mm) - 4659 t4(mm)*t4(mm) - 11529 t5(mm)*t5(mm) - 11360 t1(mm)*t2(mm) + 3855 t1(mm)*t3(mm) + 7031 t1(mm)*t4(mm) + 14367 t1(mm)*t5(mm) - 5709 t2(mm)*t3(mm) + 5616 t2(mm)*t4(mm) + 9725 t2(mm)*t5(mm) + 5763 t3(mm)*t4(mm) + 13009 t3(mm)*t5(mm) - 6413 t4(mm)*t5(mm)$$

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	EA(J)	Ajuste	Resid	Resid est.
21	34681	30784	3897	2,06 R
27	44658	36729	7929	3,59 R
43	62435	66483	-4048	-2,07 R
47	61263	56393	4869	2,58 R

Residuo grande R



ANEXO III.3 Resultados para la Fuerza máxima

HOJA DE TRABAJO 1

Regresión de superficie de respuesta: F(N) vs. t1(mm); t2(mm); t3(mm); t4(mm); t5(mm)

Coefficientes codificados

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	351914	18278	19,25	0,000	
t1(mm)	-21947	14987	-1,46	0,153	1,66
t2(mm)	-5716	14987	-0,38	0,705	1,66
t3(mm)	-49487	14987	-3,30	0,002	1,66
t4(mm)	64993	14987	4,34	0,000	1,66
t5(mm)	190993	14987	12,74	0,000	1,66
t1(mm)*t1(mm)	-110076	45653	-2,41	0,022	4,01
t2(mm)*t2(mm)	3951	45653	0,09	0,932	4,01
t3(mm)*t3(mm)	-52680	45653	-1,15	0,257	4,01
t4(mm)*t4(mm)	1367	45653	0,03	0,976	4,01
t5(mm)*t5(mm)	-30911	45653	-0,68	0,503	4,01
t1(mm)*t2(mm)	12239	60496	0,20	0,841	3,08
t1(mm)*t3(mm)	104820	60496	1,73	0,092	3,08
t1(mm)*t4(mm)	-63665	60496	-1,05	0,300	3,08
t1(mm)*t5(mm)	174962	60496	2,89	0,007	3,08
t2(mm)*t3(mm)	-15516	60496	-0,26	0,799	3,08
t2(mm)*t4(mm)	-50194	60496	-0,83	0,413	3,08
t2(mm)*t5(mm)	12078	60496	0,20	0,843	3,08
t3(mm)*t4(mm)	53470	60496	0,88	0,383	3,08
t3(mm)*t5(mm)	-111891	60496	-1,85	0,073	3,08
t4(mm)*t5(mm)	-18781	60496	-0,31	0,758	3,08

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
35911,2	90,18%	84,23%	75,05%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	20	3,90741E+11	19537036956	15,15	0,000
Lineal	5	3,60364E+11	72072762095	55,89	0,000
t1(mm)	1	2765537734	2765537734	2,14	0,153
t2(mm)	1	187571360	187571360	0,15	0,705
t3(mm)	1	14061272563	14061272563	10,90	0,002
t4(mm)	1	24253809064	24253809064	18,81	0,000
t5(mm)	1	2,09450E+11	2,09450E+11	162,41	0,000
Cuadrado	5	12468063339	2493612668	1,93	0,115
t1(mm)*t1(mm)	1	7497337771	7497337771	5,81	0,022
t2(mm)*t2(mm)	1	9660496	9660496	0,01	0,932
t3(mm)*t3(mm)	1	1717178277	1717178277	1,33	0,257
t4(mm)*t4(mm)	1	1156296	1156296	0,00	0,976
t5(mm)*t5(mm)	1	591226459	591226459	0,46	0,503
Interacción de 2 factores	10	24773653013	2477365301	1,92	0,078
t1(mm)*t2(mm)	1	52779635	52779635	0,04	0,841
t1(mm)*t3(mm)	1	3871615617	3871615617	3,00	0,092
t1(mm)*t4(mm)	1	1428273464	1428273464	1,11	0,300
t1(mm)*t5(mm)	1	10786830119	10786830119	8,36	0,007
t2(mm)*t3(mm)	1	84832757	84832757	0,07	0,799
t2(mm)*t4(mm)	1	887783559	887783559	0,69	0,413
t2(mm)*t5(mm)	1	51403406	51403406	0,04	0,843
t3(mm)*t4(mm)	1	1007463484	1007463484	0,78	0,383
t3(mm)*t5(mm)	1	4411629109	4411629109	3,42	0,073
t4(mm)*t5(mm)	1	124296633	124296633	0,10	0,758
Error	33	42557175326	1289611374		
Total	53	4,33298E+11			

