

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE UN TROQUEL PARA ESTAMPACIÓN EN CALIENTE

Estudiante
Director/Directora
Departamento
Curso académico

Feijóo, Luquin, Álvaro
Angulo, Duque, Carlos
Ingeniería Mecánica
2021-2022

Bilbao, 19, Junio, 2022

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE
ENFRIAMIENTO DE UN TROQUEL PARA
ESTAMPACIÓN EN CALIENTE***

DOCUMENTO I - MEMORIA

**Estudiante
Director/Directora
Departamento
Curso académico**

*Feijóo, Luquin, Álvaro
Angulo, Duque, Carlos
Ingeniería Mecánica
2021-2022*

Bilbao, 19, Junio, 2022

Resumen

El sector de la automoción es, tanto a nivel europeo como mundial, uno de los sectores industriales con mayor cuota de mercado. Dada la fuerte competencia y legislación al sector, obliga a que las empresas realicen grandes inversiones anualmente para poder seguir siendo competitivos. Bajo este contexto, una de las líneas estratégicas es el abaratamiento de los costes de producción.

Por este motivo, la fabricación avanzada es uno de los temas que se encuentran a la orden del día en el campo de la ingeniería mecánica. Esto implica que no solo se estén desarrollando nuevos procesos de fabricación, sino que también se estén mejorando constantemente los ya existentes; todo ello, con objeto de aumentar la eficiencia y calidad de los mismos, sin que ello afecte a los costes de producción.

El proyecto que se lleva a cabo en este documento se centra en uno de estos procesos, el conformado de chapa por medio de estampación en caliente. Concretamente, los esfuerzos del trabajo se concentran en aumentar la capacidad de enfriamiento de los conductos, con objeto de reducir el tiempo de proceso, y aumentar así su capacidad productiva.

Esto se aborda como un problema de optimización, para cuya resolución se emplean herramientas de cálculo de plena actualidad y cuyo uso está en aumento exponencial desde la última década. Esto implica el empleo de grandes volúmenes de datos para el entrenamiento de algoritmos predictivos, así como el uso de un algoritmo genético para la resolución del problema de optimización.

Laburpena

Automobilgintza sektorea, bai europar bai internazional mailan, merkatuaren kuota handienetakoa duen sektorea da. Hortaz, enpresak lehiakorrak izaten jarraitzeko xede izanik, legegintzak baita enpresen arteko norgehiagokak aurre egiteko ere, urtero eginiko inbestimenduek gero eta garrantzi handiagoa dute.

Hori dela kausa, fabrikazio aurreratua gaur egungo ingeniaritza mekanikoaren arloan, gaitzerrendan dagoen gairik garrantzitsuenetarako da. Honek dakarren ondorioa fabrikazio prozesu berriak garatu ez ezik, dagoeneko existitzen direnak hobekuntza jarraituan sartuta daude. Hau da, oro har, hobekuntza prozesuaren helburua, fabrikazioaren etekina areagotzea eta kalitatea hobetzea da, produkzioaren kostuari kalte egin barik.

Dokumentu honetan hedatzen den proiektuaren helburua, fabrikazio aurreratuko prozesu batean oinarritzen da: altzairu xaflen bero estanzioa. Erreminten hozte konduktuen gaitasuna hobetzea hain zuzen ere. Horrek guztiak duen helburua, prozesu ziklo batek behar duen denbora murriztea eta emankortasuna handitzea da.

Arazo honi aurre egiteko, optimizazio prozesuetan oinarritzen den ebazpen prozesuak erabiliko dira. Horretarako, gaurkotasuna duten kalkulu tresna erabiliko dira, non, azken hamarkadetan, esponenzialik zabaldu dira. Horretarako, data bolumen handiak erabiliko dira predikatze algoritmoak entrenatzeko. Halaber, optimizazio arazoari aurre egiteko, algoritmo genetikoa erabiliko dira.

Abstract

The automotive sector is, not only at the level of Europe but also worldwide, one of the industrial sectors with the highest market shares. This way, due to the high competitiveness as well as regulations on the sector, if companies aim to keep being competitive, years on end, they get pushed to undergo large investments.

This is one of the reasons which explain that advanced manufacturing is an up to date topic in mechanical engineering field. This means that not only new manufacturing methods are turning out of the blue, but also that, the existing ones are undergoing a constant development. All in all, the purpose is to improve the efficiency and quality of those processes without a detrimental to the manufacturing costs.

The project developed in this document is centred in one of those manufacturing processes, the sheet hot stamping. In particular, the effort is focused on achieving an increase on the thermal efficiency of the cooling ducts, which, eventually, would enhance the process productivity.

This is tackled as an optimization problem, where the calculus tools utilized are state of the art on the field of optimization, and which are undergoing an exponential growth since the last few decades. This implies the usage or a large data volume for the training of a predictive algorithm, or the implementation of a genetic algorithm for the resolution of the optimization problem.

Palabras clave

- Estampación en caliente
- Troquel
- Conducto
- Transferencia de calor
- Enfriamiento
- Optimización
- Metamodelo
- Red neuronal
- Algoritmo evolutivo
- Algoritmo genético
- Frente de Pareto

Lista de acrónimos

- CCT: Continuous Cooling Transform
- TTT: Temperature-Time-Transform
- CAE: Computer Aided Engineering
- CAD: Computer Aided Design
- FEM: Finite Element Method
 - MEF: Método de Elementos Finitos
- CFD: Computational Fluid Dynamics
- DOE: Design Of Experiments
- LHS: Latin Hypercube Sampling
- OSF: Optimal Space-Filling Shape
- RMSE: Root Mean Square Error
- MOGA: Multi Objective Genetic Algorithm
- SQP: Sequential Quadratic Programming
- NLPQL: Nonlinear Programming by Quadratic Lagrangian

Índice

1	Introducción.....	13
2	Contexto	15
2.1	Contexto histórico	15
2.2	Contexto docente.....	15
3	Alcance	16
4	Objetivos.....	17
4.1	Objetivos técnicos	17
4.2	Objetivos docentes.....	18
5	Requerimientos.....	19
6	Beneficios	20
6.1	Beneficios técnicos	20
6.2	Beneficios económicos	20
6.3	Beneficios sociales.....	21
7	Estado del arte	22
7.1	Estampación en caliente.....	22
7.2	Aspectos térmicos	27
7.3	Métodos computacionales	41
8	Análisis de alternativas.....	46
9	Software	48
9.1	CATIA V5	48
9.2	Ansys.....	48
9.3	Excel.....	49
9.4	Matlab	49
10	Metodología de cálculo	50
10.1	Introducción.....	50
10.2	Modelización mediante elementos finitos, FEM.....	50
10.3	Definición del modelo de optimización	51
10.4	Diseño de experimentos, DOE	51
10.5	Algoritmos predictivos, metamodelos	52
10.6	Optimización	53
10.7	Criterio de selección de la configuración óptima.....	53
11	Desarrollo de la solución	57
11.1	Geometría	57
11.2	Modelización mediante elementos finitos, FEM.....	58

11.3 Definición del modelo de optimización	75
11.4 Diseño de experimentos, DOE	79
11.5 Algoritmos predictivos, metamodelos	82
11.6 Optimización	83
11.7 Consideración de tensiones debidas a la dilatación térmica	91
12 Ampliación del método – Optimización tridimensional	95
12.1 Introducción	95
12.2 Desarrollo de la solución	96
13 Análisis de resultados	99
13.1 Metodología de análisis	99
13.2 Optimización 1	99
13.3 Optimización 2	107
13.4 Optimización 3	112
13.5 Optimización 4	116
13.6 Optimización 5	121
13.7 Comparación entre resultados	129
14 Planificación	143
14.1 Metodología del desarrollo	143
14.2 Planificación Gantt	144
14 Aspectos económicos	146
15.1 Recursos humanos	146
15.2 Recursos materiales	147
15.3 Amortizaciones	147
16 Conclusiones	148
17 Líneas futuras	149
18 Bibliografía	150

Índice de imágenes

Imagen 1. Pilar B de un automóvil de Ford	13
Imagen 2. Operación de embutición de una chapa	22
Imagen 3. Agrietamiento por deformación de una chapa conformada por doblado	22
Imagen 4. Componentes de un automóvil fabricados por estampación en caliente [2]	23
Imagen 5. Propiedades mecánicas del acero de alta resistencia 22MnB5 [2]	24
Imagen 6. Estampación directa (arriba); estampación indirecta (abajo) [2]	25
Imagen 7. Conductos de enfriamiento en la matriz y punzón [3]	26
Imagen 8. Diagrama TTT (temperatura, tiempo, transformación) del acero 22MnB5 [2]	28
Imagen 9. Relación entre dureza y el tiempo y temperatura de austenización [2]	29
Imagen 10. Relación entre el espesor y tiempo de calentamiento necesarios para obtener una dureza determinada [2]	29
Imagen 11. Calentamiento de la chapa mediante horno de rodillos [2]	30
Imagen 12. Calentamiento de la chapa mediante electrodos [2]	31
Imagen 13. Calentamiento de la chapa mediante bobina de inducción [2]	31
Imagen 14. Variación de temperatura a lo largo de dos superficies en contacto y líneas de transmisión de calor. Contacto térmico ideal o teórico (izquierda). Contacto térmico real (derecha)	33
Imagen 15. Convección forzada y natural	34
Imagen 16. Desarrollo del flujo a lo largo de un tubo circular	37
Imagen 17. Representación de la comparativa entre solución analítica y numérica	40
Imagen 18. Malla; discretización espacial	40
Imagen 19. Representación de una Red neuronal (izquierda); Red Neuronal Profunda (derecha)	41
Imagen 20. Diagrama de flujo de un algoritmo genético	44
Imagen 21. Representación del método de Newton-Raphson	45
Imagen 22. Cálculo de π mediante el Método de Montecarlo	46
Imagen 23. Catia	48
Imagen 24. Ansys	48
Imagen 25. Microsoft Office Excel	49
Imagen 26. Matlab	49
Imagen 27. Representación general de un frente de Pareto de una optimización de dos variables	54
Imagen 28. Ejemplo de diferentes resultados aportados por el código desarrollado	56
Imagen 29. Geometría CAD	57
Imagen 30. Dimensiones de referencia de los utillajes y chapa	57
Imagen 31. Distribución de flujo de calor en el contorno de los conductos	60
Imagen 32. Modelo de elementos finitos de la simulación tridimensional	62
Imagen 33. Geometría simplificada a analizar	63
Imagen 34. Secuencia de la simulación acoplada	65
Imagen 35. Introducción de las condiciones iniciales en Ansys. Alternativa 1	66
Imagen 36. Condiciones iniciales	67
Imagen 37. Detalle de la interfase de contacto [7]	67
Imagen 38. Detalle de la malla en la zona de contacto entre superficies (componente superior: punzón; componente central: chapa; componente inferior: matriz)	70
Imagen 39. Malla de elementos finitos	73

Imagen 40. Representación de los parámetros a optimizar	75
Imagen 41. Representación del dominio de optimización.....	77
Imagen 42. Resultados del DOE de la optimización 1.....	81
Imagen 43. Frente de Pareto, optimización 1, MOGA	84
Imagen 44. Frente de Pareto de los puntos validados de la optimización MOGA	85
Imagen 45. Frente de Pareto de la optimización 1.....	87
Imagen 46. Definición de variables de diseño (cotas paramétricas, P)	89
Imagen 47. Defunción de las funciones objetivo.....	90
Imagen 48. Bloques con diferentes metodologías de optimización incorporadas en Ansys Workbench	90
Imagen 49. Secuencia de bloques para definir el modelo en Ansys Workbench.....	91
Imagen 50. Secuencia de conexiones del modelo.....	92
Imagen 51. Cargas y condiciones de contorno del modelo mecánico.....	93
Imagen 52. Deformada (aumentada) del sistema en el modelo estático estructural	94
Imagen 53. Medición de tensiones principales máximas en el contorno de los conductos	94
Imagen 54. Geometría para optimización tridimensional	95
Imagen 55. Sección 1 (izquierda); sección 2 (derecha).....	96
Imagen 56. Planteamiento de la sección completa en el caso de que no exista plano de simetría	97
Imagen 57. Campo vectorial del flujo de calor – t=2s.....	101
Imagen 58. Campo vectorial del flujo de calor – t=10s.....	101
Imagen 59. Resultado de la Optimización 1	107
Imagen 60. Optimización 2. Frente de Pareto.....	107
Imagen 61. Optimización 2. Detalle del frente de Pareto.....	108
Imagen 62. Resultado de la Optimización 2	111
Imagen 63. Optimización 3. Frente de Pareto.....	112
Imagen 64. Optimización 3. Detalle del frente de Pareto.....	112
Imagen 65. Resultado de la Optimización 3	116
Imagen 66. Optimización 4 - Proyección bidimensional del frente de Pareto	117
Imagen 67. Optimización 4 - Representación tridimensional del frente de Pareto	118
Imagen 68. Resultado de la Optimización 4	120
Imagen 69. Optimización 5. Frente de Pareto de la sección 2	121
Imagen 70. Resultado de la Optimización 5	125
Imagen 71. Distribución de temperaturas en el contorno de los conductos. Sección 1 (izquierda); sección 2 (derecha)	126
Imagen 72. Relación entre ejes locales y globales.....	127
Imagen 73 Geometría de los conductos – recorrido mediante conductos rectos	128
Imagen 74. Geometría de los conductos – recorrido mediante splines	128
Imagen 75. Detalle de uno de los conductos	129
Imagen 76. Solución inicial Ø6mm - campo térmico de los utillajes durante el primer ciclo ...	133
Imagen 77. Solución inicial Ø6mm - campo térmico de los utillajes en estado estacionario ...	134
Imagen 78. Posicionamiento de conductos en las zonas de concentración de temperatura ...	134
Imagen 79. Optimización 1 – Distribución de tensiones principales máximas en los conductos	136
Imagen 80. Optimización 4 – Distribución de tensiones principales máximas en los conductos	136
Imagen 81. Numeración de los conductos.....	137

Imagen 82. Optimización 5 – Distribución de temperatura en la chapa en el instante de máximo gradiente térmico.....142

Índice de tablas

Tabla 1. Evaluación de diferentes metodologías de búsqueda de soluciones	47
Tabla 2. Propiedades térmicas del acero de los utillajes, 4Cr5MoSiV1	58
Tabla 3. Propiedades térmicas del acero al boro 22MnB5	58
Tabla 4. Cálculo del coeficiente de convección natural	61
Tabla 5. Comparativa del coste computacional entre un modelo en 2D y en 3D	62
Tabla 6. Comparativa del coste computacional de un modelo térmico y uno acoplado	64
Tabla 7. Coeficiente de convección	68
Tabla 8. Resumen de las configuraciones probadas en el mallado	71
Tabla 9. Resumen de las configuraciones en el incremento de tiempo	73
Tabla 10. Configuración inicial de los conductos	75
Tabla 11. Resumen de las optimizaciones planteadas.....	79
Tabla 12. Selección del método de muestreo	80
Tabla 13. Número de muestras en el DOE	81
Tabla 14. Comparativa entre algoritmos predictivos	82
Tabla 15. Objetivos de diseño para la optimización 1	84
Tabla 16. Configuraciones geométricas de los conductos; frente de Pareto de la optimización MOGA.....	86
Tabla 17. Cotas de las configuraciones óptimas de la optimización 1	88
Tabla 18. Propiedades mecánicas consideradas para los aceros	92
Tabla 19. Optimización 1. Resumen de temperaturas de los utillajes en estado estacionario.	103
Tabla 20. Optimización 1. Resumen de resultados en la chapa en estado estacionario	104
Tabla 21. Optimización 1. Diferencia máxima de temperaturas en la chapa.....	105
Tabla 22. Optimización 1. Resumen de resultados.....	106
Tabla 23. Optimización 2. Cotas de la configuración óptima	108
Tabla 24. Optimización 2. Resumen de resultados.....	111
Tabla 25. Cotas de las configuraciones óptimas de la optimización 3.....	113
Tabla 26. Optimización 3. Resumen de resultados.....	115
Tabla 27. Optimización 4. Resumen de resultados.....	119
Tabla 28. Optimización 4. Cotas de la configuración óptima	120
Tabla 29. Cotas de las configuraciones óptimas de la sección 2	122
Tabla 30. Optimización 5, Sección 2. Resumen de resultados	125
Tabla 31. Temperatura máxima en el contorno de los conductos, [°C]	126
Tabla 32. Coordenadas y diámetro de los conductos rectos	127
Tabla 33. Resumen de resultados en las optimizaciones 1, 2 y 3.....	131
Tabla 34. Resumen de resultados en las optimizaciones 1 y 4.....	135
Tabla 35. Resumen de resultados en la Optimización 5	140
Tabla 36. Resumen de la partida de presupuestos.....	146
Tabla 37. Presupuesto de los recursos humanos	147
Tabla 38. Presupuesto de los recursos materiales	147
Tabla 39. Presupuesto de las amortizaciones	147

Índice de gráficos

Gráfico 1. Función sigmoide	42
Gráfico 2. Comparativa entre aceros – Conductividad térmica	59
Gráfico 3. Comparativa entre aceros – Calor específico	59
Gráfico 4. Comparación de la evolución de la evolución de temperatura máxima de la chapa en el caso 2D y 3D.....	62
Gráfico 5. Comparativa entre métodos para establecer las condiciones iniciales	66
Gráfico 6. Comparación de la temperatura máxima de los utillajes en función de las diferentes condiciones de contorno de refrigeración	69
Gráfico 7. Comparativa del coste computacional entre las diferentes configuraciones de mallado.....	71
Gráfico 8. Temperatura máxima final en la chapa en función de la configuración del mallado .	72
Gráfico 9. Comparativa del coste computacional entre las diferentes configuraciones del incremento de tiempo	74
Gráfico 10. Temperatura máxima final en la chapa en función del incremento de tiempo	74
Gráfico 11. Error RMS del algoritmo predictivo en función del algoritmo DOE	80
Gráfico 12. Error RMS del algoritmo predictivo	82
Gráfico 13. Optimización 1. Evolución de la temperatura máxima de la chapa. Comparativa entre soluciones	99
Gráfico 14. Optimización 1. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima en los utillajes.....	102
Gráfico 15. . Optimización 1. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima de la chapa	103
Gráfico 16. Optimización 1. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la diferencia de temperatura de la chapa	105
Gráfico 17. Optimización 2. Evolución de la temperatura máxima de la chapa. Comparativa entre soluciones	109
Gráfico 18. Optimización 2. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima en los utillajes.....	109
Gráfico 19. Optimización 2. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima de la chapa	110
Gráfico 20. Optimización 2. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la diferencia de temperatura de la chapa	110
Gráfico 21. Optimización 3. Evolución de la temperatura máxima de la chapa. Comparativa entre soluciones	113
Gráfico 22. Optimización 3. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima en los utillajes.....	114
Gráfico 23. Optimización 3. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima de la chapa	114
Gráfico 24. Optimización 3. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la diferencia de temperatura de la chapa	115
Gráfico 25. . Optimización 5, Sección 2. Evolución de la temperatura máxima de la chapa. Comparativa entre soluciones.....	123
Gráfico 26. Optimización 5, Sección 2. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima en los utillajes.....	123

Gráfico 27. Optimización 5, Sección 2. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima de la chapa	124
Gráfico 28. Optimización 5, Sección 2. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la diferencia de temperatura de la chapa	124
Gráfico 29. Optimizaciones 1, 2 y 3. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima en los utillajes.....	130
Gráfico 30. Optimizaciones 1, 2 y 3. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima de la chapa	130
Gráfico 31. Optimizaciones 1, 2 y 3. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la diferencia de temperatura de la chapa	131
Gráfico 32. Evolución de la temperatura promedio de los utillajes	133
Gráfico 33. Optimizaciones 1 y 4 – Distancia entre centros de los conductos.....	137
Gráfico 34. Optimizaciones 1 y 4 – Distancia entre superficies de los conductos.....	138
Gráfico 35. Conductos tridimensionales. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima en los utillajes	139
Gráfico 36. Conductos tridimensionales. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima de la chapa.....	139
Gráfico 37. Optimización tridimensional. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la diferencia de temperatura de la chapa	140

1 Introducción

El continuo aumento de la conciencia social por el medio ambiente es un tema de importante actualidad. Tanto es así, que su efecto se ve reflejado en buena parte de tanto las políticas de la Unión Europea como en las de los países miembros en sí. Así pues, un importante número de regularizaciones y estimulaciones económicas están enfocadas a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero. Algunos ejemplos de ello son los numerosos cierres que se han producido en centrales térmicas de carbón o el conocido como impuesto al CO₂.

Bajo este contexto, uno de los principales y mayores sectores industriales, el de la automoción, se encuentra fuertemente afectado por estas nuevas tendencias. Esto conlleva a que las empresas se vean obligadas a justificar consumos en los vehículos cada vez menores. Para ello, una primera solución pasaría por reducir la cilindrada y potencia de los motores de combustión; sin embargo, en muchas ocasiones, esta no es una solución deseable ya que va en contra de la demanda y necesidades de los usuarios. Así pues, dada la complejidad y envergadura de los problemas a los que se enfrenta el sector, este permanece en continua búsqueda de nuevas soluciones.

Para ello, por un lado, se está tratando de impulsar iniciativas de vehículos con combustibles no derivados del petróleo, siendo el principal referente de esta alternativa el vehículo eléctrico. Por otro lado, existe una segunda alternativa, menos conocida por el público general, pero completamente compatible con el desarrollo del vehículo eléctrico, y esta consiste en la mejora en la eficiencia energética de los vehículos.

Una vez más, para conseguir la optimización de la energía de los vehículos existen diferentes líneas de trabajo. Por ejemplo, se puede tratar de mejorar el consumo y eficiencia térmica de los motores, en el aumento de la eficiencia de las celdas de las baterías, o en la reducción del peso total del vehículo.

En lo que respecta a esta última línea de trabajo, la reducción del peso total del vehículo, los principales esfuerzos se centran en emplear materiales estructurales para el chasis de mayor resistencia mecánica, como los aceros de ultra alta resistencia. Esto es debido a que, cuanto mayor sea la resistencia del material, menor sección será necesaria para soportar las cargas; es decir, en última instancia, empleando materiales de alta resistencia, se posibilita emplear una menor cantidad de material para la construcción del vehículo, y, consecuentemente, su peso, y con ello su consumo, será menor. Un ejemplo de un componente de los automóviles que requiere de este tipo de soluciones es el pilar B.



Imagen 1. Pilar B de un automóvil de Ford

Si bien los aceros de alta resistencia presentan la ventaja de tener una elevada resistencia mecánica, a la hora de fabricar componentes con ellos, esto supone una desventaja, especialmente en el conformado de chapa. Es decir, dada su alta tensión de fluencia, resulta complicado provocar que el material plastifique al ser conformado. Por este motivo, cuando se retira la carga de la prensa, la chapa, al no haber llegado a la fluencia, se produce la recuperación elástica o “*springback*”, haciendo que esta no mantenga su forma.

Como solución a este problema, se presenta la estampación en caliente; en este proceso, la chapa se conforma a una temperatura por encima de la de austenización, por encima de los 750°C. Ello permite resolver el problema del *springback*, pero en cambio, introduce otras dificultades, como el enfriamiento de la chapa, o el control en la estructura cristalográfica de la misma.

Así pues, una de las líneas de investigación que están abiertas con respecto a la estampación en caliente es la de la optimización de los conductos de enfriamiento de los troqueles. Por un lado, se busca reducir el tiempo de proceso, incrementando la cadencia de la cadena de producción y consecuentemente, aumentando el número de unidades producidas por unidad de tiempo; es decir, una reducción en el coste total del producto. Por otro lado, el diseño óptimo de los conductos también busca tener un mayor control sobre la estructura cristalográfica de la chapa, garantizando el temple a lo largo de toda la superficie y minimizando las tensiones residuales.

Con todo ello, el proyecto que se desarrolla en este documento, trabaja en las mismas líneas de investigación enfocadas a la mejora del sistema de enfriamiento de los troqueles de estampación en caliente.

2 Contexto

2.1 Contexto histórico

El sector del automóvil, siendo uno de los mayores sectores industriales, se encuentra sumergido en un proceso de cambio, impulsado tanto por las nuevas tendencias del mercado, como por las diferentes regularizaciones del sector. Bajo esta premisa, dos de los objetivos que se persiguen es la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero y la electrificación del parque de automóviles.

Para hacer frente a ambas metas, una de las estrategias seguidas es la de la reducción del peso total de los automóviles. Ello, entre otros, implica el rediseño y optimización de muchos de los componentes de los vehículos; para ello, una de las líneas de trabajo seguidas es la de emplear materiales estructurales de mayor resistencia mecánica.

Bajo esta premisa, la estampación en caliente es uno de los procesos de fabricación más empleados para el conformado de los aceros de alta resistencia que componen el chasis de un automóvil. Por dicho motivo, existe un fuerte interés por parte de las empresas por mejorar el rendimiento de este proceso de fabricación.

Por lo tanto, siguiendo por esta línea, un punto de gran importancia de la estampación en caliente es el tiempo de proceso, el cual es fuertemente dependiente de la eficiencia de los conductos de enfriamiento.

2.2 Contexto docente

Este proyecto es el Trabajo de Fin de Máster del Máster Universitario en Ingeniería Mecánica, llevado a cabo en el departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Concretamente, el trabajo está centrado en las líneas de investigación del departamento enfocadas a la mejora de procesos de fabricación.

Dentro de estas líneas de investigación, ya se habían llevado a cabo con anterioridad otros trabajos relacionados con la mejora del proceso de estampación en caliente. Sin embargo, estos trabajos han resultado ser, en líneas generales, de índole cualitativa; en ellos se compara cualitativamente la mejora en la capacidad de enfriamiento de un mismo troquel con diferentes configuraciones en los conductos de enfriamiento.

Sin embargo, una vez se ha podido validar la mejoría que puede aportar un correcto diseño de conductos, resulta imprescindible establecer un método de cálculo que permita obtener la configuración óptima de los mismos. Bajo este contexto, surge la necesidad de llevar a cabo un proyecto enfocado en establecer una metodología de optimización, lo cual da origen a este proyecto.

3 Alcance

En este proyecto se busca desarrollar una metodología para optimizar el sistema de enfriamiento de los troqueles de estampación en caliente. Concretamente, el proceso de optimización se centra en ajustar el diámetro y posición de los conductos en los utillajes de estampación, es decir, en el troquel y en la matriz. Así pues, queda fuera del alcance de este trabajo el diseño de cualquier otra zona o elemento del sistema de enfriamiento; no se contempla el sistema de bombeo, recirculaciones del flujo, sistemas de filtrado de partículas ni ningún otro elemento adicional.

Se trata de un proyecto de investigación, donde el desarrollo de la solución se ha llevado a cabo con la ayuda del software CAE (*“Computer Aided Engineering”* o *“Ingeniería Asistida por Ordenador”*) Ansys.

En líneas generales, la situación que se plantea consiste en una optimización multiobjetivo, donde, para llegar a la solución deseada, se hace uso de algoritmos de optimización ampliamente empleados en la actualidad. Concretamente, se emplean algoritmos genéticos y las ampliamente conocidas y estudiadas redes neuronales. Así pues, se pretende estudiar y profundizar en el funcionamiento y capacidades de estos métodos computacionales, tratando de obtener los mejores resultados de forma eficiente. Sin embargo, no es objeto de estudio de este proyecto el programar dichos algoritmos; en cambio, para su implementación, se hará uso de softwares que ya disponen de estas herramientas.

En lo que respecta a la aplicabilidad de la metodología, se busca que esta sea de uso general, es decir, que pueda llevarse a cabo independientemente de la forma de los utillajes y de la chapa. En el desarrollo de la solución, inicialmente se trabaja sobre una geometría simple, que sirva para asentar las bases del método, así como para comparar diferentes alternativas, pudiendo estudiarse mediante sencillos análisis bidimensionales. Posteriormente, a partir de las conclusiones extraídas de esta fase, se propone una ampliación de esta metodología para geometrías más complejas, y que no puedan ser estudiadas por análisis bidimensionales. Con todo ello, se busca que el trabajo tenga un alcance general, y que no se vea limitado por la geometría del troquel o punzón.

Finalmente, para comprobar la mejoría de los resultados obtenidos, estos se comparan con las soluciones iniciales. De este modo, se pretende cuantificar la capacidad de mejora que existe al emplear herramientas de optimización en el diseño.

4 Objetivos

4.1 Objetivos técnicos

El objetivo general de este proyecto es la optimización de los conductos de enfriamiento de los troqueles de estampación en caliente. Sin embargo, este problema puede plantearse desde diferentes puntos de vista.

Para ello, un posible enfoque es el de tratar de reducir las pérdidas de carga del circuito de refrigeración, de modo que la mejora en la eficiencia energética se diese gracias a un menor consumo en el sistema de bombeo del fluido.

Sin embargo, el punto que se trabaja en este proyecto se centra en mejorar la transferencia de calor de la chapa a los circuitos de enfriamiento. Para ello el objetivo es encontrar la configuración óptima en la posición y diámetro de los conductos que permitan maximizar la velocidad de enfriamiento de la chapa.

Del mismo modo, en la mayoría de ocasiones, controlar la curva de enfriamiento de la chapa no es el único factor a considerar en un correcto diseño. Precisamente, un aspecto a tener en cuenta es el de mantener una temperatura de enfriamiento homogénea a lo largo de toda la superficie de la chapa. Esto permite tener un mayor control en la estructura cristalográfica del material, lo cual afecta directamente a sus tensiones residuales internas, así como a sus propiedades mecánicas. Por este motivo, de acuerdo a otros estudios [1] se impone que la diferencia de temperaturas entre el punto más caliente y el más frío de la chapa en un instante dado no supere los 50°C.

Por otro lado, el objetivo global del proyecto es plantear un método fiable que permita llevar a cabo esta optimización. Para ello, el objetivo es emplear métodos computacionales que permitan, partiendo de una solución inicial, encontrar una configuración óptima de los conductos. Por este motivo, se busca que la metodología de cálculo propuesta no dependa, en ningún paso, de la intuición o experiencia previa por parte del diseñador. Todo ello permitiría que, en un posible trabajo futuro, todos los pasos seguidos se integrasen en un software que fuese capaz de desarrollar la optimización de forma autónoma.

Como consecuencia de este último objetivo, y tal y como ya se ha comentado en anterioridad, se busca que el camino a la solución al problema no dependa de la geometría de los utillajes. En caso contrario, la metodología propuesta no sería de índole general, y se vería limitada por la geometría de los troqueles.

Finalmente, cabe destacar que para que un método pueda ser aceptado como útil, deben considerarse otros aspectos más allá de la calidad de los resultados. Concretamente, un aspecto importante a la hora de evaluar la calidad de un algoritmo es el tiempo que este requiere para ser ejecutado; cuanto más tiempo requiera, peor será la aptitud de este algoritmo. Por este motivo, el objetivo de este proyecto no solo es desarrollar una metodología de cálculo, sino hacer que esta sea eficiente.

4.2 Objetivos docentes

Llevar a cabo un proyecto de las dimensiones de un trabajo de fin de máster no solo permite al alumno demostrar los conocimientos adquiridos a lo largo de sus estudios, sino que también puede servir como puerta de entrada para explorar nuevos campos del conocimiento. Bajo esta premisa, uno de los objetivos de este proyecto es introducir al alumno en diferentes métodos computacionales enfocados a resolver complejos problemas de optimización.

5 Requerimientos

Tal y como se ha planteado en el apartado de Objetivos, el objetivo global del proyecto no solamente es demostrar que el método empleado para la optimización permite obtener una mejora en el diseño de los conductos. También se pretende que el método llevado a cabo sea de índole general, es decir, que pueda aplicarse a cualquier diseño de los utillajes. Por este motivo, un requisito que debe cumplir la metodología propuesta es que esta debe ser independiente de la geometría de los utillajes.

Por otro lado, se pretende que el método empleado sea una herramienta útil para el diseño del sistema de enfriamiento, y, por lo tanto, su uso debe resultar ventajoso frente a otros métodos tradicionales. Por este motivo, un requerimiento indispensable es que el método se pueda llevar a cabo por medio de herramientas de cálculo ya existentes, es decir, por los propios proveedores del software. De este modo, se evita que el encargado del diseño de los troqueles invierta su tiempo en programar complejos y extensos algoritmos.

Del mismo modo, se pretende que las herramientas empleadas no requieran de amplios conocimientos en métodos computacionales por parte del diseñador, de modo que se facilite el acceso a la metodología de diseño propuesta.

Finalmente, siguiendo en la línea de desarrollar un método válido, se requiere que el tiempo transcurrido desde que se plantea el problema hasta que se obtenga la solución sea de un orden de magnitud razonable. Es decir, si mientras que con un método de diseño tradicional se tarda un tiempo "t" en diseñar los conductos, por ejemplo, una semana, resultaría inviable proponer un método de optimización que para llevarlo a cabo requiriese un mes de cómputo. En definitiva, resulta necesario establecer un método eficiente en lo que al tiempo de cálculo se refiere.

Por otro lado, un aspecto determinante a la hora de evaluar la aptitud de los resultados es la facilidad con la que estos se pueden implementar en la pieza final. Es decir, si los conductos adoptan geometrías demasiado complejas o intrincadas, resultarían difíciles de fabricar, encareciendo de forma innecesaria el precio de fabricación de los utillajes. Por este motivo, con objeto de garantizar la sencillez de fabricación de los troqueles, se requiere que los conductos puedan ser mecanizados por procesos tradicionales de taladrado. Así pues, debido a que este se trata de un proyecto de investigación, también se van a explorar soluciones que, si bien pueden no ser tan sencillas en lo que a la fabricación se refiere, permitan encontrar soluciones óptimas globales al problema.

6 Beneficios

6.1 Beneficios técnicos

Emplear aceros de alta resistencia en la construcción de los automóviles permite diseñar vehículos ligeros y eficientes energéticamente, a la vez que se mantienen, o incluso se mejoran, los requerimientos en seguridad. Esto obliga a los fabricantes a emplear diferentes procesos a la hora de trabajar con este tipo de materiales; en este caso, la alternativa mayoritariamente empleada es la estampación en caliente.

El proyecto desarrollado permite mejorar la eficiencia de este proceso. Por un lado, se aumenta la velocidad de enfriamiento de la chapa, lo cual, a su vez, aporta una reducción en el tiempo de proceso. Por otro lado, la metodología desarrollada facilita el obtener un enfriamiento homogéneo a lo largo de toda la chapa. Esto, en primer lugar, resulta beneficioso de cara a poder mantener el control de la estructura cristalográfica del acero, lo cual está directamente relacionado con las propiedades mecánicas de la pieza final. En segundo lugar, al tener una temperatura de enfriamiento homogénea en la chapa, se reducen las tensiones internas que se pueden generar en ella. Esto resulta importante para evitar deformaciones en la pieza final, así como para controlar la fragilidad de la misma. Finalmente, una mejor refrigeración de la chapa permite una reducción en las temperaturas de los utillajes de estampación, lo cual, a su vez, resulta beneficioso para reducir las tensiones generadas en los utillajes debidas a la dilatación térmica. En última instancia, esto facilitará el diseño de los utillajes de cara a poder cumplir con la vida a fatiga esperada.

En lo que respecta al método de optimización empleado, este se basa tanto en algoritmos estocásticos como deterministas. Los primeros permiten explorar la mayoría del dominio de optimización, de modo que exploran nuevas y mejores soluciones. Los segundos, en cambio, los métodos deterministas, no permiten explorar nuevas zonas, pero permiten ajustar con elevada precisión las zonas de máximos o mínimos localizadas. Por lo tanto, al combinar ambos métodos se logra encontrar soluciones óptimas, pero claramente diferentes entre sí, y ajustadas con un elevado nivel de precisión.

6.2 Beneficios económicos

Dada la fuerte competencia que existe entre las grandes empresas del sector de automoción, resulta especialmente importante controlar los gastos económicos. Sin embargo, atendiendo a las demandas de los consumidores, una reducción en el coste no debería incurrir en una reducción en la calidad del producto. Todo ello, obliga a las empresas a mantenerse a la vanguardia y a buscar nuevas soluciones basadas en la rama técnico-científica.

En lo que respecta a los beneficios del método propuesto, en primer lugar, se tiene que este se desarrolla completamente mediante técnicas de computación. Ello permite, a partir de un modelo matemático, analizar muchas soluciones con un coste mínimo. Adicionalmente, el resultado al que se llega estará muy cerca de un producto final, de modo que, los ensayos y puesta a punto posteriores serán mínimos.

Por otro lado, debido a que el método está basado completamente en algoritmos computacionales, no se requiere por parte del encargado de diseño una amplia experiencia previa para llegar a obtener una solución válida y eficiente. Por el contrario, un diseñador

experimentado podría aportar soluciones iniciales cercanas a la óptima, reduciendo el número de iteraciones necesarias, y agilizando así, aún más, el proceso de optimización.

Finalmente, el desarrollo de un método basado completamente en las matemáticas, permite establecer un proceso riguroso que no dependa de la intuición del diseñador. Esto resulta especialmente importante de cara evitar la pérdida de conocimiento de las empresas en los cambios generacionales; mediante el método propuesto se pueden llegar a obtener resultados óptimos independientemente de la experiencia del diseñador.

6.3 Beneficios sociales

Dentro de los conocimientos que se asumen en un ingeniero mecánico se encuentran el cálculo estructural y resistente o los procesos de fabricación industriales. Sin embargo, cada vez es mayor la demanda de especialistas con conocimientos adicionales en otros campos. Por ello, el máster de ingeniería mecánica incluye asignaturas como mecatrónica o métodos computacionales.

El trabajo de fin de máster desarrollado en este documento, se basa en trabajar y ampliar estos conocimientos complementarios a los inherentemente propios a los de un ingeniero mecánico. La situación a resolver en el proyecto consiste en un problema de optimización. Para su resolución, se han empleado algoritmos que, si bien sus orígenes son de los años 70 o incluso anteriores, en los últimos años están siendo fuertemente desarrollados y son cada vez más empleados gracias al aumento en la capacidad de cálculo de los ordenadores.

Finalmente, este proyecto ha permitido trabajar en un problema térmico, lo cual ha posibilitado recuperar y afianzar conocimientos en dicho campo. En él se han trabajado conceptos como el coeficiente de transferencia de calor en el contacto, cálculo del coeficiente de convección o el análisis térmico transitorio.

7 Estado del arte

7.1 Estampación en caliente

7.1.1 Introducción

Los procesos de conformado de chapa consisten en obtener un componente a partir de la deformación plástica de la chapa; para ello, se emplean unos utillajes denominados matriz y punzón. Así pues, en este proceso, se llevan a cabo principalmente las siguientes operaciones:

- Doblado: consiste en deformar plásticamente la chapa para que adopte la geometría
- Corte y punzonado: son operaciones que consisten en eliminar el material sobrante de una operación. Normalmente, la operación de corte hace referencia a eliminar el contorno exterior o sobrantes de la pieza, mientras que la operación de punzonado se asocia con la realización de agujeros en la pieza.
- Embutición: consiste en deformar plásticamente la pieza para que se adapte a la geometría de la matriz y troquel

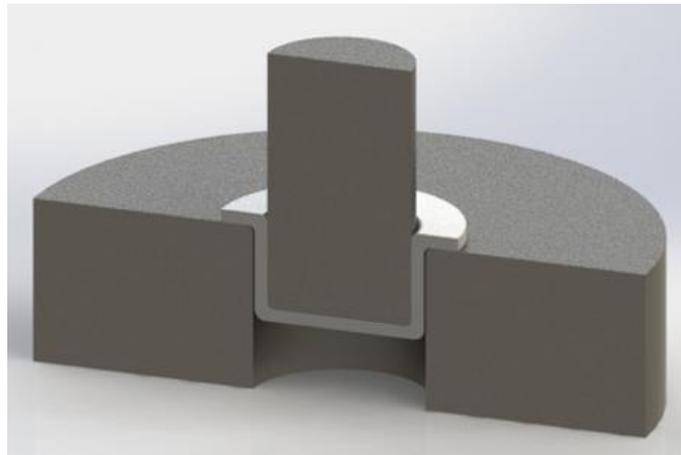


Imagen 2. Operación de embutición de una chapa

En muchas ocasiones, especialmente en las operaciones de doblado y embutición, se requiere que el material tenga una gran capacidad de fluir plásticamente sin llegar a adelgazarse excesivamente o sin llegar a presentar roturas o grietas.

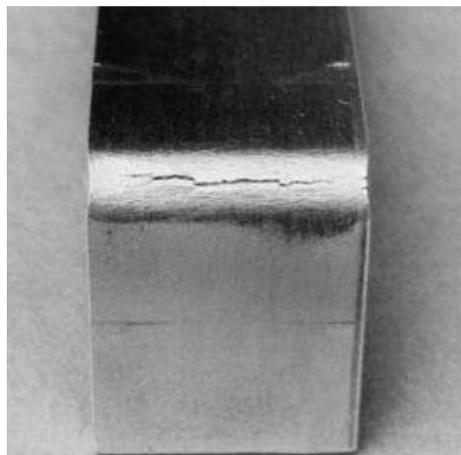


Imagen 3. Agrietamiento por deformación de una chapa conformada por doblado

Así pues, a la hora de diseñar un proceso de estampación, es importante caracterizar correctamente el material, de modo que permita conocer si una determinada operación se podrá llevar a cabo sin provocar los mencionados fallos. Para ello, alguno de los ensayos que se emplean para el caracterizado mecánico de la chapa son los siguientes:

- Ensayo de tracción
 - o Ley de Hollomon
 - o Velocidad de deformación
- Ensayo de Erichsen
- Diagrama límite de fallo, FLD
- Diagrama límite de embutibilidad, LDR
- Embutición de copa
- Drop Tower
- Test de Hopkinson
- Ensayos tribológicos (pin on disk)

7.1.2 Aceros de alta resistencia

Se observa que hay una gran variedad de ensayos que permiten caracterizar el material. Esto es debido a que tanto las propiedades mecánicas como tribológicas influyen fuertemente al proceso de estampación. Este es un aspecto especialmente importante a la hora de trabajar con aceros de alta resistencia; este tipo de aceros, presentan un elevado límite elástico, comúnmente por encima de los 1000 MPa, lo que implica varias dificultades. Un ejemplo de ello es la recuperación elástica o *springback*; al conformar materiales con una tensión de fluencia tan elevada, resulta complicado provocar que plastifiquen todos los puntos necesarios. De este modo, al retirar la carga de la prensa, los puntos sin plastifican se recuperan elásticamente, deformando completamente la pieza fabricada. Por otro lado, al tener un límite de fluencia tan elevado, implica un aumento en la fuerza necesaria a ejercer en la prensa para realizar el conformado, lo que aumenta el desgaste de los utillajes, reduciendo así su vida útil.