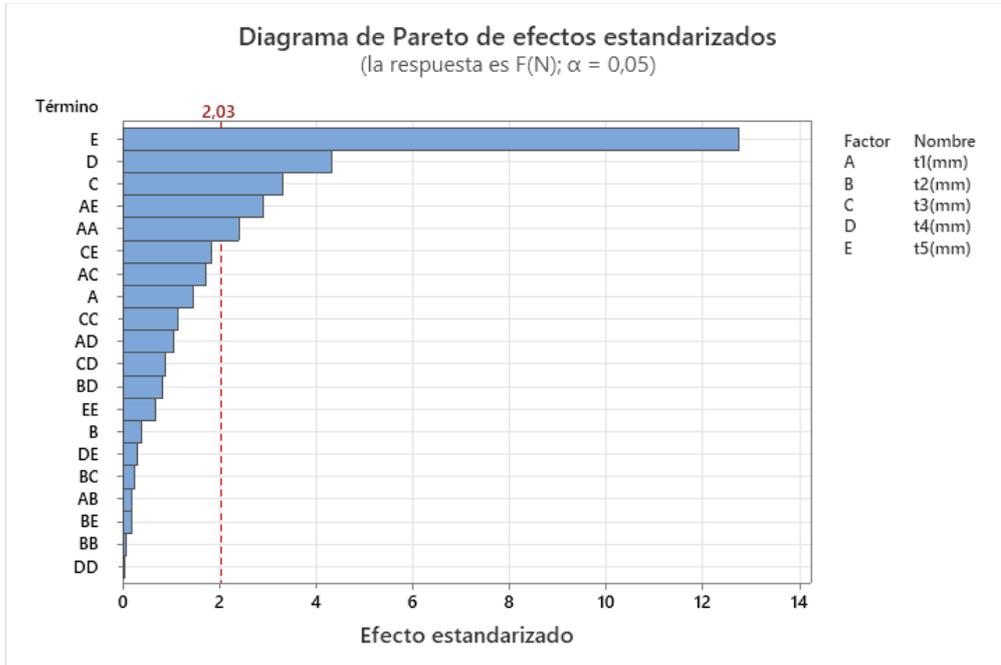
Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned}
 F(N) = & -591763 - 138429 t1(mm) + 79313 t2(mm) + 160761 t3(mm) + 319356 t4(mm) \\
 & + 277209 t5(mm) \\
 & - 154345 t1(mm)*t1(mm) + 5540 t2(mm)*t2(mm) - 73866 t3(mm)*t3(mm) \\
 & + 1917 t4(mm)*t4(mm) \\
 & - 43343 t5(mm)*t5(mm) + 17161 t1(mm)*t2(mm) + 146975 t1(mm)*t3(mm) \\
 & - 89269 t1(mm)*t4(mm) + 245326 t1(mm)*t5(mm) - 21756 t2(mm)*t3(mm) \\
 & - 70380 t2(mm)*t4(mm) + 16935 t2(mm)*t5(mm) + 74974 t3(mm)*t4(mm) \\
 & - 156890 t3(mm)*t5(mm) - 26335 t4(mm)*t5(mm)
 \end{aligned}$$

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	F(N)	Ajuste	Resid	Resid est.
27	393410	291013	102397	3,24 R
43	357840	425959	-68119	-2,44 R
50	288040	367750	-79710	-2,67 R