Sin embargo, la demanda que se tiene sobre este tipo de materiales es cada vez mayor, por lo que es una necesidad para el sector de la estampación poder trabajar los aceros de alta resistencia. El motivo de este aumento en la demanda se debe a las necesidades del sector de automoción, donde se busca aligerar el peso de los vehículos por medio de emplear materiales de mayor resistencia.

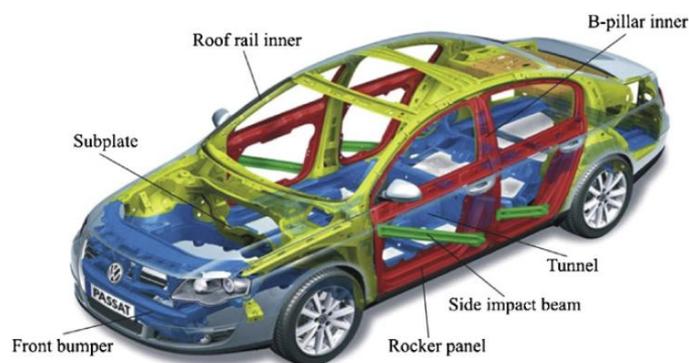


Imagen 4. Componentes de un automóvil fabricados por estampación en caliente [2]

7.1.3 Estampación en caliente

La estampación en caliente surge como la alternativa a la estampación tradicional o estampación en frío, para poder trabajar con los aceros de alta resistencia. Esta se basa en que, los aceros, al ser calentados por encima de unos 600°C, sufren una drástica disminución en su resistencia mecánica, lo que facilita conformarlos mediante deformación plástica.

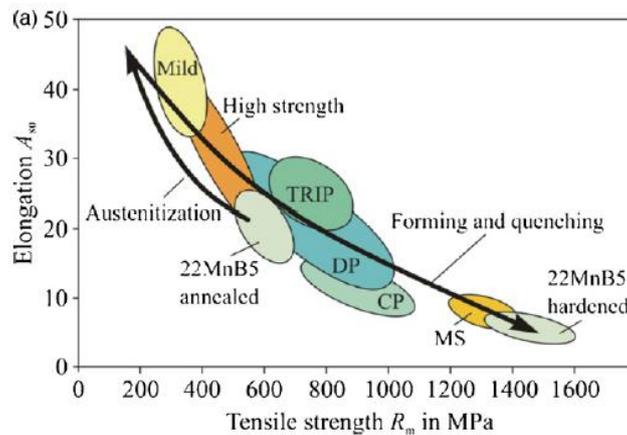


Imagen 5. Propiedades mecánicas del acero de alta resistencia 22MnB5 [2]

Así mismo, existen dos variantes principales de este proceso: estampación directa y estampación indirecta.

- Estampación directa: el proceso se divide en 3 etapas principales. En primer lugar, la chapa a conformar se calienta por encima de la temperatura de austenización, para, posteriormente, introducirla en la prensa y conformarla rápidamente. Finalmente, se lleva a cabo una etapa de enfriamiento a una velocidad regulada, lo que permitirá obtener la estructura cristalográfica deseada en el acero.
- Estampación indirecta: esta variante consiste en 4 etapas. En la primera fase, la chapa se conforma en frío hasta alcanzar una determinada profundidad de embutición. Posteriormente, la chapa deformada se calienta hasta la temperatura de austenización, y se somete a una nueva fase de deformación, esta vez en caliente. Finalmente, y al igual que en la estampación en caliente, controlando la curva de enfriamiento de la chapa, se puede regular la estructura cristalográfica que se quiere obtener.

Cabe destacar que, debido a que la chapa comienza a enfriarse desde el momento en el que se saca del horno, esta debe calentarse varias decenas de grados por encima de la temperatura de austenización. Por ello, si bien la temperatura de austenización de los aceros se encuentra en torno a los 750°C, la temperatura a la que se llega a calentar la chapa es de 850-950°C. De este modo, se garantiza que, en el momento del cierre de la prensa, todavía no haya aparecido una estructura martensítica en la chapa.

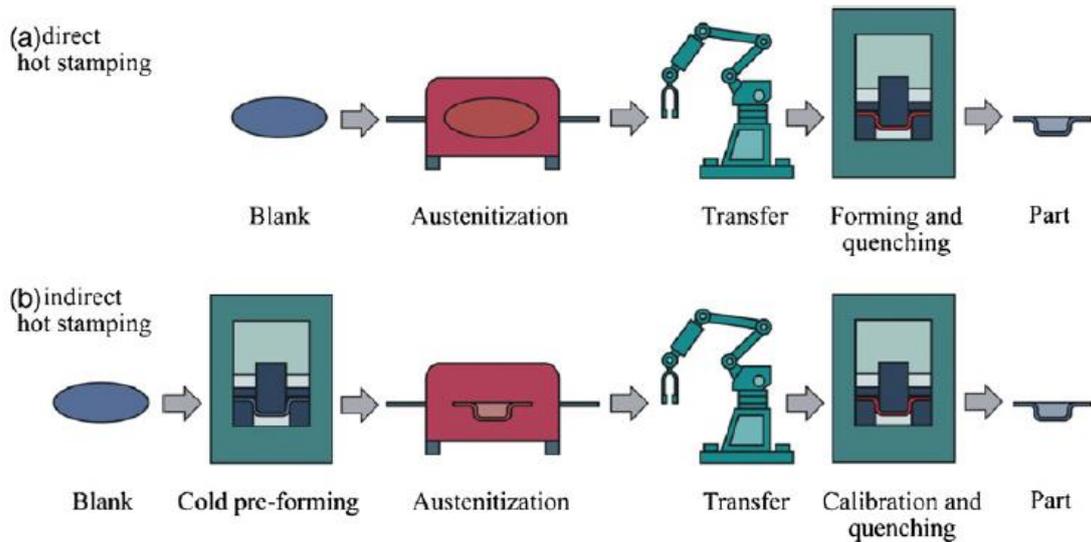


Imagen 6. Estampación directa (arriba); estampación indirecta (abajo) [2]

7.1.4 Sistema de enfriamiento

Una vez conformada la pieza en caliente, es necesario controlar la curva de enfriamiento de la chapa para poder conseguir la estructura cristalográfica deseada; normalmente, se busca templar el material para lograr la generación de martensita. Para ello, en algunos casos, si la conductividad térmica del acero de los utillajes es lo suficientemente elevada, puede llegar a templarse la pieza sin necesidad de ningún sistema de enfriamiento adicional.

Sin embargo, la tendencia actual en la industria es la fabricación de los utillajes con conductos de enfriamiento internos, lo cual permite tener un mejor control en las temperaturas del proceso. Del mismo modo, debido a la gran demanda que existe actualmente, el objetivo de la implementación de los conductos de enfriamiento también es el de mejorar la eficiencia del proceso. Es decir, no solo se busca enfriar la pieza a un ritmo suficiente para obtener la estructura cristalográfica deseada, sino que se busca hacerlo en el menor tiempo posible. De este modo, cuanto menor sea el tiempo que la pieza permanezca dentro de la prensa, mayor será la cadencia del proceso, es decir, se podrán fabricar más componentes por unidad de tiempo.

A día de hoy, existen diferentes propuestas o líneas de investigación de cara a obtener la geometría óptima de los conductos de enfriamiento. Algunos de estos estudios son de índole teórica, donde se busca establecer métodos de cálculo o contrastar los resultados obtenidos mediante diferentes técnicas de optimización. Sin embargo, otros estudios son más prácticos, donde su objetivo es dar respuesta a problemas concretos que se puedan presentar. Un ejemplo de este último caso se puede observar en la referencia [3], donde se lleva a cabo la optimización de unos utillajes con una geometría tridimensional de los conductos.

Sin embargo, como es habitual en multitud de ocasiones, es necesario realizar un balance entre la mejor solución teórica en lo que se refiere a la refrigeración, y con la técnicamente posible. Es decir, a la hora de diseñar los conductos, uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta es cómo se van a fabricar. Así pues, en el caso ideal, los conductos de enfriamiento deberían poder fabricarse por medio de operaciones de taladrado en la matriz y troquel.

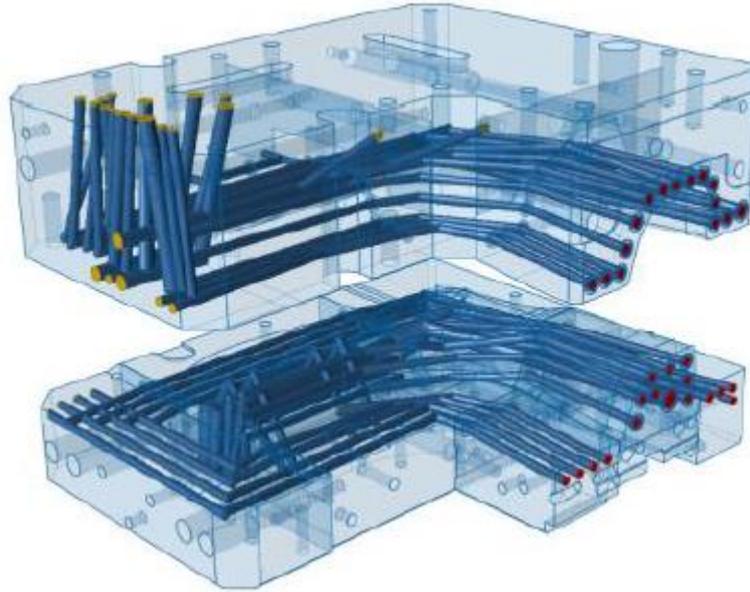


Imagen 7. Conductos de enfriamiento en la matriz y punzón [3]

En cualquier caso, a día de hoy, al igual que en la mayoría de ámbitos de ingeniería, el diseño de los conductos se lleva a cabo por medio de ordenador. Para ello, se generan mediante CAD las geometrías de la chapa y utillajes, y se plantea un problema de transferencia de calor para modelar el proceso de enfriamiento de la chapa. Así mismo, para su resolución, se emplean herramienta de cálculo numérico, como el método de elementos finitos (FEM) o mecánica de fluidos computacional (CFD).

Por último, en lo que respecta al proceso de fabricación de los conductos de enfriamiento, el proceso más habitual es un mecanizado de los mismos mediante una operación de taladrado. Pueden llevarse a cabo otras alternativas, como el empleo de machos a la hora de generar el molde de fundición de los utillajes, pero estos son menos habituales. Por estos motivos, es poco frecuente generar conductos curvos, aunque existen métodos para poder fabricarlos; por ejemplo, taladrar dos agujeros en ángulos y posiciones diferentes, provocando que estos intersequen entre sí en el interior de los utillajes, formando así un único conducto.

7.2 Aspectos térmicos

7.2.1 Calentamiento y enfriamiento de la chapa

En el proceso de estampación en caliente, el elevar la temperatura de la chapa resulta necesario para reducir su rigidez y resistencia mecánica, lo cual resulta ventajoso por diversos motivos. Por un lado, una chapa reblandecida requerirá menor fuerza de compresión en la prensa para alcanzar la fluencia del material. Por otro lado, un aumento en la ductilidad de la chapa, permite que este fluya más fácilmente, lo que, en última instancia, permite evitar adelgazamientos excesivos o roturas de la pieza conformada. Por último, pero no por ello menos importante, tal y como se ha explicado anteriormente, un material con mayor ductilidad permite evitar el problema de la recuperación elástica; esto resulta beneficioso de cara a poder fabricar piezas con mayor precisión geométrica y dimensional, así como para reducir el número de componentes fabricados de forma defectuosa.

En lo que respecta al calentamiento de la chapa, se busca que la temperatura que se alcance en la fase inicial sea mayor que la temperatura de austenización del material. Esta se trata de una fase en el diagrama del hierro carbono, y que normalmente suele ser estable por encima de los 700 o 750°C, dependiendo de la aleación que se esté trabajando. Es importante alcanzar esta temperatura para que, a lo largo del proceso de enfriamiento, pueda darse la recristalización del acero. Esto, en última instancia, permite controlar las propiedades mecánicas del acero. En el caso de estampación en caliente aplicada al sector de la automoción, la fase de recristalización que normalmente se busca obtener es la martensita; para poder generarla hace falta velocidad de enfriamiento lo suficientemente elevadas como para garantizar el templado del acero.

Sin embargo, a pesar de que con 750°C sea suficiente para alcanzar la fase de austenita del acero, la chapa se suele calentar hasta una temperatura sensiblemente mayor, unos 850 – 950°C. De este modo, se garantiza que, en el transporte desde el horno hasta la prensa, no se produce un enfriamiento por debajo de la temperatura de austenización. Adicionalmente, una vez se ha superado la temperatura de austenización, la chapa debe mantenerse a esta temperatura el tiempo suficiente como para garantizar que se da una transformación completa de la estructura cristalográfica a la fase austenítica.

Por otro lado, una vez se ha conformado la chapa, es necesario bajar rápidamente su temperatura para garantizar que se obtendrá una estructura martensítica. Si la velocidad de enfriamiento es insuficiente, puede que parte de la austenita se transforme en bainita, perlita o ferrita. Para obtener el valor de la velocidad de enfriamiento, se recurre a los diagramas CCT (“*Continuous Cooling Transform*”) o a los diagramas TTT (“*Temperature-Time-Transform / Isothermal transform diagram*”). Cada material tiene sus diagramas propios; a continuación, se muestra el diagrama CCT del acero 22MnB5, uno de los más empleados en el sector de la automoción.

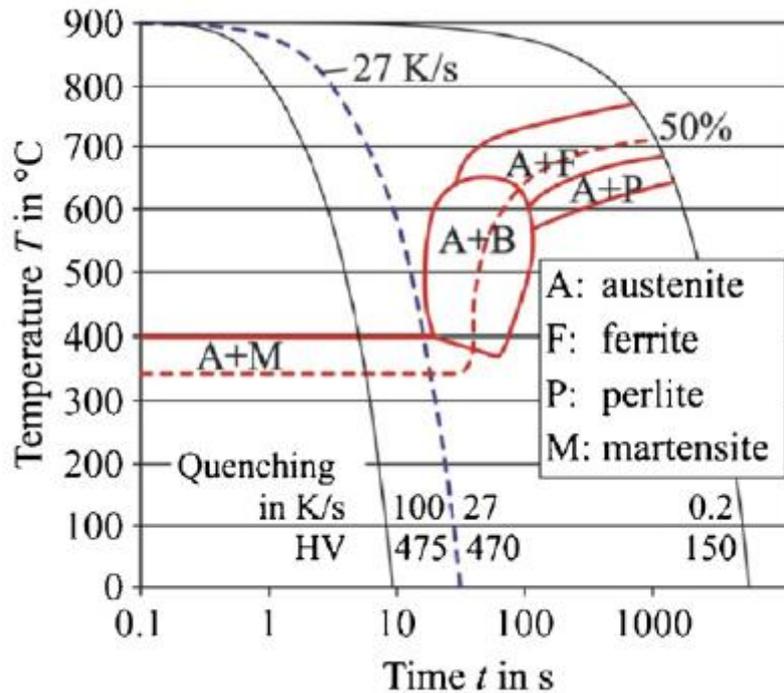


Imagen 8. Diagrama TTT (temperatura, tiempo, transformación) del acero 22MnB5 [2]

En este diagrama se observa que, si la temperatura inicial es de 900°C, la velocidad de enfriamiento mínima para obtener una estructura de martensita al 100% es de 27K/s, y se obtendrá una dureza de 470 Vickers. Si la velocidad de enfriamiento es menor a este valor crítico, se observa que aparecerán otras fases además de la martensítica; a una velocidad de 0,2K/s, la martensita constituirá solamente el 50% de la estructura cristalográfica, y se obtendrá una dureza de 150 Vickers. Por otro lado, si la velocidad de enfriamiento es mayor a la mínima requerida, se observa que se obtiene un sensible incremento en la dureza; a 100K/s, la dureza alcanza los 475HV.

Así mismo, como ya se ha comentado, tanto el tiempo como la temperatura de austenización son factores importantes a la hora de diseñar el sistema de calentamiento de la pieza. Esto es debido a que, para obtener una estructura completamente martensítica, en primer lugar, es necesario que la estructura inicial de la chapa sea completamente austenítica. A continuación, se muestra una gráfica que relaciona la temperatura máxima alcanzada, con el tiempo de permanencia a dicha temperatura para obtener una estructura completamente austenítica.

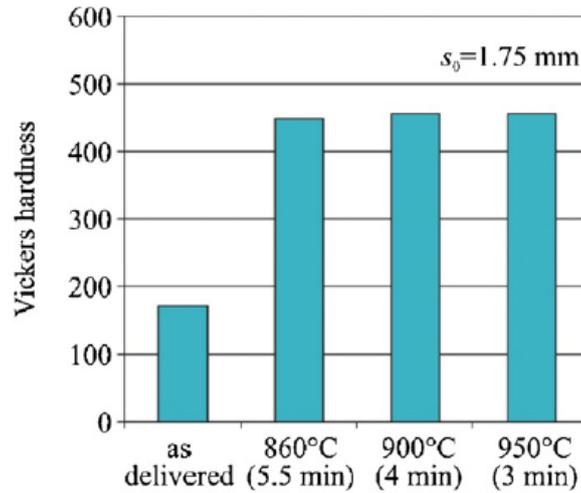


Imagen 9. Relación entre dureza y el tiempo y temperatura de austenización [2]

Finalmente, resulta importante destacar que cuanto mayor es el espesor de la chapa, más tiempo será necesario para obtener una distribución homogénea de temperaturas a lo largo de su espesor. A continuación, se muestra una gráfica que relaciona el tiempo que debe mantenerse la chapa a temperatura constante, en función de su espesor, para obtener una estructura austenítica homogénea en su interior:

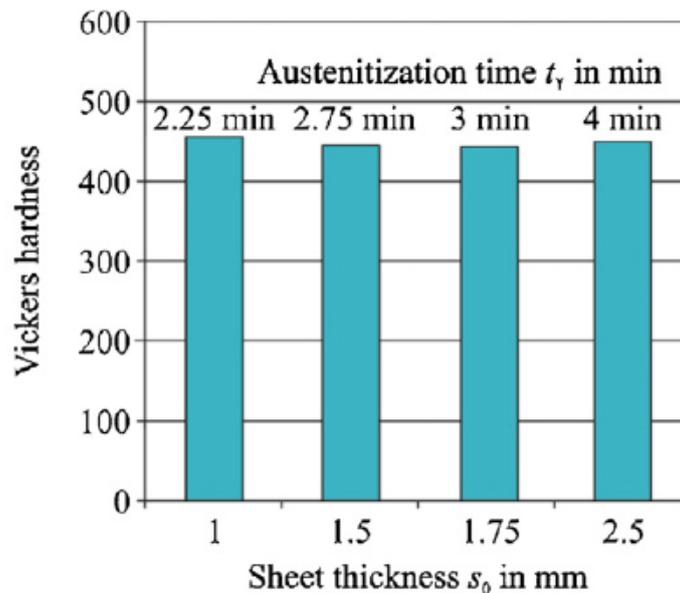


Imagen 10. Relación entre el espesor y tiempo de calentamiento necesarios para obtener una dureza determinada [2]

7.2.2 Sistemas de calentamiento de chapa

A día de hoy, se emplean tres métodos diferentes para calentar las chapas:

- Horno de rodillos
- Conducción
- Inducción

7.2.2.1 Horno de rodillos

Se trata de un horno de gran longitud, unos 30 o 40 metros, donde la chapa entra por un extremo y sale por el extremo opuesto. La chapa se calienta por convección mientras avanza por medio de unos rodillos a lo largo del horno.

A día de hoy, es la alternativa más empleada, pero, ante el aumento de la demanda que está experimentando el sector, se trata de una alternativa cada vez menos viable. Esto debido a que es un proceso lento y requiere de naves industriales de gran longitud para poder albergar el horno.

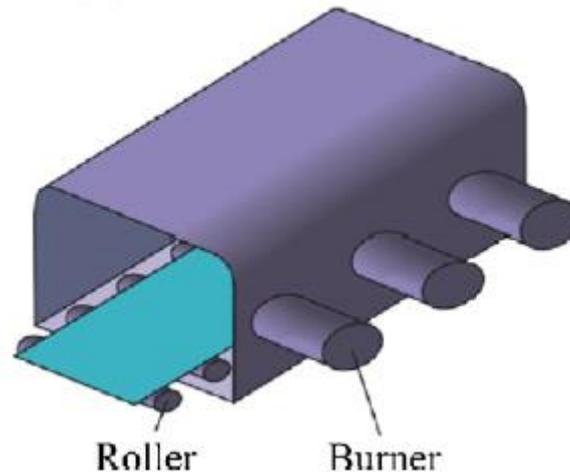


Imagen 11. Calentamiento de la chapa mediante horno de rodillos [2]

7.2.2.2 Electrodo

Esta técnica se basa en la ley de Joule, de acuerdo a la cual, el calor generado es proporcional a la potencia del circuito eléctrico. En este caso, la chapa se conecta entre sus extremos a dos electrodos a través de los cuales se hace circular una corriente de alta intensidad. Así pues, debido a que el material presenta una resistencia al paso de la corriente, tenderá a calentarse como consecuencia de las pérdidas generadas en el circuito; del mismo modo, este calor se propaga a través de la chapa por medio de conducción.

Sin embargo, este método presenta dos desventajas. Por un lado, la resistencia eléctrica de un componente es directamente proporcional a su longitud, e inversamente proporcional a su sección. Por ello, este método será más eficiente para calentar piezas de gran esbeltez, es decir, que sean mucho más largas que el área de su sección. Por otro lado, resulta complicado obtener una temperatura homogénea a lo largo de toda la pieza, por lo que, como ya se ha visto, esto resulta un problema a la hora de obtener la estructura cristalográfica deseada.

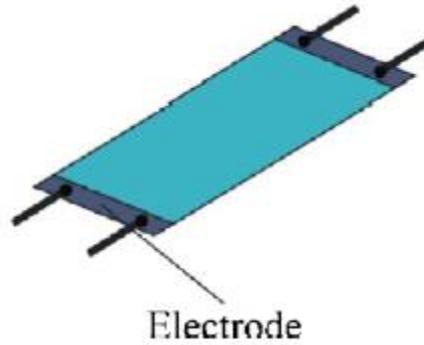


Imagen 12. Calentamiento de la chapa mediante electrodos [2]

7.2.2.3 Inducción

Este tercer método consiste en generar corrientes eléctricas en la chapa de acero por medio de una bobina de inducción, provocando de este modo el calentamiento de la chapa. Así pues, la temperatura alcanzada dependerá del campo magnético generado en la bobina, así como la distancia entre la bobina y la chapa y del propio material a calentar. La principal ventaja que presenta este método frente al uso de hornos con rodillos, es que se consigue una eficiencia térmica casi dos veces superior.

Sin embargo, la desventaja del método es que el calor generado en la chapa se concentra en las zonas más cercanas a la bobina, lo que puede provocar elevados gradientes térmicos que lleguen incluso a dañarla.

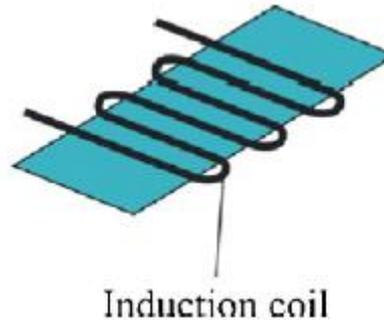


Imagen 13. Calentamiento de la chapa mediante bobina de inducción [2]

7.2.3 Transferencia de calor por conducción

A continuación, se recogen los aspectos básicos referentes a la transferencia de calor y que afectan directamente al modelizado del proceso de estampación en caliente. La información se ha recogido de la referencia bibliográfica [4].

7.2.3.1 Ley de Fourier de la conducción de calor

La transferencia de calor por conducción puede definirse como la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre dichas partículas. Así pues, la conducción puede darse entre los sólidos, líquidos o gases.

La razón o velocidad de transferencia de calor, \dot{Q}_{cond} , puede calcularse mediante la ley de Fourier de la conducción de calor:

$$\dot{Q}_{Conducción} = -kA \frac{dT}{dx} \quad [1]$$

Donde:

- $\dot{Q}_{Conducción}$ [W]: razón de transferencia de calor
- k [W/m*K]: Conductividad térmica
- A [m²]: Área de transferencia de calor
- $\frac{dT}{dx}$ [K/m]: gradiente de temperatura

La conductividad térmica es una propiedad del material y expresa la capacidad de este para conducir el calor. Así mismo, a partir de esta expresión, puede deducirse la ley general de la conducción de calor:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad [2]$$

Donde:

- \dot{e}_{gen} : término fuente; es decir, este término considera la generación de calor en el sistema
- ρ [kg/m³]: densidad del material
- c_p [J/kg*K]: calor específico del material a presión constante
- ρc_p [J/Km³]: capacidad calorífica del material
- α [m²/s]: difusividad térmica del material. Es una propiedad del material, y expresa la velocidad a la que se propaga el calor a través de este. Su valor se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad [3]$$

En el caso particular en el que la temperatura del sistema sea constante a lo largo del tiempo, es decir, en estado estacionario del sistema, se cumple que $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$.

7.2.3.2 Resistencia térmica por contacto

En una situación teórica ideal, dos sólidos que se encuentren juntos, contactarán a lo largo de toda la superficie común. Bajo esta hipótesis se cumple que la temperatura de ambos sólidos es la misma en la zona de contacto.

Sin embargo, en la realidad, debido a que los cuerpos tienen superficies rugosas, el contacto entre sólidos ocurre solamente a través de pequeñas zonas puntuales; los huecos a través de los que no se produce un contacto, quedarán rellenos por aire. Así pues, debido a que el aire tiene una conductividad térmica muy baja, se genera una resistencia térmica que provoca un gradiente térmico entre las dos superficies en contacto.

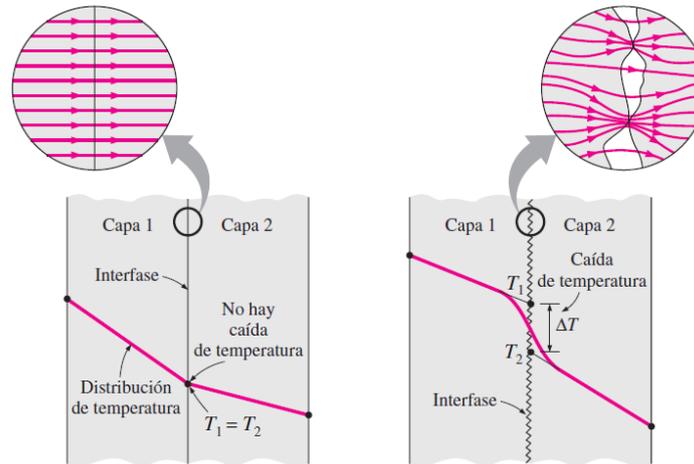


Imagen 14. Variación de temperatura a lo largo de dos superficies en contacto y líneas de transmisión de calor. Contacto térmico ideal o teórico (izquierda). Contacto térmico real (derecha)

Para caracterizar la resistencia a la transferencia de calor por contacto, se emplea la ley de Newton del enfriamiento:

$$\dot{Q}_{Contacto} = h_c * A * \Delta T_{Interfase} \quad [4]$$

Donde:

- $\dot{Q}_{Contacto}$ [W]: razón de transferencia de calor a través de la zona de contacto
- A [m²]: superficie teórica de contacto
- $\Delta T_{Interfase}$ [K]: variación de temperatura en la zona de contacto
- h_c [W/m²K]: conductancia térmica por contacto. Representa la facilidad con la que se produce la transferencia de contacto entre las dos superficies. Su valor es igual a la inversa de la resistencia a la transferencia de calor por contacto, R_c :

$$R_c = \frac{1}{h_c} \quad [5]$$

Normalmente, la resistencia térmica por contacto oscila entre $0,5 * 10^{-3}$ y $5 * 10^{-6}$ m²K/W. Del mismo modo, la influencia de esta resistencia térmica en la transferencia global de calor será mayor cuanto mejor sea la conductividad térmica de los materiales base que se encuentran en contacto. Es decir, si se ponen en contacto dos láminas de cobre, el efecto de la resistencia térmica será significativamente más importante que al poner en contacto dos materiales aislantes.

Finalmente, cabe destacar que el valor de la resistencia térmica por contacto no es un valor constante, ya que depende, entre otros, de la presión ejercida en el contacto, así como de la rugosidad superficial.

Cabe destacar que, a pesar de que la resistencia térmica puede afectar de forma significativa a los resultados de un modelo térmico, resulta un parámetro sumamente complejo de estimar. A día de hoy, el método más sencillo es obtenerlo de forma experimental [5] [6], aunque también se han desarrollado algunos modelos matemáticos basados en, por ejemplo, la rugosidad de la pieza [7].

7.2.4 Transferencia de calor por convección

7.2.4.1 Ley de Newton del enfriamiento

La convección es el modo de transferencia de calor entre la superficie de un sólido y un fluido adyacente que se encuentre en movimiento. Así pues, la transferencia de calor por convección puede ser de dos tipos:

- Convección forzada: el fluido es forzado a moverse
- Convección natural: ocurre cuando el movimiento de fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas en el propio fluido como consecuencia de las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura del fluido

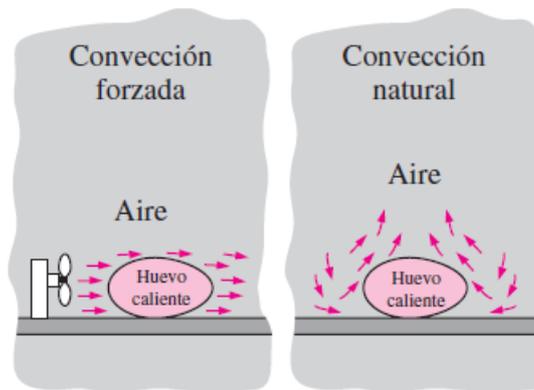


Imagen 15. Convección forzada y natural

En el caso particular en el que el fluido en contacto con la superficie estuviese quieto, se trataría de un método de transferencia de calor por conducción.

La transferencia de calor por convección puede expresarse por medio de la ley de Newton del enfriamiento:

$$\dot{Q}_{Convección} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad [6]$$

Donde:

- $\dot{Q}_{Convección}$ [W]: razón de transferencia de calor por convección
- h [W/m²K]: coeficiente de transferencia de calor por convección
- A_s [m²]: superficie a través de la cual se produce de la transferencia de calor
- T_s [K]: temperatura de la superficie
- T_{∞} [K]: temperatura del fluido a una distancia lo suficientemente alejada de la superficie

Si bien esta expresión es aparentemente sencilla, determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección es una tarea sumamente compleja. Esto es debido a que no es una propiedad intrínseca del fluido, ya que depende, entre otros, de la viscosidad dinámica μ , conductividad térmica k , densidad ρ , calor específico c_p o velocidad del fluido. Del mismo modo, otros parámetros que también afectan a la transferencia de calor son la configuración geométrica y aspereza de la superficie, la capa límite o si el flujo es turbulento o laminar.

Así pues, dada la dificultad del cálculo del parámetro del coeficiente de transferencia de calor por convección, se han desarrollado diferentes métodos para estimar su valor, basados en los números adimensionales: número de Reynolds, Prandtl y Nusselt para convección forzada, y números de Grashof, Prandtl, Rayleigh y Nusselt para convección natural.

7.2.4.2 Número de Reynolds

Relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas dentro de un fluido y sirve para conocer si este se encuentra en régimen turbulento o laminar. Para flujo interno, como es el caso de los conductos de enfriamiento empleados en los troqueles de estampación en caliente, este número se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{V * D_h}{\nu} \quad [7]$$

Donde:

- V [m/s]: velocidad media del fluido a través del conducto
- D_h [m]: longitud característica; para flujo interno corresponde con el diámetro hidráulico. Este, a su vez se calcula mediante la siguiente expresión (siendo r [m] el radio de los conductos de enfriamiento):

$$D_h = 4 * \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro mojado}} = 4 * \frac{\pi r^2}{2 * \pi r} \rightarrow D_h = 2r \quad [8]$$

- ν [m²/s]: viscosidad cinemática. Su relación la viscosidad dinámica es la siguiente (donde μ es la viscosidad dinámica [kg/ms] y ρ la densidad [kg/m³] del fluido):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [9]$$

7.2.4.3 Número de Prandtl

Relaciona la velocidad de difusión de momento con la velocidad de difusión de calor (difusividad térmica). Para un fluido dado, cuando menor sea este número, más rápido podrá transferir calor en comparación con otro fluido de mayor Número de Prandtl.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{k/\rho c_p} \rightarrow Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad [10]$$

Donde:

- ν [m²/s]: viscosidad cinemática
- μ [kg/ms]: viscosidad dinámica
- α [m²/s]: difusividad térmica
- ρ [kg/m³]: densidad
- k [W/m*K]: Conductividad térmica
- c_p [J/kg*K]: calor específico a presión constante

7.2.4.4 Número de Grashof

Relaciona las fuerzas de flotación con las fuerzas viscosas que actúan en un fluido. Este número se emplea en el cálculo del coeficiente de convección natural, y donde se expresa del siguiente modo:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^3} \quad [11]$$

Donde:

- g [m/s^2]: aceleración de la gravedad
- β [$1/K$]: coeficiente de expansión volumétrica
- T_s [K]: temperatura de la superficie
- T_∞ [K]: temperatura del fluido a una distancia lo suficientemente alejada de la superficie
- L_c [m]: longitud característica

7.2.4.5 Número de Rayleigh

El número de Rayleigh es igual al producto de los números adimensionales de Grashof y Prandtl y está relacionado con la transferencia de calor en el interior de un fluido. Se emplea en el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección natural y se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Ra = Gr * Pr \quad [12]$$

Donde:

- Gr : Número de Grashof
- Pr : Número de Prandtl

7.2.4.6 Número de Nusselt

Relaciona la transmisión de calor por convección con la de conducción. Este se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Nu = \frac{\dot{Q}_{Convección}}{\dot{Q}_{Conducción}} = \frac{h * \Delta L}{k} \quad [13]$$

Donde:

- h [W/m^2K]: coeficiente de transferencia de calor por convección
- ΔL [m]: longitud característica
- k [$W/m*K$]: Conductividad térmica

Adicionalmente, existen correlaciones para casos particulares, que permiten obtener el número de Nusselt como función de otros números adimensionales. De este modo, a partir de estas relaciones, puede estimarse el coeficiente de convección.

En el caso de flujo interno turbulento desarrollado, el cual corresponde con el comportamiento del fluido por el interior de los conductos de enfriamiento, las expresiones más empleadas para el cálculo del número de Nusselt en convección forzada son las de Dittus & Boelter y la de Sieder & Tate. Estas relaciones se muestran a continuación.

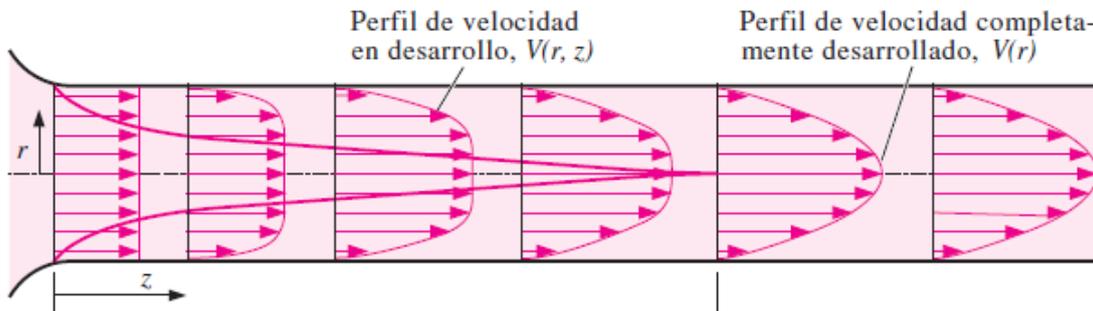


Imagen 16. Desarrollo del flujo a lo largo de un tubo circular

- Dittus & Boelter

$$Nu = 0,023 * Re_D^{0,8} * Pr^n \quad [14]$$

Donde:

- o Nu: número de Nusselt
- o Re_D : número de Reynolds considerando como longitud característica el diámetro hidráulico
- o Pr: número de Prandtl
- o n: exponente que toma el valor de 0,3 cuando el fluido se enfría y el valor de 0,4 cuando se calienta

Esta expresión es válida para los rangos de $L/D > 10$, $Re_D > 10000$ y $0,7 < Pr < 160$

- Sieder & Tate

$$Nu = 0,027 * Re^{0,8} * Pr^{0,33} * \left(\frac{\mu}{\mu_0}\right)^{0,14} \quad [15]$$

Donde:

- o μ [kg/ms]: viscosidad dinámica evaluada a la temperatura del fluido
- o μ_0 [kg/ms]: viscosidad dinámica evaluada a la temperatura de la pared

Su rango de aplicación es válido para los rangos de $Re_D > 10000$ y $0,7 < Pr < 16700$.

Así pues, si bien estas expresiones son ampliamente utilizadas, hay situaciones en las que llegan a presentar importantes errores con respecto a valores experimentales. Por ello, surge la necesidad de emplear expresiones más complejas, como la correlación de Gnielsinki [8]:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) * (Re - 1000) * Pr}{1 + 12,7 * \left(Pr^{2/3} - 1\right) * \sqrt{f/8}} * \left[1 + \left(\frac{D}{L}\right)^{2/3}\right] * c_t \quad [16]$$

Donde:

- D [m]: diámetro del conducto
- L [m]: longitud del conducto

- c_t : coeficiente de corrección para la temperatura del líquido. Depende del Pr_f y Pr_w (número de Prandtl a las temperaturas T_f y T_w respectivamente):

$$c_t = \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,01} \quad [17]$$

- f : Coeficiente de Drag de Darcy. Este coeficiente es el mismo que aparece en la ecuación de Darcy-Wisbach (ecuación empírica que relaciona la pérdida de carga de una tubería debida a la fricción con la velocidad del flujo del fluido; V [m/s] es la velocidad media del fluido, y g [m/s²] la aceleración de la gravedad).

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \quad [18]$$

El coeficiente f puede obtenerse a partir del ábaco de Moody o mediante la expresión de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad [19]$$

k/D es la rugosidad relativa de la superficie; para superficies de baja rugosidad o muy lisas, su valor es aproximadamente cero. Del mismo modo, se observa que esta es una expresión fuertemente no lineal, por lo que para despejar el valor de f es necesario recurrir a métodos numéricos, como el de Newton-Raphson. Como alternativa a esta expresión, algunos autores [8] indican que la siguiente expresión permite aproximar f para valores bajos:

$$f = [1,82 * \log_{10}(Re) - 1,64]^{-2} \quad [20]$$

En lo que respecta al coeficiente de convección natural, también existen otras relaciones empíricas para aproximar el número de Nusselt. Por ejemplo, el siguiente caso corresponde con el coeficiente de convección para una placa plana:

$$Nu = \left[0,825 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad [21]$$

7.2.5 Transferencia de calor por radiación

7.2.5.1 Ley de Stefan-Boltzmann

Es un mecanismo de transferencia por radiación electromagnética, por lo que, al contrario que la conducción y convección, puede propagarse a través del vacío, haciéndolo a la velocidad de la luz.

Todo sólido, líquido o gas que presente una temperatura superior al cero absoluto (cero absoluto $\rightarrow 0K=-273,15^\circ C$) emite calor por radiación. Es un fenómeno volumétrico, es decir, todos los átomos de un sistema se encuentran radiando. Sin embargo, en los sólidos opacos, como podría ser un metal, la radiación emitida por los átomos del interior del sólido se queda confinada en el interior de dicho sólido; de este modo, puede considerarse que un sólido opaco solamente radia calor a través de su superficie.

La razón máxima a la que se puede emitir radiación a una temperatura termodinámica T desde una superficie se expresa mediante la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{Q}_{Radiación\ CN} = \sigma A_s T_s^4 \quad [22]$$

Donde:

- $\dot{Q}_{Radiación\ CN}$ [W]: transferencia de calor por radiación de un cuerpo negro
- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴. Constante de Stefan-Boltzmann
- A_s [m²]: superficie a través de la que se emite la radiación
- T_s [K]: temperatura termodinámica

El cuerpo teórico que es capaz de emitir radiación a este ritmo, se le conoce como cuerpo negro. Una superficie real emitirá radiación a una razón de:

$$\dot{Q}_{Radiación} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad [23]$$

Donde:

- ε : emisividad de la superficie. Su valor depende, entre otros, del material, y su valor se encuentra en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$

Por otro lado, la absorptividad, α , es la fracción de energía de radiación incidente que un cuerpo es capaz de absorber. Al igual que la emisividad, el valor de la absorptividad se encuentra en el rango de $0 \leq \alpha \leq 1$, siendo el caso particular de $\alpha = 1$ el del cuerpo negro; es decir, un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente. La relación entre el calor incidente y el absorbido se expresa mediante la ley de Kirchoff:

$$\dot{Q}_{Absorbido} = \alpha \dot{Q}_{Incidente} \quad [24]$$

7.2.6 Métodos numéricos en la conducción de calor

Al plantear un problema de transferencia de calor, en el caso más general, se obtienen las ecuaciones diferenciales que rigen la transferencia de calor, así como unas condiciones de contorno, condiciones iniciales y un volumen de integración. Sin embargo, esta casuística solamente es resoluble analíticamente cuando el volumen de integración es sencillo; concretamente, en el caso tridimensional, es resoluble cuando el volumen de integración es hexaédrico, cilíndrico o esférico. Si el volumen de integración difiere de estas referencias matemáticas, no existe una resolución analítica exacta al problema, o si existe, será sumamente compleja.