Residuo grande R



ANEXO IV Código del NSGA-II

ANEXO IV.1 CÓDIGO LANZAMIENTO

```

clear all
clc
format short
global V M xl xu etac etam p pop_size pm
%% Inicializacion NSGA2
M=2; % número de funciones objetivo
V=5; % numero de variables
pop_size=100; % tamaño de la población
gen_max=100; % numero de generaciones
etac = 2; % indice de distribución para el
cruce
etam = 2; % indice de distribución para la
mutación
% pm=1/V; % probabilidad de mutación
ValoresFactores = [1 2; 2 3; 1 2; 1.5 2.5; 1.5 2.5];
xl=ValoresFactores(:,1); % Limite inferior
xl=xl';
xu=ValoresFactores(:,2); % Límite superior
xu=xu';
c=[];
%% Población inicial
xl_temp= repmat(xl, pop_size,1);
xu_temp= repmat(xu, pop_size,1);
x = xl_temp+((xu_temp-xl_temp).*rand(pop_size,V));
x= round(x,2);
%% Evaluacion de las funciones objetivos
poblacion_inicial = FuncionObjetivo(x)

[cromosoma frente]=ordenar(poblacion_inicial);

%% Generacion
for i=1:gen_max
%Selección de los padres
padres_seleccionados=torneo(cromosoma);
%% Cruce para la reproducción
cromosoma_hijo = cruce(padres_seleccionados(:,1:V));

%se evalua la funcion objetivo de los hijos
cromosoma_hijo = FuncionObjetivo(cromosoma_hijo);

%% Poblacion intermedia para la seleccion
poblacion_intermedia=[cromosoma(:,1:V+M); cromosoma_hijo];
[poblacion_intermedia_ordenada
frente]=ordenar(poblacion_intermedia);
%% Selección
nueva_poblacion=seleccion(poblacion_intermedia_ordenada,
frente);
cromosoma=nueva_poblacion;
% a = cromosoma(find(cromosoma(:,8)==1),:);
% b = pop_size-size(a,1);

```

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

```
% c = [c b]
end
% cromosoma=sortrows(cromosoma,V+1);

%% Result and Pareto plot
cromosoma(:,V+1)=-cromosoma(:,V+1)
plot(cromosoma(:,V+1),cromosoma(:,V+2),'*')
xlabel('SEA (mJ/kg) ')
ylabel('PCF (N) ')
```

ANEXO IV.2 FUNCIÓN OBJETIVO

```

function [PoblacionObjetivo] = FuncionObjetivo(Poblacion)
%Poblacion = Individuos de entrada para evaluar las funciones
objetivo
%SEA = energia absorbida por unidad de masa por la estructura
frontal
%negativo porque lo que se desea es maximizar
%PCF = Fuerza máxima de reacción de de la estructura frontal
SEAPoblacion = [];
PCFPoblacion = [];
[numeroIndividuos numeroVariables] = size(Poblacion);
PoblacionObjetivo = Poblacion;
for i=1:numeroIndividuos

    t1 = Poblacion(i,1);
    t2 = Poblacion(i,2);
    t3 = Poblacion(i,3);
    t4 = Poblacion(i,4);
    t5 = Poblacion(i,5);

    EA = -10438022 + 3149917*t1 - 1847366*t2 + 5605132*t3 +
2623545*t4 + 13836743*t5...
- 4427853*t1*t1 - 362389*t2*t2 - 10720307*t3*t3 - 4659435*t4*t4
- 11528885*t5*t5...
- 11360238*t1*t2 + 3855328*t1*t3 + 7031492*t1*t4 +
14367009*t1*t5 - 5709296*t2*t3...
+ 5616468*t2*t4 + 9724985*t2*t5 + 5762633*t3*t4 + 13008951*t3*t5
- 6413085*t4*t5;

    M = 51.06 + 0.635*t1 + 2.581*t2 - 0.803*t3 + 1.077*t4 +
1.441*t5

    SEA = EA/M;

    PCF = -591763 - 138429*t1 + 79313*t2 + 160761*t3 + 319356*t4
+ 277209*t5 - 154345*t1*t1...
+ 5540*t2*t2 - 73866*t3*t3 + 1917*t4*t4 - 43343*t5*t5 +
17161*t1*t2 + 146975*t1*t3...
- 89269*t1*t4 + 245326*t1*t5 - 21756*t2*t3 - 70380*t2*t4 +
16935*t2*t5 + 74974*t3*t4...
- 156890*t3*t5 - 26335*t4*t5;

    PoblacionObjetivo(i,6) = -SEA;
    PoblacionObjetivo(i,7) = PCF;
end