En estos casos, existen dos vías para tratar de resolver el problema. Por un lado, el sistema físico real se puede simplificar a alguna de las situaciones en las que la ecuación tiene una solución analítica exacta; este sería el caso, por ejemplo, en el que se asume que un cuerpo de una geometría genérica, se puede aproximar a una esfera. Esta es una alternativa que permite obtener una respuesta rápida al problema, pero, normalmente, debido a la gran simplificación y su consecuente pérdida de información, los resultados no reflejan adecuadamente la realidad. Por otro, la segunda alternativa consiste en buscar una solución aproximada a la ecuación diferencial. De este modo, si bien no se va a encontrar la solución exacta a la ecuación, se obtendrá una solución aproximada, que normalmente reflejará mejor el comportamiento del sistema real. Las herramientas matemáticas que se emplean para obtener las soluciones aproximadas a las ecuaciones diferenciales son los métodos numéricos.

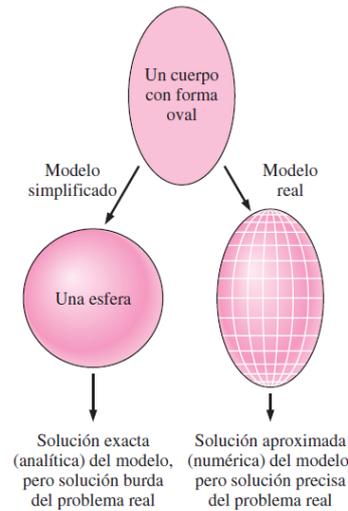


Imagen 17. Representación de la comparativa entre solución analítica y numérica

Estos métodos numéricos buscan transformar las ecuaciones diferenciales del sistema en ecuaciones algebraicas; los elementos diferenciales pasarán a ser diferencias. Para ello, los recursos matemáticos más empleados son el de las diferencias finitas o el desarrollo en serie de Taylor. Así mismo, al reemplazar los elementos diferenciales por diferencias, el método requiere realizar una discretización de las dimensiones espaciales; en los casos en los que el estado del sistema dependa del tiempo, también será necesario discretizar la dimensión temporal.

El conocido como método de los elementos finitos, consiste en discretizar el espacio en pequeñas regiones conocidas como elementos; estos elementos, en sus extremos tienen los denominados como nodos. Al conjunto de nodos y elementos se le denomina “malla”. Así pues, la ecuación diferencial se resolverá solamente en estos nodos y, en las zonas comprendidas entre estos, el valor de la ecuación se obtendrá por interpolación mediante funciones de interpolación.

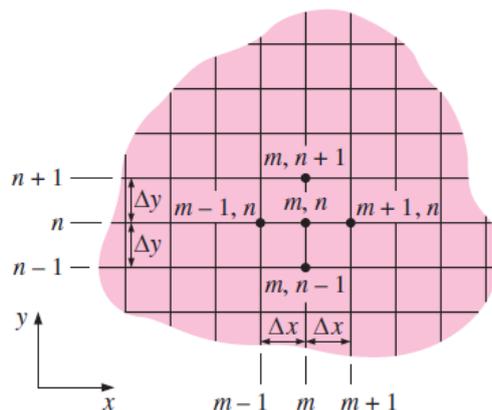


Imagen 18. Malla; discretización espacial

En este caso, para una malla de N nodos, el problema térmico del sistema se reduce a resolver un sistema de N ecuaciones con N incógnitas, siendo las incógnitas las temperaturas nodales. Para resolver dicho sistema se pueden emplear tanto métodos directos como métodos iterativos, siendo estos últimos los mayormente empleados por su menor coste computacional y de almacenamiento.

Así mismo, en los casos de simulaciones transitorias, por un lado, el sistema de ecuaciones deberá resolverse para cada instante de tiempo. Por otro lado, este campo deberá integrarse para conocer su estado en un instante posterior; es decir, se deberá calcular su propagación en el tiempo. En este caso, un aspecto a tener en cuenta es la estabilidad temporal, lo cual, a su vez, afectará a los métodos de resolución a emplear. Los métodos de integración explícitos son rápidos, pero condicionalmente estables y el error se propaga rápidamente en el tiempo si el incremento temporal no es lo suficientemente pequeño. Los métodos de integración implícitos, en cambio, son iterativos, pero son más estables que los explícitos, y pueden llegar a ser incondicionalmente estables.

7.3 Métodos computacionales

7.3.1 Redes Neuronales

Las redes neuronales son un conjunto de algoritmos cuya finalidad es la detección de patrones en un conjunto de datos. Así pues, el nombre que adoptan este conjunto de algoritmos, redes neuronales, se debe a que conceptualmente, se comportan como las neuronas humanas.

En una red neuronal, los datos se procesan, a lo largo de diferentes capas de neuronas. La primera capa, denotada como “Capa de entrada” o “*Input Layer*” es la que recibe el conjunto de datos inicial; la última capa, en cambio, conocida como “Capa de salida” o “*Output Layer*” es en la que se reciben los resultados tras el tratamiento de datos [9]. Entre la capa de entrada y la de salida se encuentran las “Capas ocultas” o “*Hidden Layers*”, y adoptan este nombre ya que la información que se procesa en ellas permanece oculta en todo momento; es decir, en las capas ocultas se encuentran los pasos intermedios en el tratamiento de los datos. Cuando la red neuronal está conformada por muchas capas ocultas, se denomina “Red Neuronal Profunda” o “*Deep Neural Network*”. Cada capa de la red está conformada por unos nodos denominados “Neuronas”; estos nodos, a su vez, están conectados a los nodos de la capa posterior y anterior.

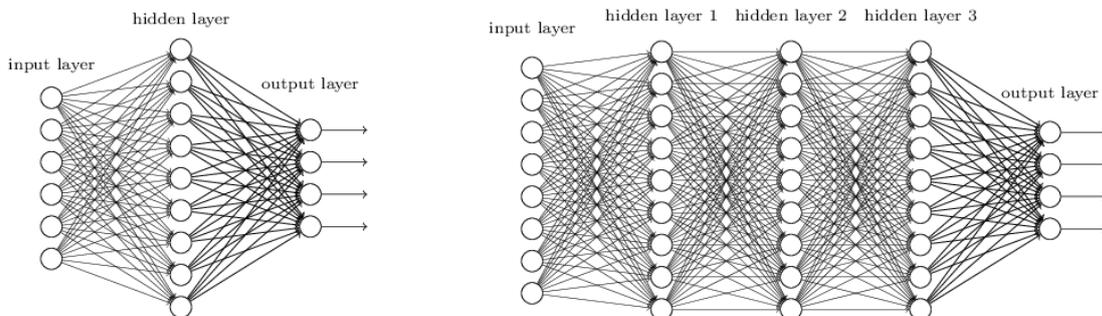


Imagen 19. Representación de una Red neuronal (izquierda); Red Neuronal Profunda (derecha)

Así pues, en la implementación más sencilla para este algoritmo, el parámetro de entrada que recibe una neurona a partir de la capa anterior, es una combinación lineal de los valores de las neuronas de la capa anterior. Para ello, el valor de salida de una neurona se multiplica por un factor de peso; posteriormente, todos estos valores se suman entre sí. Finalmente, el valor de entrada de una de la neurona será igual a esta suma anterior más una constante denominada “*bias*”. Es decir, el valor de entrada de una neurona se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$\eta = \sum_{i=1}^N \varpi_i * a_i + b \quad [25]$$

Donde

- η : valor de entrada de una neurona
- N: número de neuronas de la capa anterior
- ϖ_i : factor de peso entre la neurona “i” de la capa anterior y la neurona cuyo valor de entrada se quiere conocer
- a_i : parámetro de salida de la neurona “i” de la capa anterior
- b: constante “bias” de la neurona

Finalmente, el dato que recibe la neurona se transforma mediante una función, denominada como “función de activación”, en un nuevo valor; este valor, normalmente, quedará comprendido entre 0 y 1. Un ejemplo de función de activación empleada de forma habitual, es la función *sigmoide*, σ . Así pues, el valor de salida de una neurona será:

$$a_i = \sigma(\eta_i) : 0 < a_i < 1 \quad [26]$$

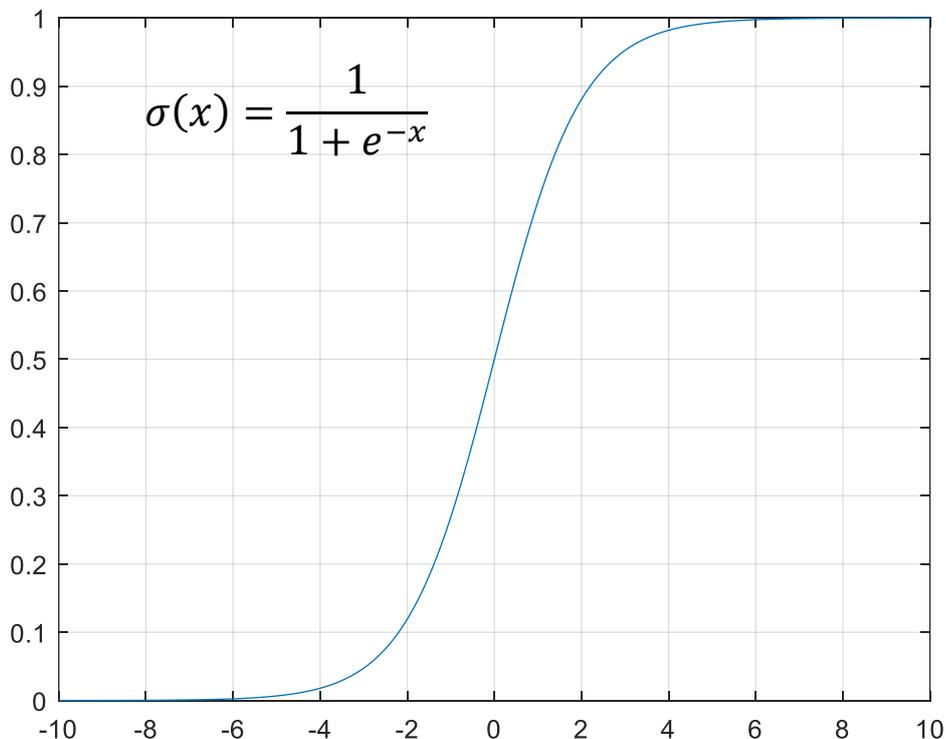


Gráfico 1. Función sigmoide

De este modo, capa tras capa, se realiza un tratamiento de los datos hasta obtener los resultados en la capa final. Así pues, un paso importante en el empleo de una red neuronal es el denominado como “entrenamiento”, y se emplea para ajustar los parámetros de peso y bias, de modo que el algoritmo represente correctamente aquello que se pretende modelar. Para ello, una de las estrategias seguidas es el “aprendizaje supervisado”. Esta consiste en, a partir de unos datos clasificados anteriormente, es decir, donde se conoce tanto el valor de entrada como el de salida que debería aportar la red neuronal, ajustar todos los parámetros de la red.

A día de hoy, estos algoritmos se encuentran en pleno desarrollo y con un crecimiento exponencial. Prácticamente, de forma mensual, aparecen nuevos y revolucionarios avances, y

su uso se encuentra cada vez más extendido, siendo empleadas, por ejemplo, en el campo “Aprendizaje automático” o “*Machine Learning*” o la “Inteligencia Artificial”. Sin embargo, este proyecto se limita a hacer uso de estos algoritmos; por dicho motivo, la información aportada al respecto resulta suficiente para poder seguir todos los conceptos que se desarrollan en este documento.

7.3.2 Algoritmos Evolutivos

Los algoritmos evolutivos son métodos de optimización, y al igual que las redes neuronales, están basados en la biología; en este caso, en la evolución. Existen diferentes tipos de algoritmos evolutivos, siendo uno de los más famosos los algoritmos genéticos. Concretamente, estos últimos son con los que se han trabajado a lo largo de este proyecto.

El objetivo de los algoritmos genéticos es resolver complejos problemas de optimización por medio de un proceso iterativo, donde, cada iteración es denominada “generación”. La primera fase de estos métodos se denomina “Inicialización”. En ella se parte de un conjunto de soluciones generadas por medio de procesos aleatorios o pseudoaleatorios. Cada una de estas soluciones estarán caracterizadas por unos parámetros conocidos como “genes”. Así pues, es importante garantizar que la población inicial se encuentre lo más dispersa posible para poder representar la mayor parte del espacio de trabajo. Planteando la analogía con un ser vivo, cada solución corresponde con un individuo de una especie, y cada parámetro definiría el código genético de dicho individuo [10].

En la siguiente fase, conocida como “Evaluación y selección” se comprueba la aptitud o idoneidad de cada una de las soluciones de las que se dispone. Es decir, se descartan las soluciones de peor calidad y se mantienen las mejores. El equivalente en la naturaleza de esta fase correspondería con la selección natural, donde la probabilidad de que los individuos con mejores genes prevalezcan es mayor.

Llegados a esta fase, se concluye con una iteración o generación del algoritmo, y se procede a generar los individuos de la siguiente generación. Para ello, los genes de los nuevos individuos se obtendrán a partir de los genes de los individuos supervivientes de la generación anterior. Es decir, corresponde con el proceso de natural de transmitir los genes entre progenitores y descendientes. Adicionalmente, en esta fase es habitual recurrir a la “mutación” o modificación aleatoria de alguno o algunos de los genes transmitidos. Esto evita que, a lo largo de las generaciones, desaparezcan la mayoría de los genes y solamente prevalezcan unos pocos. De este modo, se garantiza que, al llevar a cabo un proceso de optimización mediante un algoritmo genético se exploren diferentes zonas del dominio de optimización, y se evita que se centre únicamente en regiones muy localizadas. Por lo tanto, este es un algoritmo de optimización estocástico o no determinista. También se les denomina “algoritmos explorativos”, ya que permiten explorar diferentes zonas del dominio de optimización.

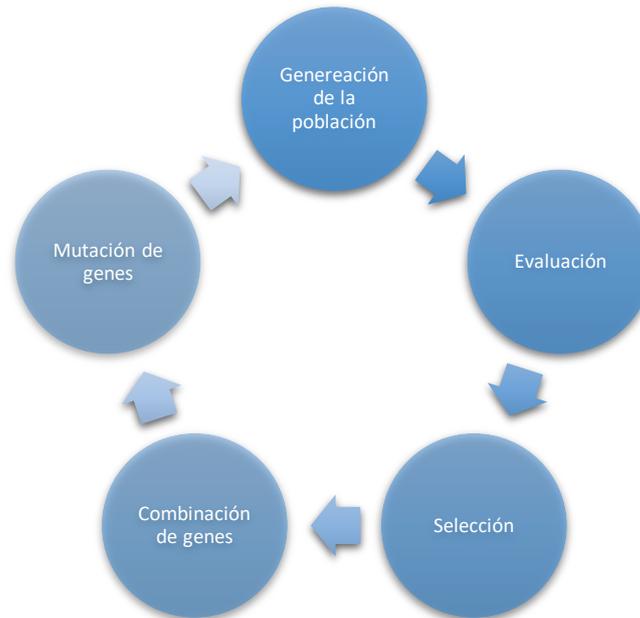


Imagen 20. Diagrama de flujo de un algoritmo genético

7.3.3 Sequential Quadratic Programming, SQP

El algoritmo SQP es un método iterativo para optimizaciones no lineales con restricciones. Al contrario que los algoritmos genéticos, el algoritmo SQP es un método de optimización determinista, es decir, no tiene una componente que dependa del azar. Esto implica que, si la función objetivo, restricciones y solución inicial son siempre las mismas, el resultado de optimización al que se llegará será también el mismo. Por este motivo, no es un método adecuado para la búsqueda de zonas de máximos locales; no permiten explorar el dominio de optimización en búsqueda de nuevas soluciones.

Sin embargo, la ventaja de este método reside en que, si la solución de partida se encuentra cerca de un máximo o mínimo local, el algoritmo SQP permite obtener las coordenadas de dicho extremo de la función con gran precisión. Por este motivo, son especialmente útiles cuando se combinan con otros métodos estocásticos, como los algoritmos genéticos. Esto es, en una primera etapa, con un ayuda de un método de optimización estocástico se detectan las zonas en las que se encuentran los extremos relativos de una función; posteriormente, mediante el empleo de un algoritmo determinista, estos extremos se calculan con un elevado nivel de precisión.

El método SQP se trata de una generalización del conocido método de Newton o Newton-Raphson. Así pues, mientras que en el método de Newton se linealiza la función por medio de su primera deriva, el método SQP realiza aproximaciones cuadráticas sucesivas de la función. Por este motivo, en este último caso, se requiere que la función a optimizar sea doblemente diferenciable. Así mismo, en el software de cálculo empleado en este proyecto se trabaja con una variación del método SQP, denominada NLPQL, de sus siglas en inglés, *“Nonlinear Programming by Quadratic Lagrangian”*.

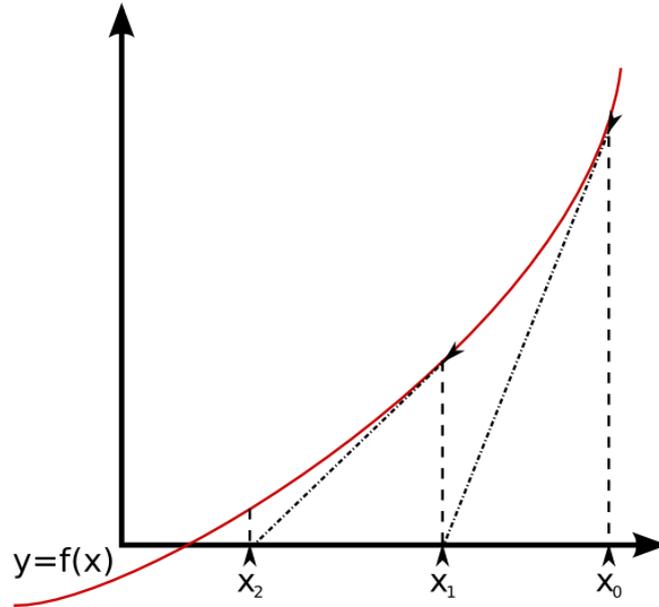


Imagen 21. Representación del método de Newton-Raphson

8 Análisis de alternativas

En lo que respecta al análisis de alternativas del proyecto, resulta importante analizar diferentes métodos que se podrían plantear para establecer la metodología de optimización de los conductos.

En este caso, la primera alternativa que se podría plantear sería confiar en la experiencia del propio diseñador; es decir, en este caso, se partiría de la premisa de que el encargado de diseño de los conductos dispone de una gran experiencia previa en este campo, de modo que, por intuición, fuese capaz de aportar una solución inicial de calidad. Así pues, si bien este puede ser el caso más rápido para obtener una solución, también es el que presenta los problemas más evidentes. Por un lado, resulta inmediato pensar que, si bien la intuición es una herramienta útil para enfrentarse a ciertos problemas, resulta ser insuficiente para resolver muchos de los problemas de ingeniería. Por este motivo, si se confía únicamente en la intuición del diseñador, se pueden obtener soluciones que, si bien aparentan ser de buena calidad, pueden estar alejadas de un óptimo global. Adicionalmente, otro gran problema que presenta tener una dependencia tan elevada en un trabajador experimentado es que, cuando este cause baja, o no se encuentre disponible, la empresa encargada del diseño de los troqueles afrontará una pérdida su conocimiento. Así mismo, debido a que la intuición se adquiere con años de experiencia, resulta complicado transmitir los conocimientos de cara al relevo generacional.

Como alternativa a esta situación, se presenta la búsqueda aleatoria de nuevas soluciones; por ejemplo, mediante el Método de Montecarlo. En este caso, se plantearían un número elevado de posibles soluciones con la ayuda de la generación de número aleatorios; cada una de estas soluciones correspondería con una configuración diferente de los conductos. Posteriormente, se comprobarían los resultados para cada solución, y se buscaría cual es la mejor. Sin embargo, este método presenta las ventajas e inconvenientes opuestos al caso anterior. Si bien una búsqueda aleatoria puede ser adecuada para llegar a una solución optimizada, al tener que evaluar un elevado número de posibles soluciones sin seguir ningún patrón, es un método computacionalmente ineficiente.

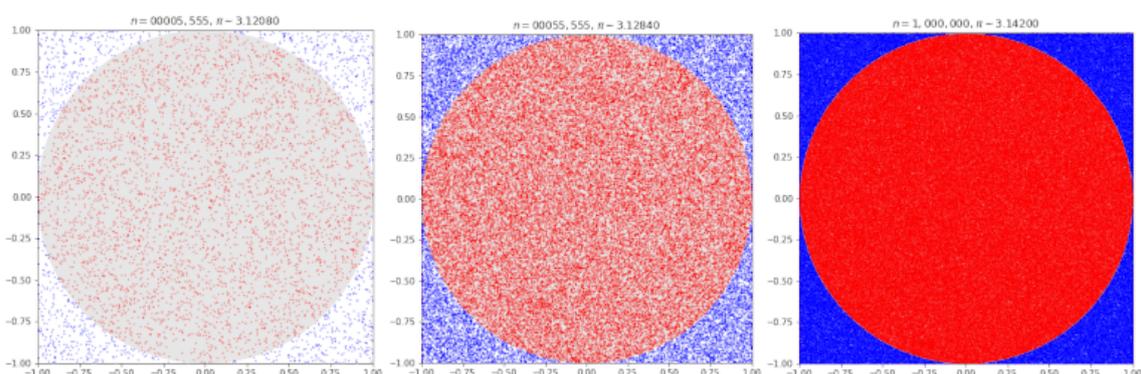


Imagen 22. Cálculo de π mediante el Método de Montecarlo

La eficiencia de la búsqueda aleatoria puede ser mejorada por medio del empleo de una búsqueda guiada; es decir, generar nuevas soluciones, y observar el efecto asociado a los cambios realizados. De este modo, tomando las mejores soluciones, y descartando el resto, se puede guiar la solución hacia un resultado óptimo. Así pues, la ventaja de este método reside

en la necesidad de evaluar la solución en un menor número de puntos, a costa de emplear un algoritmo de optimización más complejo.

Con todo ello, a modo de resumen, a continuación, se recogen en una tabla las virtudes y debilidades descritas en los párrafos anteriores para cada uno de los tres métodos propuestos. El valor 3 representa el método más ventajoso, mientras que el 1, el que menos; de este modo, se tiene que, cuanto mayor sea la puntuación total de un método, mayor es su aptitud.

Tabla 1. Evaluación de diferentes metodologías de búsqueda de soluciones

	Intuición	Búsqueda aleatoria	Optimización
Tiempo de cálculo	3	1	2
Experiencia previa	1	3	2
Calidad de resultados	1	2	3
Total	5	6	7

De acuerdo a este resumen, puede extraerse que la metodología propuesta en base a un proceso de optimización es favorable frente a la búsqueda aleatoria de soluciones, así como al diseño en base a la experiencia. Es decir, por un lado, una metodología de optimización es más rápida que la búsqueda aleatoria, ya que no se pierde tanto tiempo en evaluar soluciones de mala calidad. Por otro lado, en comparación con un diseño intuitivo, permite afinar con mucha mayor precisión los resultados, o incluso encontrar soluciones diferentes al problema.

9 Software

Para el desarrollo de este proyecto, los *softwares* o programas informáticos empleados han sido los siguientes:

- Catia V5
- Ansys
- Excel
- Matlab

9.1 CATIA V5

CATIA es un programa CAE (*“Computer Aided Engineering”*, Ingeniería Asistida por Computador) desarrollado por Dassault Systèmes.

El empleo de este software ha servido para generar las geometrías, tanto tridimensionales como bidimensionales, de los utillajes. Del mismo modo, se ha empleado para generar la geometría de los conductos de enfriamiento, una vez estos se han optimizado.



Imagen 23. Catia

9.2 Ansys

Ansys es un programa de simulación de ingeniería. La versión empleada ha sido Ansys Workbench 2020 R2.

Por un lado, este programa se ha empleado para modelar, mediante elementos, los problemas de transferencia de calor entre la chapa y los utillajes, y, por otro lado, se han empleado las herramientas de optimización de las que dispone el programa. Concretamente, se ha empleado el módulo *“Response Surface Optimization”*, el cual incluye los pasos de diseño de experimentos, metamodelos y optimización (ver Metodología de cálculo)



Imagen 24. Ansys

9.3 Microsoft Office Excel

Microsoft Office Excel resulta una herramienta idónea para recoger y trabajar con grandes volúmenes de datos. En este caso, dicho software se ha empleado para almacenar los resultados de las diferentes simulaciones realizadas mediante elementos finitos, así como para analizar dichos datos. Adicionalmente, las gráficas que se recogen a lo largo de este documento, se han generado mediante este programa.

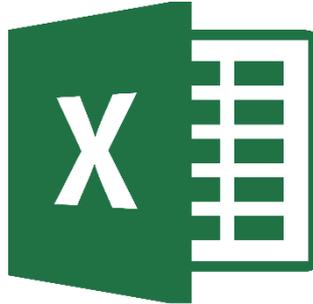


Imagen 25. Microsoft Office Excel

9.4 Matlab

Matlab es un programa y un lenguaje de programación interpretado, ampliamente utilizado en el ámbito técnico y científico. En este caso, la versión empleada de este software ha sido Matlab R2021a.

En este proyecto, Matlab se ha empleado para realizar un tratamiento de datos más avanzado, que, si bien podría haberse realizado mediante Excel, habría resultado una tarea más compleja. Un ejemplo del empleo de este software dentro del proyecto, es el desarrollo de un ejecutable que permite calcular el frente de Pareto para una optimización multiobjetivo.



Imagen 26. Matlab

10 Metodología de cálculo

10.1 Introducción

El objetivo de este proyecto consiste en establecer una metodología de aplicación generalista para el diseño de los conductos de refrigeración de los troqueles. Para ello, resulta importante que este procedimiento pueda ser aplicado independientemente de la geometría de los utillajes. Del mismo modo, si bien un ingeniero experimentado en el campo sería capaz de hacer un uso más eficiente de las herramientas, se busca que el método propuesto no dependa de la intuición del diseñador.

Todo ello implica definir las pertinentes herramientas de cálculo a emplear, así como un proceso para su uso, de modo que permita llegar a un resultado con la menor intervención posible por parte del diseñador. Así pues, si bien el papel del encargado de cálculo puede resultar importante a en el postprocesado de los resultados, se busca que las etapas intermedias de cálculo queden rigurosamente definidas por una metodología de índole estrictamente matemática.

De este modo, de cara a resolver el problema de optimización, queda descartado un procedimiento iterativo a base de prueba y error; es decir, ir tanteando la solución final en base a resultados de pruebas anteriores. Como alternativa, se hará uso de métodos computacionales; en este apartado se pretende explicar en qué consisten las diferentes etapas de este procedimiento, mientras que la solución y su análisis se tratarán en profundidad en apartados posteriores. Con todo ello, las fases de la metodología son las siguientes:

- Modelizado mediante elementos finitos, FEM
- Diseño de experimentos, DOE
- Algoritmos predictivos, metamodelos
- Optimización

Todas estas etapas se llevan a cabo en el software de ingeniería empleado, Ansys, ya que dispone de las herramientas necesarias para ello. Sin embargo, para el análisis de los datos obtenidos, se emplearán otras herramientas, como Microsoft Office Excel y Matlab. Así mismo en otras referencias [11] se emplea una metodología de cálculo similar, pero, sin embargo, en ellas no se estudian diferentes alternativas, como podría ser analizar qué algoritmo de optimización emplear. Del mismo modo, estos estudios previos se limitan a geometrías sencillas de los utillajes por lo que resultan difícilmente aplicables a casos reales. Por todo ello, el proyecto recogido en este documento, pretende mejorar esta metodología, analizando diferentes soluciones intermedias y ampliando su rango de aplicabilidad.

10.2 Modelizado mediante elementos finitos, FEM

La primera fase consiste en modelar el problema planteado mediante computador. Para ello, el paso consiste en generar las geometrías de los utillajes y chapa mediante CAD. En segundo lugar, debido a que el objetivo es optimizar la capacidad de enfriamiento de los troqueles, se debe modelar el problema de transferencia de calor desde la chapa hasta los conductos de enfriamiento. Para ello, se empleará un modelo de elementos finitos.

10.3 Definición del modelo de optimización

Una vez definido el modelo numérico de la transferencia de calor, deben establecerse los parámetros y el dominio de la optimización. Para ello, resulta necesario definir los siguientes puntos:

- Vector de variables de diseño: este contiene todos los parámetros que se quieren optimizar. En este caso, por ejemplo, el vector de variables de diseño debe contener el diámetro y posición de los conductos.
- Ecuaciones de restricción: son una serie de ecuaciones o inecuaciones que acotan el espacio de trabajo. Dichas ecuaciones sirven, por ejemplo, para establecer entre qué dos valores debe encontrarse el diámetro máximo y mínimo de los conductos.
- Función objetivo: es la función que se quiere maximizar o minimizar. Por ejemplo, en este caso, una función objetivo podría ser la temperatura máxima final de la chapa, la cual depende de la configuración geométrica de los conductos.

10.4 Diseño de experimentos, DOE

La fase de Diseño de Experimentos (DOE, "*Design Of Experiments*"), consiste en muestrear el espacio de trabajo, es decir, conocer cuál es la respuesta del sistema ante diferentes parámetros de entrada. En este caso, a la hora de realizar el muestreo se quiere conocer cuál es el campo térmico de los utillajes y de la chapa bajo diferentes configuraciones de los conductos de enfriamiento.

En un caso particular en el que solo haya una única variable de diseño, el DOE consiste en seleccionar diferentes valores que esta variable puede adoptar, y, posteriormente, obtener la respuesta del sistema. Al aumentar las dimensiones del problema a uno con N variables de diseño, a la hora de plantear el DOE, debe tenerse en cuenta, no sólo la influencia de cada parámetro por separado, sino, además, la posible interacción entre ellos.

El efecto de la interacción entre parámetros es especialmente importante en sistemas fuertemente acoplados. Por ejemplo, en los monoplazas de competición, la presión y temperatura de los neumáticos son dos parámetros que afectan significativamente al desempeño del vehículo. Así pues, a la hora de seleccionar la presión de los neumáticos, debe tenerse en cuenta la temperatura que se espera que estos alcancen en el circuito. En este caso, existe un acoplamiento entre estos dos parámetros, y modificar uno de ellos, afecta, de manera directa, al otro; están fuertemente acoplados. Volviendo al caso de la estampación en caliente, considerar la interacción entre parámetros implica, por ejemplo, analizarla los resultados al acercar o alejar los conductos entre sí.

En resumen, el DOE permite muestrear la hiper-superficie (superficie ampliada a un espacio de trabajo de dimensión N) de respuesta del sistema: a partir de los parámetros de entrada permite conocer la respuesta del sistema en puntos discretos.

10.5 Algoritmos predictivos, metamodelos

El paso posterior al diseño de experimentos es emplear un algoritmo de optimización de cara a buscar la solución óptima del problema. Así pues, estos procesos requieren conocer la expresión analítica de la función objetivo, o, en su defecto, calcular su valor en un elevado número de puntos discretos. Posteriormente, mediante una búsqueda guiada, por ejemplo, mediante el cálculo del gradiente, se procede a localizar los extremos relativos de la función. Del mismo modo, estos métodos suelen ser iterativos, por lo que precisan evaluar el valor de la función en un elevado número de puntos.

Sin embargo, en este caso no se conoce la expresión analítica de la función, y solamente se ha calculado su respuesta en los puntos discretos planteados en el DOE. Del mismo modo, cada punto adicional que se quiera conocer implica resolver su correspondiente modelo de elementos finitos.

Por este motivo, resulta computacionalmente ineficiente realizar la optimización sobre el modelo de elementos finitos; cada ejecución de este modelo puede tardar, en el mejor de los casos, varios segundos. Por lo tanto, si se deben resolver miles de puntos, el tiempo de cálculo total puede ascender rápidamente a los varios cientos de horas.

Como alternativa a evitar tener que resolver un modelo FEM a cada paso del algoritmo de optimización, se propone el empleo de los metamodelos, es decir, modelos a partir de modelos. En este caso, los metamodelos permiten modelizar o aproximar la respuesta del modelo de elementos finitos. De este modo, sirven para estimar el valor de la función objetivo en aquellos puntos en los que dicha función no ha sido previamente evaluada. La ventaja de estos metamodelos es que, el coste computacional de su ejecución, es decir, calcular la respuesta del sistema para una configuración dada de los conductos, es varios ordenes de magnitud inferior a la de elementos finitos. Esto implica que, en el tiempo que se requiere en resolver un único modelo FEM, pueden llevarse a cabo miles, o incluso millones, de ejecuciones del metamodelo.

En este caso, un metamodelo consiste en un algoritmo que permite predecir la salida del sistema a partir de la entrada, es decir, predecir el campo térmico a partir de la configuración de los conductos. Para ello, previamente es necesario llevar a cabo lo que se conoce como “entrenamiento” del algoritmo predictivo; esto, consiste en ajustar los parámetros del algoritmo para que su respuesta se ajuste a la del modelo de elementos finitos. Así pues, para poder realizar el entrenamiento es necesario conocer de antemano la entrada y salida del sistema en diferentes puntos de la superficie de respuesta. Para ello, los puntos empleados para el entrenamiento del metamodelo son los calculados en la fase del DOE.

Cabe destacar que el entrenamiento es la fase más importante a la hora de emplear un metamodelo, ya que esta afectará directamente a la calidad de las predicciones. Por ello, resulta importante que los puntos muestreados en el DOE representen lo mejor posible la superficie de optimización completa, y no se centren únicamente en pequeñas regiones. Aún y todo, los resultados obtenidos de los metamodelos siempre tendrán una mayor incertidumbre que los del modelo de elementos finitos. Esto implica que sea necesario recalcular mediante FEM algunos resultados intermedios o finales para poder afinar el cálculo.

10.6 Optimización

Esta es la etapa principal de la metodología propuesta, y consiste en detectar los extremos relativos de la función objetivo. Así pues, como ya se ha explicado, para esta fase, el modelo de elementos finitos queda en un segundo lugar, y se trabaja únicamente con la superficie de respuesta proporcionada por el metamodelo.

Adicionalmente, tal y como se explica en el siguiente apartado, la optimización a realizar es multiobjetivo, es decir, existe más de un parámetro a optimizar a la vez. Esto implica que es muy poco probable que exista una solución perfecta que destaque sobre el resto en todos los objetivos; en estas situaciones, lo habitual, es que existan algunas soluciones aventajadas en uno o varios parámetros, pero que, en cambio, empeoren en el resto de objetivos.

Por este motivo, en estos casos no se habla de “solución óptima” sino de “soluciones no dominadas”. El conjunto de soluciones no dominadas se obtiene por medio del frente de Pareto, el cual, puede definirse formalmente del siguiente modo para optimizaciones multiobjetivo: dado un conjunto de soluciones, P , una solución formará parte del frente de Pareto si no existe otra solución, que empeore al menos un objetivo.

En lo que respecta al proceso de optimización, este se lleva a cabo en dos etapas. En primer lugar, mediante un algoritmo de optimización estocástico o heurístico, se examina el espacio de trabajo completo en busca de zonas de extremos relativos. En una segunda etapa, mediante un algoritmo de optimización no heurístico o determinista, trabajando en las regiones detectadas en la primera fase de optimización, se buscan las zonas de máximos o mínimos locales con mayor precisión.

10.7 Criterio de selección de la configuración óptima

Tal y como se ha definido, en una optimización multiobjetivo no existe una solución óptima mejor que el resto; existen un conjunto de soluciones que pueden destacar en uno o varios de los objetivos, pero, en cambio, pueden resultar peores en el resto. Este conjunto de soluciones conforma el frente de Pareto, y, de acuerdo a los objetivos de optimización, todas ellas son igualmente válidas.

Sin embargo, hay situaciones en las que esto puede no ser cierto, y que efectivamente, alguna de las soluciones del frente de Pareto sí resulten ventajosas frente a otras soluciones del mismo frente. Para visualizar esta problemática que se plantea, en la siguiente imagen se muestra un frente de Pareto típico para una optimización de dos objetivos, donde se quiere minimizar ambas funciones, denotadas como “ x ” e “ y ”.

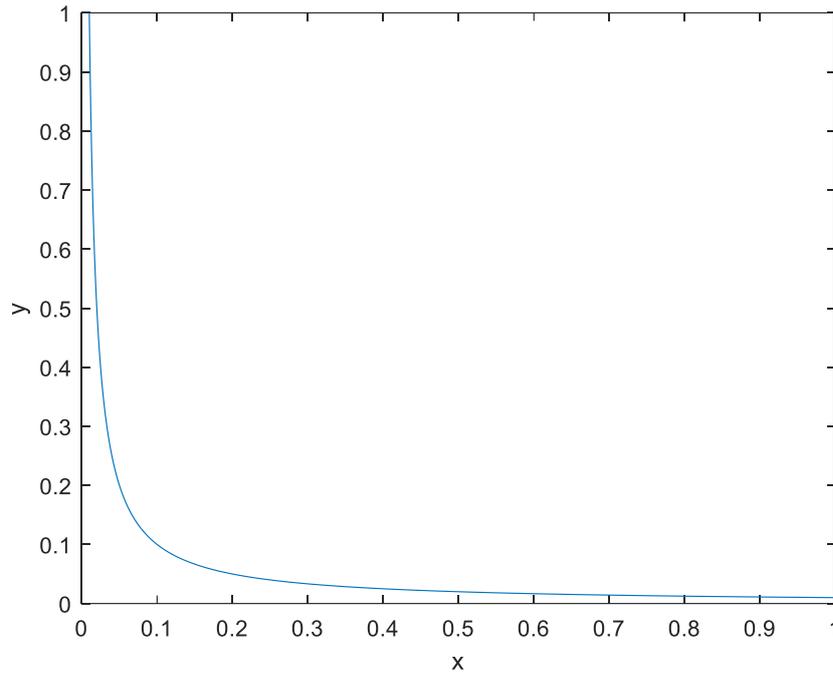


Imagen 27. Representación general de un frente de Pareto de una optimización de dos variables

Se observa que cuando ambos ejes tienden a infinito, la curva presenta dos asíntotas; una vertical y otra horizontal. Esto implica que, al acercarse a la asíntota, una gran variación en un eje provoca una variación mínima en el otro. Trasladando este concepto al frente de Pareto, cuando un parámetro tiende a la asíntota, dicho parámetro estará empeorando mucho a costa de mejorar muy poco el otro parámetro.

Por lo tanto, en el caso de buscar una solución balanceada, donde todos los parámetros tienen aproximadamente la misma importancia, las soluciones óptimas se encuentran en las zonas alejadas de las asíntotas, es decir, en las cercanías del origen de coordenadas. Partiendo de este criterio, se ha definido el siguiente método para seleccionar un único punto del frente de Pareto.

- 1- Normalizar todos los datos; es decir, transformar los puntos, de modo que, el valor máximo de cada función objetivo ($\max(FO_j)$) adopte el valor 1, y el mínimo ($\min(FO_j)$) el valor 0.

$$|FO_{ij}| = \frac{FO_{ij} - \max(FO_j)}{\max(FO_j) - \min(FO_j)} \quad [27]$$

Esta normalización se emplea para poder comparar entre sí parámetros de diferentes órdenes de magnitud. Es decir, por ejemplo, en el frente de Pareto se puede tener un parámetro, como la tensión principal máxima, cuyo orden de magnitud es de 10^2 , y otro, como el flujo de calor, con un orden de magnitud de 10^{-5} . Al calcular la distancia al origen de coordenadas de dicho punto, la distancia será del orden de 10^2 ; no dependerá prácticamente del flujo de calor. Por lo tanto, para dar la misma importancia a ambos parámetros, resulta importante igualar sus órdenes de magnitud.

- 2- Aquellos parámetros que se quieran maximizar, se calculará su valor complementario a 1. Es decir, suponiendo que se quiere maximizar el parámetro $|m|$, se deberá calcular el valor:

$$|\overline{m}_{ij}| = 1 - m_{ij} \quad [28]$$

Para los parámetros que se quieran minimizar este paso se omitirá. Este paso permite emplear el criterio de seleccionar el punto más cercano al origen, independientemente de que los objetivos de optimización sean maximizar o minimizar.

- 3- Calcular la distancia al origen de cada punto. En los valores a minimizar, interesa que los puntos sean lo menores posibles, es decir, que estén cerca de valer 0. En los valores a maximizar, en cambio, interesa que estén lo más próximos a 1 posible; sin embargo, tras aplicar el paso 2, se ha invertido este orden, y los valores a maximizar ahora también interesa que estén lo más cerca posible de 0. Por lo tanto, debido a que se busca que todos los objetivos estén cercanos al origen, el criterio de selección del punto óptimo es el de mínima norma: aquel punto que esté más cerca del origen será el punto que se selecciones del frente de Pareto. En este caso, para calcular la norma, se empleará la norma Euclídea:

$$p_{norm_i} = \left[\sum_{j=1}^{n_{parámetros}} \left(\frac{|p_{ij}|}{w_j} \right)^2 \right]^{1/2} \quad [29]$$

Donde w_j es un factor de peso; es decir, representa la importancia relativa de un objetivo con respecto al resto y debe ser establecido manualmente por el usuario.