```

ANEXO IV.3 ORDENAR

```

function [cromosoma_ordenado frente] = ordenar(cromosoma)
global V M

% Inicialización de variables
cromosoma_ordenado=[];
% infpop=[];
frente.fr=[];%Estructura donde se almacenaran los individuos de
cada frente
dominados.sp=[];
rango=1;
pop_size1=size(cromosoma,1);

f1 = cromosoma(:,V+1); % Valores de las funciones objetivos
f2 = cromosoma(:,V+2);
%Ordenamiento
% Primer frente
for p=1:pop_size1
    %encuentra los individuos que son dominados por el individuo
    p
    %Con dominar se refiere a que las dos funciones objetivos
    son mejores
    %que los demás individuos
    dominados(p).sp=find(((f1(p)-f1)<0 &(f2(p)-f2)<0) | ((f2(p)-
    f2)==0 &(f1(p)-f1)<0) | ((f1(p)-f1)==0 &(f2(p)-f2)<0)));
    %calcula la cantidad de individuos que dominan al individuo
    p
    n(p)=length(find(((f1(p)-f1)>0 &(f2(p)-f2)>0) | ((f2(p)-
    f2)==0 &(f1(p)-f1)>0) | ((f1(p)-f1)==0 &(f2(p)-f2)>0)));
end

frente(1).fr=find(n==0);
% Se rellenan los siguientes frentes
%Mientras no este vacío el vector de cada uno de los frentes
while (~isempty(frente(rango).fr))
    %individuos del actual frente
    front_indiv=frente(rango).fr;
    %anula esos individuos del vector n
    n(front_indiv)=inf;
    %Establece el rango actual como el de los individuos de este
    frente
    cromosoma(front_indiv,V+M+1)=rango;
    %se pasa al siguiente rango
    rango=rango+1;
    %se inicializa el frente de ese rango
    frente(rango).fr=[];
    %se recorren los individuos de ese rango para restarles 1 en
    el vector n
    %a los individuos que estos dominan
    for i = 1:length(front_indiv)
        temp=dominados(front_indiv(i)).sp;
        %les resta 1 a todos los individuos que el individuo i
        de este
        %frente domina

```

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

```
n(temp)=n(temp)-1;
end
%Encuentra los nuevos individuos que ya no son dominados
q=find(n==0);
%Añade esos individuos al frente nuevo
frente(rango).fr=[frente(rango).fr q];

end
% Población ordenada
cromosoma_ordenado=sortrows(cromosoma,V+M+1);

%Crowding distance
rowsindex=1;

%recorre todos los frentes menos el ultimo que no tiene
individuos
for i = 1:length(frente)-1
    %devuelve el tamaño del frente i
    l_f=length(frente(i).fr);
    %Si es mayor de dos calcula la crowing distance sino le da
un valor infinito
    if l_f > 2
        %inicializa los indices de la funcion objetivo 1 de los
individuos del frente
        sorted_indf1=[];
        %inicializa los indices de la funcion objetivo 2 de los
individuos del frente
        sorted_indf2=[];
        %inicializa los valores de la funcion objetivo 1 de los
individuos del frente
        sortedf1=[];
        %inicializa los valores de la funcion objetivo 2 de los
individuos del frente
        sortedf2=[];
        % Ordenamiento del frente basado en los valores de cada
función objetivo
        %Ordena los individuos del frente actual segun las
funciones objetivo
        [sortedf1
sorted_indf1]=sortrows(cromosoma_ordenado(rowsindex:(rowsindex+1
_f-1),V+1));
        [sortedf2
sorted_indf2]=sortrows(cromosoma_ordenado(rowsindex:(rowsindex+1
_f-1),V+2));

        %Devuelve el valor menor de la f objetivo 1
flmin=cromosoma_ordenado(sorted_indf1(1)+rowsindex-
1,V+1);
        %Devuelve el valor mayor de la f objetivo 1
flmax=cromosoma_ordenado(sorted_indf1(end)+rowsindex-
1,V+1);
        %Asigna un valor infinito a la crowing distance
cromosoma_ordenado(sorted_indf1(1)+rowsindex-
1,V+M+2)=inf;
        %Asigna un valor infinito a la crowing distance
```