Mediante este método, se consiguen resolver dos problemas. Por un lado, gracias a la normalización se logra comparar dos magnitudes de ordenes diferente. Por otro lado, tomar el valor óptimo del frente de Pareto como aquel de menor norma permite eliminar las soluciones denominadas como “injustas” o extremas. Es decir, aquellas que se encuentran en la asíntota, y que, por lo tanto, son soluciones de muy mala calidad en la mayoría de objetivos, pero que destacan ligeramente en alguno de ellos.

Para implementar este método, se ha desarrollado, mediante Matlab, un código propio. Este, por un lado, permite calcular todos los frentes de Pareto o isolíneas de una optimización. Es decir, una optimización tiene un único frente de Pareto; si se ocultan las soluciones de este frente, aparece un nuevo frente, en este caso, con soluciones de peor calidad a las del frente anterior. Por otro lado, dicho código permite trabajar con tantos objetivos a maximizar o minimizar como sea necesario. Finalmente, este código implemente la metodología desarrollada para la selección del punto óptimo de cada frente de Pareto.

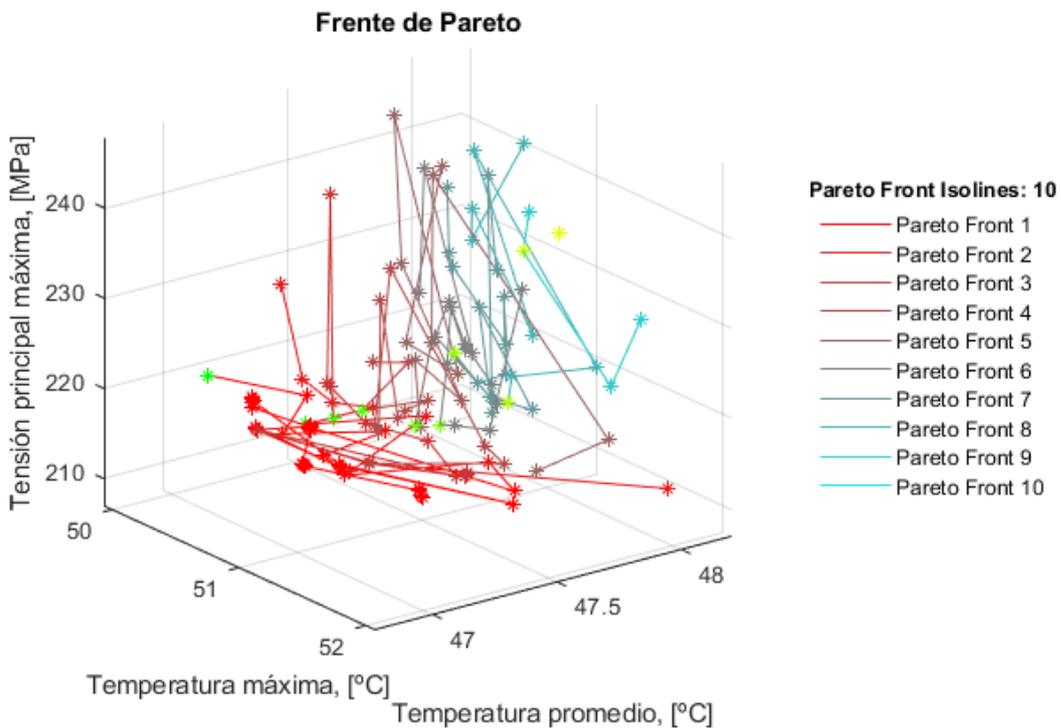
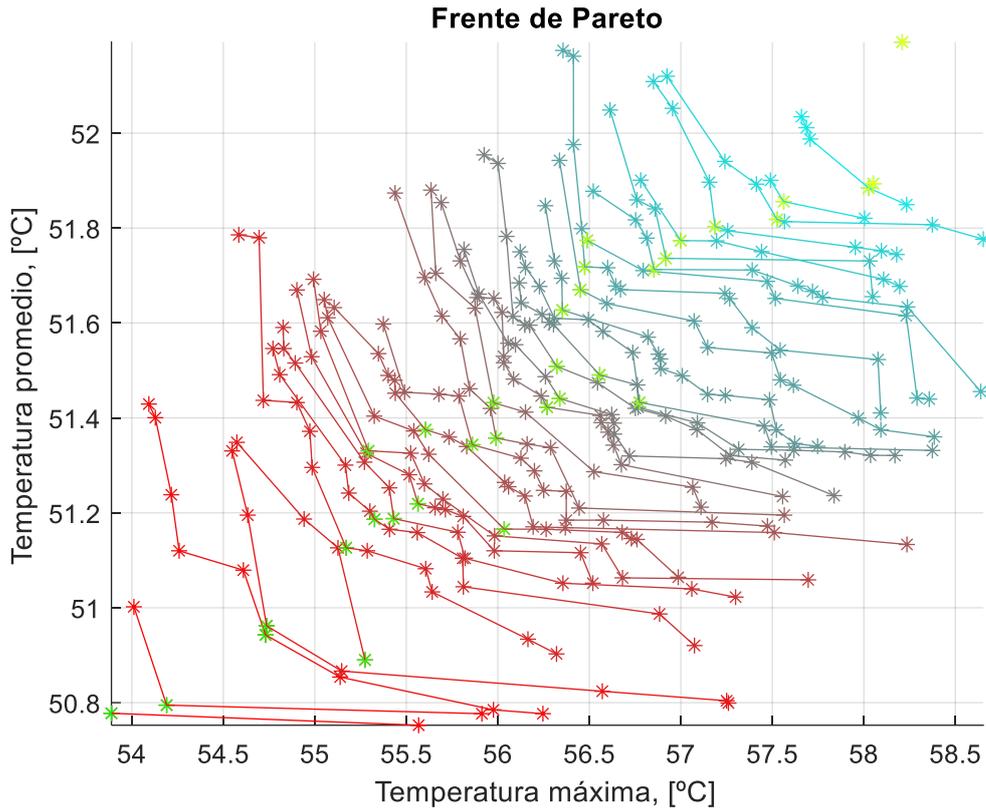


Imagen 28. Ejemplo de diferentes resultados aportados por el código desarrollado

11 Desarrollo de la solución

11.1 Geometría

Para realizar la investigación, resulta necesario trabajar sobre unos componentes que sirvan de referencia. Así pues, la geometría tridimensional del conjunto a estudiar consta de tres piezas:

- Azul: utillaje superior, punzón
- Rosa: chapa
- Verde: utillaje inferior, matriz

En lo que respecta a la geometría de la pieza a estampar, esta se trata de una simplificación de una sección del pilar B de un automóvil.

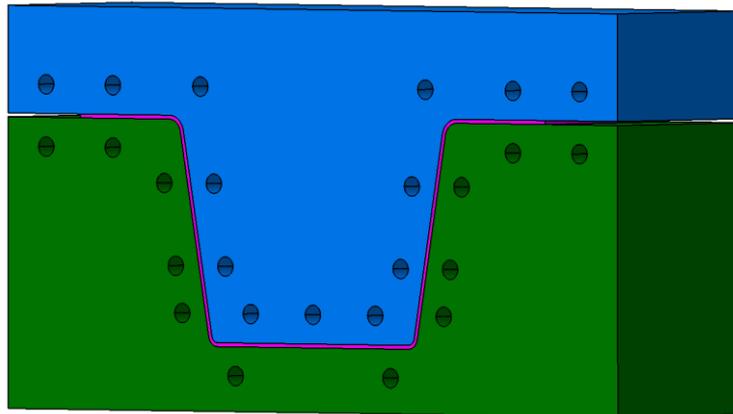


Imagen 29. Geometría CAD

La posición y diámetro de los conductos mostrados en esta imagen constituyen el punto de partida inicial de cara a realizar la optimización; es decir, podría denotarse como la iteración cero. A modo de referencia, en la siguiente imagen se recogen las dimensiones generales del modelo CAD de las piezas.

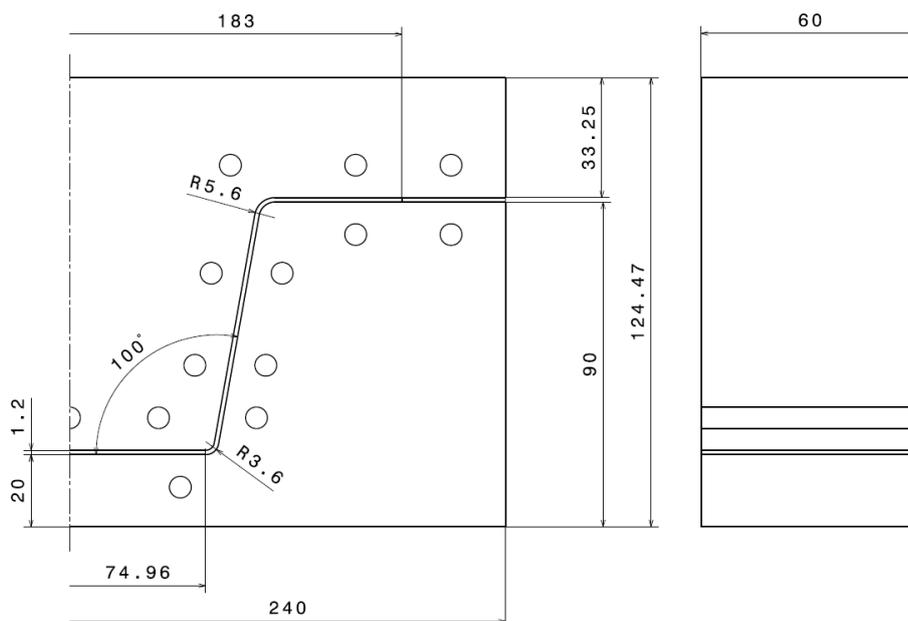


Imagen 30. Dimensiones de referencia de los utillajes y chapa

11.2 Modelización mediante elementos finitos, FEM

11.2.1 Definición de las propiedades de los materiales

El material considerado son dos aleaciones de acero ampliamente empleadas en el sector [1]. El material de la chapa es un acero al boro de alta resistencia, 22MnB5, de propiedades térmicas muy similares al Usibor 1500 de Acelormital; ambas son aleaciones de acero de alta resistencia y son las dos más empleadas en el sector de automoción. Concretamente, se emplean en las zonas del vehículo que requieren una mayor capacidad de absorción de energía, de modo que maximicen la garantía de seguridad de los ocupantes ante posibles colisiones.

En el caso de los utillajes, el acero empleado es el 4Cr5MoSiV1. Esta se trata de una aleación con una elevada conductividad térmica, especialmente importante de cara a una refrigeración eficiente.

Las propiedades térmicas para la aleación de los utillajes se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 2. Propiedades térmicas del acero de los utillajes, 4Cr5MoSiV1

Temperatura [K]	Temperatura [°C]	Densidad [kg/m ³]	Conductividad térmica [W/m K]	Calor específico [J/kg K]	Difusividad térmica [m ² /s]
298	25	7850	68	470	1,84E-05

Debido a que los utillajes tienen una conductividad térmica muy superior a la de la chapa y se encuentran directamente refrigerados por medio del agua de los conductos, la variación de temperatura que estos experimentan es del orden de decenas de grados. Por este motivo, se asume que las propiedades térmicas de este acero permanecen constantes a lo largo de la simulación; es decir, se supone que la variación de temperatura de los utillajes es lo suficientemente pequeña como para poder asumir que las propiedades térmicas del acero no varían a lo largo de la simulación.

En lo que respecta a la chapa, en cambio, esta sufre una gran variación térmica a lo largo de la simulación: en el instante inicial, la temperatura es superior a la de austenización, por encima de los 750°C, y se enfría hasta, aproximadamente, temperatura ambiente. Por ello, en este caso, debe considerarse que las propiedades térmicas del material de la chapa sí varían, siendo estas, función de la temperatura. Así pues, las propiedades térmicas consideradas para el acero al boro 22MnB5 son las siguientes:

Tabla 3. Propiedades térmicas del acero al boro 22MnB5

Temperatura [K]	Temperatura [°C]	Densidad [kg/m ³]	Conductividad térmica [W/m K]	Calor específico [J/kg K]	Difusividad térmica [m ² /s]
300	27	7757,4	43,47	519,18	1,08E-05
400	127	7722,3	40,7	543,45	9,70E-06
500	227	7684,7	37,67	570,3	8,60E-06
600	327	7644,5	34,63	599,31	7,56E-06
700	427	7601,6	31,66	630,23	6,61E-06
800	527	7616,7	23,92	694,1	4,52E-06

Cabe destacar que, para seleccionar estas propiedades térmicas se han contrastado diferentes fuentes y se han comparado los resultados con el Usibor 1500 [12], previamente mencionado. A continuación, se muestran dos gráficas comparativas, en las que se evidencian las similitudes entre ambos materiales.

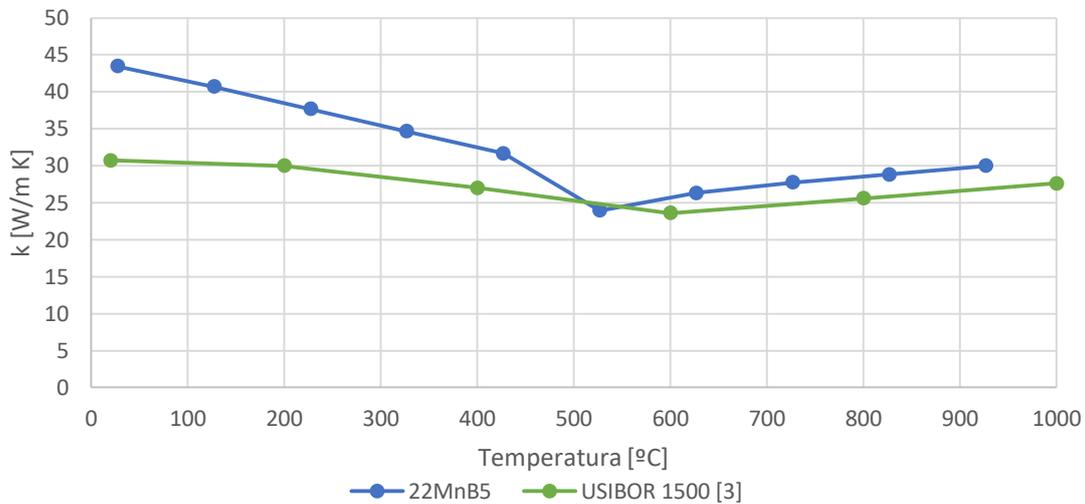


Gráfico 2. Comparativa entre aceros – Conductividad térmica

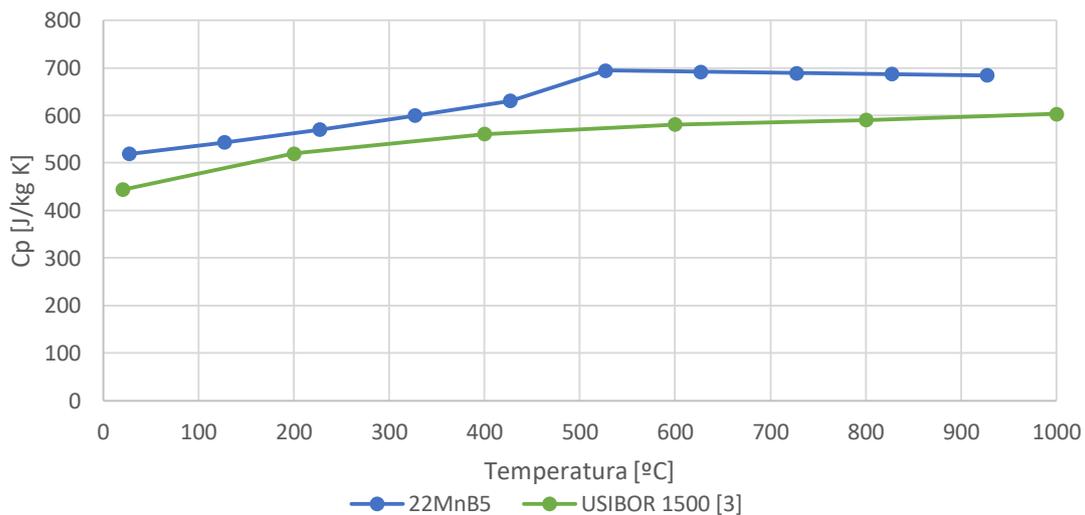


Gráfico 3. Comparativa entre aceros – Calor específico

11.2.2 Simetría del modelo

La geometría considerada en el apartado 11.1 presenta una simetría a ambos lados de la chapa. Por este motivo, se pueden realizar las siguientes suposiciones:

- El campo térmico del conjunto será idéntico en ambos lados del plano de simetría.
- Dos puntos separados por una distancia infinitesimal, estando cada uno a un lado del plano simetría, tendrán la misma temperatura. Así pues, debido a que no presentan gradiente térmico entre ellos, no podrá haber flujo térmico en la dirección normal al plano de simetría. Atendiendo a las ecuaciones de calor, esto se puede expresar del siguiente modo:

$$\dot{Q}_{\perp \text{plano simetría}} = 0 \quad [30]$$

De este modo, debido a que ambos lados del modelo tendrán los mismos resultados, se puede prescindir de uno de ellos sin perder información ni precisión en la simulación. Esto, sin embargo, reduce a la mitad el número de nodos del modelo, lo que implica una importante reducción en el coste computacional del cálculo.

11.2.3 Modelo bidimensional (2D) y tridimensional (3D)

Puede observarse que, a lo largo del eje de los conductos, todas las secciones de la geometría CAD son idénticas entre sí, por lo que, cabe esperar que el campo térmico sea idéntico a lo largo de todas ellas. Por este motivo, podría plantearse la posibilidad de realizar un modelo bidimensional, de modo que se pudiese reducir el coste computacional de este cálculo.

Sin embargo, en el caso de la geometría tridimensional, estas presentan dos particularidades que no pueden ser consideradas en una simulación bidimensional. Por un lado, cabría esperar que el líquido refrigerante se calentase por su paso a través de los utillajes, como consecuencia del calor que recibe. Así pues, para obtener un rango de la magnitud de este efecto, se puede realizar un cálculo manual preliminar, realizando las siguientes asunciones:

- Velocidad del fluido, $v=1$ m/s
- Calor específico del agua (líquido refrigerante), $c=4186$ J/kgK
- Densidad del agua, $\rho =1000$ kg/m³
- Los conductos son de $\varnothing=6$ mm y de L=60 mm de longitud

A partir de estos datos se puede calcular el flujo de calor por unidad de área que debe recibir un conducto en función de la variación de su temperatura.

$$\dot{Q} = \frac{mc\Delta T}{t} = \frac{\rho Vc\Delta T}{L/v} \rightarrow \dot{Q} = \frac{1000 * (\pi * 0,003^2 * 0,06) * 4186}{0,06/1} \Delta T \approx 118,4 * \Delta T [W] \quad [31]$$

Así pues, el flujo de calor en los conductos puede estimarse con ayuda de un modelo preliminar de elementos finitos. En la siguiente imagen se recoge el resultado de la distribución del flujo de calor máximo en el contorno de los conductos, pudiendo observarse que este alcanza los $5,5522 * 10^5$ W/m². El modelo de cálculo empleado es el mismo descrito en los siguientes apartados.

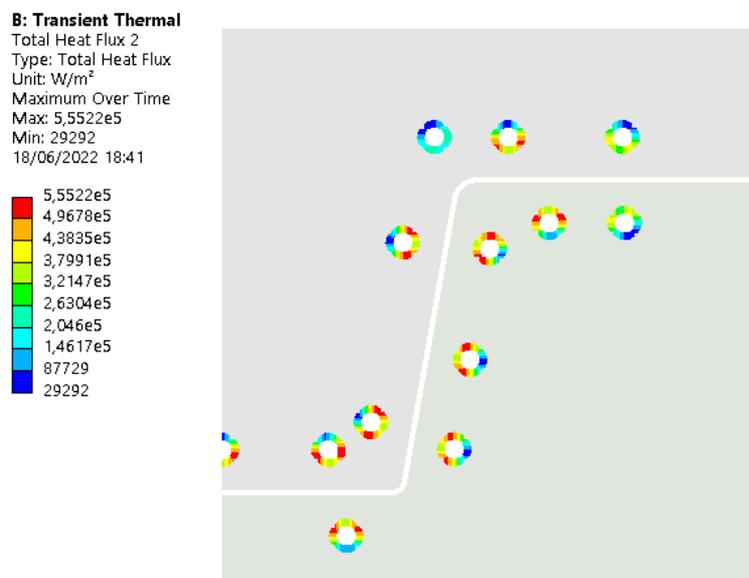


Imagen 31. Distribución de flujo de calor en el contorno de los conductos

Asumiendo que el flujo de calor en los conductos es homogéneo e igual al valor máximo mostrado en esta imagen, el calor que recibirá el agua a su paso por un conducto se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = \dot{q} * Superficie_{conducto} = 5,5522 * 10^5 * 2\pi * 0,003 * 0,06 = 627,9[W] \quad [32]$$

Igualando estas dos expresiones, se puede estimar el incremento de temperatura del agua de enfriamiento:

$$627,9 = 118,4\Delta T \rightarrow \Delta T = 5,3[^\circ C] \quad [33]$$

Se observa que la variación de temperatura es de 5,3°C, por lo que se puede asumir que tanto su densidad como su calor específico permanecen constantes. De este modo, se concluye que el efecto debido al calentamiento del agua a lo largo de los conductos es despreciable.