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

```

        cromosoma_ordenado(sorted_indf1(end)+rowsindex-
1,V+M+2)=inf;

        %Devuelve el valor menor de la f objetivo 1
        f2min=cromosoma_ordenado(sorted_indf2(1)+rowsindex-
1,V+2);
        %Devuelve el valor mayor de la f objetivo 1
        f2max=cromosoma_ordenado(sorted_indf2(end)+rowsindex-
1,V+2);
        %Asigna un valor infinito a la crowing distance
        cromosoma_ordenado(sorted_indf2(1)+rowsindex-
1,V+M+3)=inf;
        %Asigna un valor infinito a la crowing distance
        cromosoma_ordenado(sorted_indf2(end)+rowsindex-
1,V+M+3)=inf;

        %Bucle para calcular la crowing distance de los demás
individuos del frente
        for j = 2:length(frente(i).fr)-1
            if (f1max - f1min == 0) | (f2max - f2min == 0)
                cromosoma_ordenado(sorted_indf1(j)+rowsindex-
1,V+M+2)=inf;
                cromosoma_ordenado(sorted_indf2(j)+rowsindex-
1,V+M+3)=inf;
            else
                cromosoma_ordenado(sorted_indf1(j)+rowsindex-
1,V+M+2)=...
                    (cromosoma_ordenado(sorted_indf1(j+1)+...
                    rowsindex-1,V+1)-
                    cromosoma_ordenado(sorted_indf1(j-1)...
                    +rowsindex-1,V+1))/(f1max-f1min);
                cromosoma_ordenado(sorted_indf2(j)+rowsindex-
1,V+M+3)=...
                    (cromosoma_ordenado(sorted_indf2(j+1)+...
                    rowsindex-1,V+2)-
                    cromosoma_ordenado(sorted_indf2(j-1)...
                    +rowsindex-1,V+2))/(f2max-f2min);
            end
        end

        else
            %Asigna un valor infinito a la crowing distance
            cromosoma_ordenado(rowsindex:(rowsindex+l_f-
1),V+M+2:V+M+3)=inf;
        end
        %suma al contador el numero de crowing distance asignadas
        rowsindex = rowsindex + l_f;
    end
    %suma la crowing distance de las dos funciones
    cromosoma_ordenado(:,V+M+4) =
    sum(cromosoma_ordenado(:,V+M+2:V+M+3),2);
    %Se eliminan las columnas que no se usan
    cromosoma_ordenado = [cromosoma_ordenado(:,1:V+M)
    cromosoma_ordenado(:,V+M+1) cromosoma_ordenado(:,V+M+4)];

end

```

ANEXO IV.4 TORNEO

```

function [padres_seleccionados] = torneo(cromosoma)
%% Selección por torneo binaria
[pop_size, distancia]=size(cromosoma);
rango=distancia-1;
candidato=[randperm(pop_size);randperm(pop_size)]';

for i = 1: pop_size
    %Dos padres son seleccionados de manera aleatoria
    padre=candidato(i,:);
    %Se compara primero el rango
    if cromosoma(padre(1),rango)~=cromosoma(padre(2),rango)
        %se selecciona el padre con menor rango
        if cromosoma(padre(1),rango)<cromosoma(padre(2),rango)
            mincandidato=cromosoma(padre(1),:);
        elseif
cromosoma(padre(1),rango)>cromosoma(padre(2),rango)
            mincandidato=cromosoma(padre(2),:);
        end
        padres_seleccionados(i,:)=mincandidato;
        %para padres con el mismo rango se compara la crowing
distance
        else
            %se selecciona el candidato con mayor crowing distance
            if
cromosoma(padre(1),distancia)>cromosoma(padre(2),distancia)
                maxcandidato=cromosoma(padre(1),:);
            elseif cromosoma(padre(1),distancia)<
cromosoma(padre(2),distancia)
                maxcandidato=cromosoma(padre(2),:);
            else
                temp=randperm(2);
                maxcandidato=cromosoma(padre(temp(1)),:);
            end
            padres_seleccionados(i,:)=maxcandidato;
        end
    end
end
end

```

ANEXO IV.5 CRUCE

```

function f = cruce(padresSeleccionados)
ValoresFactores = [1 2; 2 3; 1 2; 1.5 2.5; 1.5 2.5];
u_limit = ValoresFactores(:,2);
l_limit = ValoresFactores(:,1);
eta = 0.5;
% mum = 20;
[TamanoSeleccionados,m] = size(padresSeleccionados);

p = 1;
% Contadores para el cruce y la mutacion.
contador_cruce = 0;
contador_mutacion = 0;

% for i = 1 : TamanoSeleccionados
while p<=2*TamanoSeleccionados
    % 90% de posibilidad de cruce
    if rand(1) < 0.9
        % Se inicializa los vectores hijos.
        hijo_1 = [];
        hijo_2 = [];
        % Seleccion de los padres
        padres = randperm(TamanoSeleccionados,2);
        padre_1 = padres(1);
        padre_2 = padres(2);
        padre_1 = padresSeleccionados(padre_1,:);
        padre_2 = padresSeleccionados(padre_2,:);

        % Cruce
        for j = 1 : 5
            % SBX (Simulated Binary Crossover).
            % Se genera un numero aleatorio.
            u(j) = rand(1);
            if u(j) <= 0.5
                beta(j) = (2*u(j))^(1/(eta+1));
            else
                beta(j) = (1/(2*(1 - u(j))))^(1/(eta+1));
            end
            % Se genera el valor de la variable j del primer
hijo
            hijo_1(j) = ...
                0.5*((1 + beta(j))*padre_1(j)) + (1 -
beta(j))*padre_2(j));
            hijo_1(j) = round(hijo_1(j),2);
            % Se genera el valor de la variable j del segundo
hijo
            hijo_2(j) = ...
                0.5*((1 - beta(j))*padre_1(j)) + (1 +
beta(j))*padre_2(j));
            hijo_2(j) = round(hijo_2(j),2);
            %Asegurarse de que esta dentro de los limites
establecidos
            if hijo_1(j) > u_limit(j)

```

```

        hijo_1(j) = u_limit(j);
    elseif hijo_1(j) < l_limit(j)
        hijo_1(j) = l_limit(j);
    end
    if hijo_2(j) > u_limit(j)
        hijo_2(j) = u_limit(j);
    elseif hijo_2(j) < l_limit(j)
        hijo_2(j) = l_limit(j);
    end
end
%Se evalua las funciones objetivo de los hijos y se
añade a la
%poblacion de hijos
%   hijo_1(:,V + 1: M + V) = evaluate_objective(hijo_1, M,
V);
%   hijo_2(:,V + 1: M + V) = evaluate_objective(hijo_2, M,
V);

%Se añade un contador de cruce
contador_cruce = 1;
contador_mutacion = 0;
%con un 10% de posibilidades de entrar en la mutacion, entra
en el else
else
    % Selecccion de un padre aleatorio
    padre_3 = randi(TamanoSeleccionados);
    hijo_3 = padresSeleccionados(padre_3,1:5);
    % Se efectua la mutación
    for j = 1 : 5
        r(j) = rand(1);
        if r(j) < 0.5
            delta(j) = (2*r(j))^(1/(eta+1)) - 1;
        else
            delta(j) = 1 - (2*(1 - r(j)))^(1/(eta+1));
        end
        % Se genera el correspondiente hijo
        hijo_3(j) = hijo_3(j) + delta(j);
        % Make sure that the generated element is within the
decision
        % space.
        if hijo_3(j) > u_limit(j)
            hijo_3(j) = u_limit(j);
        elseif hijo_3(j) < l_limit(j)
            hijo_3(j) = l_limit(j);
        end
    end
end
% Se evalua la funcionObjetivo
%   hijo_3(:,V + 1: M + V) = evaluate_objective(hijo_3, M,
V);

% Se añade un contador de mutación.
contador_mutacion = 1;
contador_cruce = 0;
end
% Keep proper count and appropriately fill the child
variable with all
% the generated children for the particular generation.
if contador_cruce

```

Optimización multiobjetivo de la resistencia al impacto de la estructura frontal de un vehículo

```
Hijos(p,:) = hijo_1;
Hijos(p+1,:) = hijo_2;
contador_cruce= 0;
p = p + 2;
elseif contador_mutacion
Hijos(p,:) = hijo_3;
contador_mutacion = 0;
p = p + 1;
end
end
% Hijos = FuncionObjetivo(Hijos);
f = Hijos;
end
```

ANEXO IV.6 SELECCIÓN

```
function cromosomanuevo=seleccion(cromosoma_intermedio_ordenado,
frente)
global pop_size
indice=0;
i=1;
while indice < pop_size
    l_f=length(frente(i).fr);
    %Bucle para ir llenando la población nueva según el rango
    if indice+l_f < pop_size
        cromosomanuevo(indice+1:indice+l_f,:)=
cromosoma_intermedio_ordenado(indice+1:indice+l_f,:);
        indice=indice+l_f;
        %Cuando llega al ultimo rango que puede añadir compara las
crowing
        %distances para meter los individuos de mayor crowing
distance
    else

temp1=cromosoma_intermedio_ordenado(indice+1:indice+l_f,:);
        temp2=sortrows(temp1,size(temp1,2));
        cromosomanuevo(indice+1:pop_size,:)= temp2(l_f-
(pop_size-indice)+1:l_f,:);
        indice=indice+l_f;

    end
    i=i+1;
end
```