Por otro lado, un segundo efecto que no puede considerarse correctamente en una simulación bidimensional es que, en el caso tridimensional, la superficie expuesta al aire de los utillajes es mayor, de modo que pueden desalojar más calor al entorno por convección natural. Bajo esta premisa, se realizan dos modelos de elementos finitos, uno bidimensional y otro tridimensional, en el que se comparen, por un lado, los resultados (evolución del campo térmico en el modelo) y por otro, el coste computacional de ambos modelos. Para ello, en primer lugar, se calcula el coeficiente de convección natural de acuerdo a las referencias del punto 7.2.4.

Tabla 4. Cálculo del coeficiente de convección natural

Parámetro	Unidades	Valor
Aceleración de la gravedad	m/s ²	9,81
Coeficiente de expansión volumétrica	1/K	0,045
Temperatura superficie	K	900
Temperatura fluido alejado	K	295
Longitud característica	m	0,0012
Viscosidad dinámica	kg/(m s)	0,000018
Densidad	kg/m ³	1,2
Viscosidad cinemática	m ² /s	0,000015
Número de Grashoff		2177,20
Calor específico	J/(kg K)	1
Conductividad térmica	W/(m K)	0,02
Número de Prandtl		0,0009
Número de Rayleigh		1,96
Número de Nusselt		0,95
Coeficiente de convección natural	W/(m² K)	15,59

A continuación, se muestra una imagen en la que se recogen las condiciones de contorno del modelo tridimensional. Cabe destacar que, a excepción del coeficiente de convección natural, que en el caso tridimensional se ha aplicado en todas las caras expuestas al aire, tanto la malla como las condiciones de contorno empleadas son idénticas a las justificadas en puntos posteriores. Sin embargo, resulta necesario adelantar este resultado intermedio para poder justificar el resto de decisiones tomadas.

C: Transient Thermal
 Transient Thermal
 Time: 10, s
 19/06/2022 9:55

- T_Chapa: 900, °C
- Conveccion_Natural: Tabular Data, Tabular Data
- Refrigeracion_Conductos: 22, °C (step applied), 6,3823e-003 W/mm²·°C (step applied)

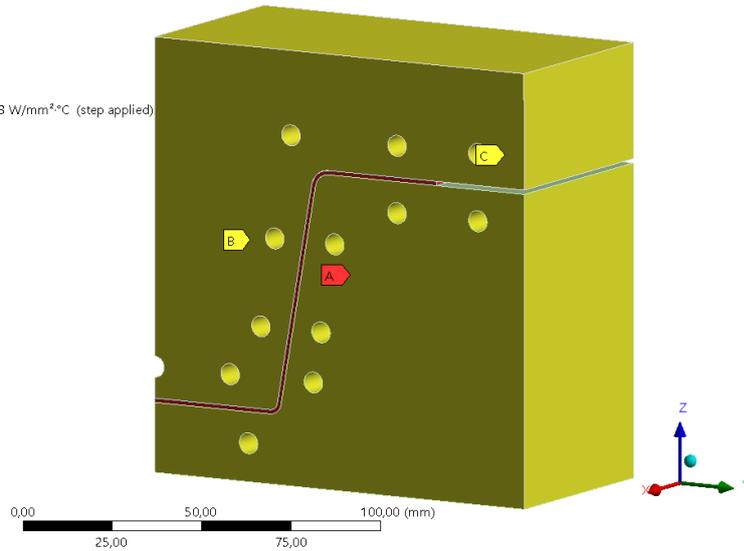


Imagen 32. Modelo de elementos finitos de la simulación tridimensional

Con todo ello, a continuación, se muestra la comparativa entre el modelo tridimensional y bidimensional.

Tabla 5. Comparativa del coste computacional entre un modelo en 2D y en 3D

Modelo	Bidimensional (2D)	Tridimensional (3D)	Diferencia (%)
Temperatura final chapa	56,63°C	56,64°C	+0,018
Número de elementos	8215	502083	+6012
Número de nodos	9100	1661076	+180154
Tiempo de cálculo, [s]	23	11160 (3h 06')	+48422
Almacenamiento, [MB]	171	33896 (33,1 GB)	+19722

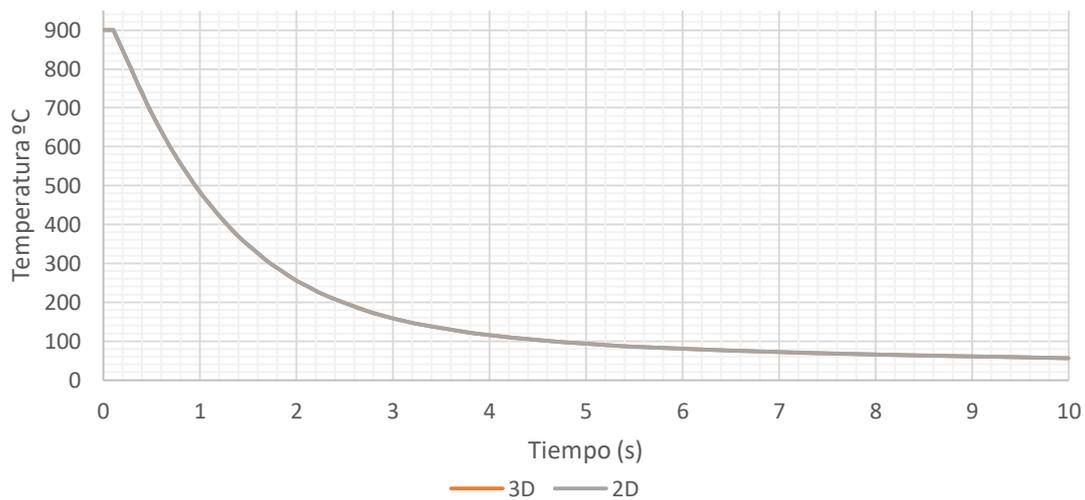


Gráfico 4. Comparación de la evolución de la evolución de temperatura máxima de la chapa en el caso 2D y 3D

A partir de esta comparación se observa que en ambos casos la evolución de la temperatura máxima de la chapa, es decir, unos de los parámetros que se tomará como referencia en la optimización, es idéntica tanto en la simulación bidimensional como tridimensional. Por lo tanto, se puede concluir que ambos modelos son igualmente válidos para representar el problema de transferencia de calor de la chapa.

Sin embargo, en lo que se refiere al coste computacional del cálculo, sí que existen importantes diferencias. A pesar de haber utilizado los mismos tamaños de elementos en el mallado de ambos modelos, en el caso tridimensional hay más de 1,6 millones de nodos, mientras que en el caso bidimensional no llegan a los diez mil. Esto se traduce directamente en el coste del cálculo, donde el modelo bidimensional puede resolverse varios ordenes de magnitud más rápido, siendo, por lo tanto, el modelo más conveniente para este caso.

Finalmente, tras realizar las simplificaciones de simetría y de caso bidimensional, la geometría a analizar resulta ser la siguiente:

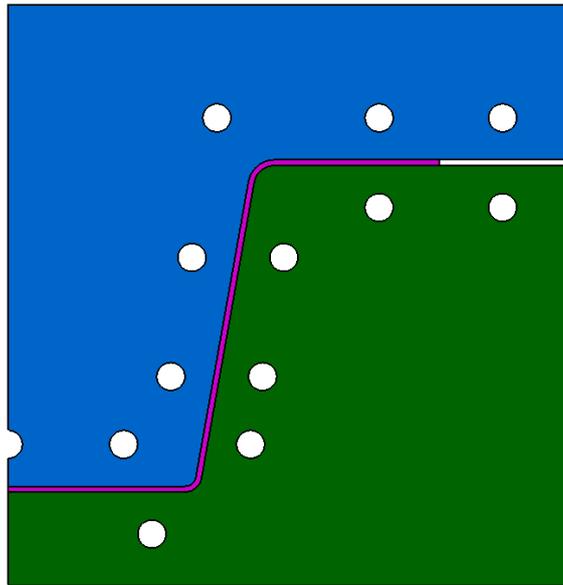


Imagen 33. Geometría simplificada a analizar

11.2.4 Tipo de simulación

El estudio que se está llevando a cabo, no solo se quiere analizar el campo térmico, sino que además se requiere estudiar su evolución a lo largo del tiempo. Es decir, debido a que se quiere optimizar la capacidad de enfriamiento de los conductos, una característica a estudiar es el tiempo que se necesita para reducir la temperatura de la chapa hasta un valor objetivo. Para ello, se requiere una simulación térmica de estado transitorio; una simulación de estado estacionario no depende del tiempo, y solamente permite calcular el campo térmico que se alcanza en la situación de equilibrio.

Por otro lado, resulta importante considerar si estudiando el campo de temperaturas es suficiente. Es decir, un proceso de estampación es un sistema altamente no lineal, donde el campo térmico y deformaciones están fuertemente acoplados: a medida que los utillajes se cierran, la chapa sufre grandes deformaciones plásticas, lo cual, a su vez, modifica las zonas de contacto entre la chapa y los utillajes. En última instancia, modificar el contacto entre piezas, afecta, a la transmisión de calor entre ellas. Adicionalmente, el campo térmico afecta a las propiedades mecánicas de los materiales.

Para analizar esta casuística, el proceso de estampación en caliente puede dividirse en dos etapas. La primera, la cual consiste en el cierre de la prensa, es la dominada por los fenómenos de deformación; es una fase de corta duración, desde unas décimas hasta unos pocos segundos, y es en la que se produce la deformación plástica de la chapa. La segunda fase, en cambio, está

predominada por los fenómenos de transferencia de calor: consiste en mantener los utillajes cerrados mientras se produce el enfriamiento y templado de la chapa, y tiene una duración de varios segundos. Por lo tanto, dada la corta duración del evento del cierre de la prensa, la mayor parte de la transferencia de calor se produce durante la segunda etapa.

Así pues, si bien no considerar el proceso de cierre de la prensa induce un cierto error en el campo térmico inicial de la fase de transferencia de calor, esto no resulta un grave problema a la hora de plantear la optimización de los conductos. Es decir, la fase de cierre de la prensa es tan rápida que apenas da tiempo a que se transfiera el calor de la chapa a los utillajes; por lo tanto, la eficiencia de la refrigeración no es efectiva durante esta etapa. Esto implica que el campo de temperaturas de la chapa al inicio de la segunda fase, la de enfriamiento, será el mismo, independientemente del diseño de los conductos. En cambio, en la fase de enfriamiento sí que predominan los fenómenos de transferencia de calor, y es la que se debe analizar con detalle para poder comparar la eficiencia de los diseños de los conductos.

Por lo tanto, puede concluirse que solamente resulta necesario modelar la fase de transferencia de calor, y se puede desprestigiar la etapa de cierre de la prensa; es decir, se puede prescindir de una simulación acoplada en la que se resuelvan el campo térmico y de deformaciones a la vez, ya que realizar un cálculo térmico es suficiente. Sin embargo, con objeto de analizar la diferencia en el coste computacional entre ambos modelos, se ha llevado una simulación acoplada; a continuación, se comparan los resultados en el coste computacional con los de una simulación térmica transitoria.

Tabla 6. Comparativa del coste computacional de un modelo térmico y uno acoplado

Modelo	Térmico	Acoplado	Diferencia (%)
Número de elementos	8215	22322	+172
Número de nodos	9100	17902	+96
Tiempo de cálculo, [s]	23	34260 (9h 31')	+148856
Almacenamiento, [MB]	170,94	80538,624 (78,651GB)	+47015

Cabe destacar que, debido a la no linealidad de los contactos, en el caso del modelo acoplado, para mejorar su convergencia, hace falta un mallado más denso en las zonas en contacto, así como un incremento de tiempo menor. Esto, unido al mayor número de grados de libertad que tiene cada nodo (ya que deben resolverse conjuntamente las ecuaciones de transferencia de calor y del campo de deformaciones), provoca que la simulación acoplada tenga un coste de cálculo desproporcionado. Debido a que en la fase del DOE es necesario resolver el modelo hasta varios cientos de veces, en el caso de emplear un modelo acoplado, esto podría requerir del orden de varios meses de tiempo de cálculo. Este resulta un coste inasumible, que provocaría que el método propuesto no fuese válido.

Por lo tanto, tras haber concluido que una simulación acoplada no aporta un aumento significativo en la precisión de los resultados, este modelo queda descartado. De este modo, se concluye que la forma óptima para modelar el problema es mediante un análisis térmico transitorio.

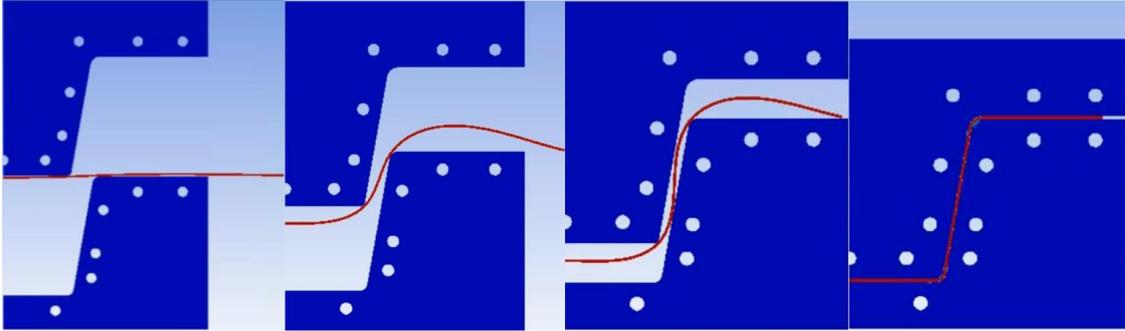


Imagen 34. Secuencia de la simulación acoplada

11.2.5 Condiciones iniciales

Al tratarse de una simulación en estado estacionario, además de establecerse las condiciones de contorno, también deben considerarse unas condiciones iniciales, es decir, el estado en el que se encuentra el sistema en el instante inicial.

En lo que respecta a la chapa, para que se produzca la transformación cristalográfica del acero durante el proceso de enfriamiento de la misma, debe garantizarse que su temperatura inicial es superior a la de austenización, es decir, por encima de los 750°C. Sin embargo, desde que la chapa sale del horno hasta que comienza el proceso de templado en la prensa, transcurre un breve lapso de tiempo a lo largo del cual la chapa presenta un enfriamiento no controlado. Por lo tanto, para evitar que su temperatura caiga por debajo de la de austenización, y garantizar así el templado, es común sobrecalentar la chapa hasta unos 850 o 950°C. En este caso, se ha decidido que la temperatura inicial de la chapa en la simulación sea de 900°C.

Por otro lado, establecer unas condiciones iniciales de temperatura en los utillajes resulta más complicado. Cuando la prensa se encuentra en una producción en serie, los utillajes, conformado tras conformado, se van calentando hasta alcanzar un estado de equilibrio entre el calor recibido por la chapa y el desalojado por los conductos. La temperatura que se alcanza en este estado de equilibrio no suele ser homogénea a lo largo de los utillajes y, para calcularla es necesario simular varios ciclos consecutivos, hasta llegar a obtener dicho estado estacionario. Sin embargo, realizar N ciclos para cada simulación multiplicaría por N el coste computacional del modelo DOE, lo cual resulta en un coste excesivo.

Para evitar el aumento en este coste, considerar una temperatura inicial homogénea de los utillajes resulta ser lo más conveniente. En este caso, se va a considerar que la temperatura inicial de los utillajes es de 22°C en todos los puntos, es decir temperatura ambiente. Esto sería el equivalente a realizar la primera estampación de una pieza tras haber tenido previamente la máquina parada durante horas.

Así pues, si bien esta simplificación introduce un pequeño error en cuantificar la capacidad de enfriamiento real del sistema, es suficiente para poder comparar diferentes configuraciones de los conductos, y descartar las menos convenientes. Sin embargo, tras obtener las configuraciones de los conductos óptimas, estas deberán evaluarse en un estado estacionario para calcular su verdadera capacidad de enfriamiento.

Para introducir las condiciones de contorno en Ansys existen dos alternativas diferentes.

- Alternativa 1: en un primer paso, calcular un modelo térmico estacionario de un paso de carga, en el que se impone, a cada sólido la temperatura inicial que deberá tener en el modelo transitorio. En segundo paso, se exportan los resultados de este modelo al térmico transitorio, y, en este se considerará el campo térmico inicial igual al importado del modelo estacionario.

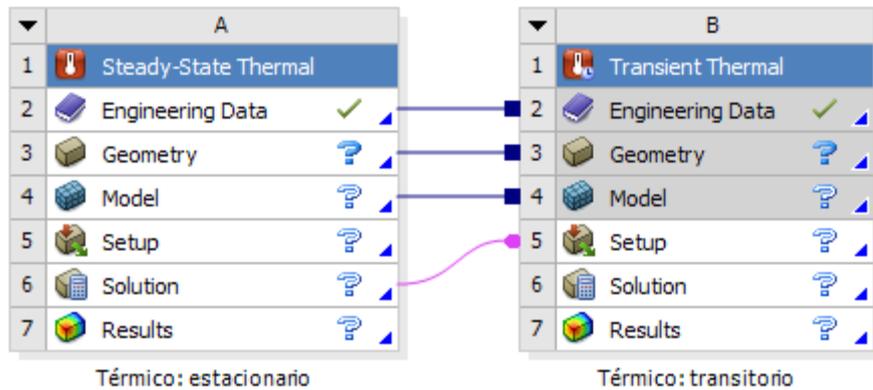


Imagen 35. Introducción de las condiciones iniciales en Ansys. Alternativa 1

- Alternativa 2: en este caso, solamente es necesario ejecutar un modelo térmico transitorio, desarrollado en dos pasos de carga. En el primero de ellos se fuerza cada sólido a tener la temperatura inicial requerida. En el segundo paso de carga, se desactivan las condiciones de temperatura impuestas en los sólidos, y se deja correr el modelo a partir de las temperaturas que había en el paso anterior.

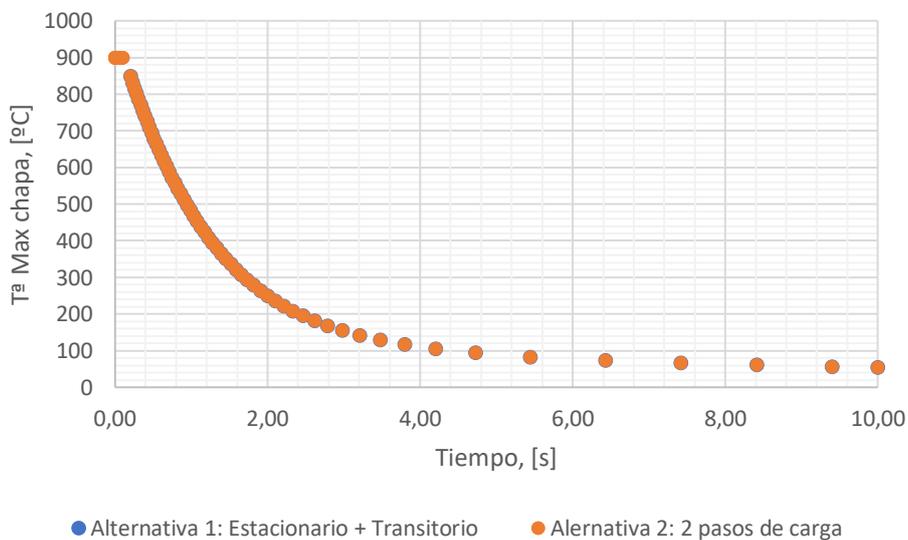


Gráfico 5. Comparativa entre métodos para establecer las condiciones iniciales

En esta gráfica se presenta la evolución de la temperatura máxima de la chapa a lo largo del proceso bajo las diferentes alternativas para establecer las condiciones iniciales. Se observa que ambos casos permiten obtener idénticos resultados. Sin embargo, en la alternativa 1, el proceso de transferir la información de un modelo al siguiente es menos eficiente que calcular dos pasos de carga consecutivos. Por este motivo, con objeto de reducir el coste computacional, se opta por emplear la alternativa 2.

B: Transient Thermal
 Temperature 2
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Time: 0,1
 Max: 900
 Min: 22
 30/04/2022 19:59

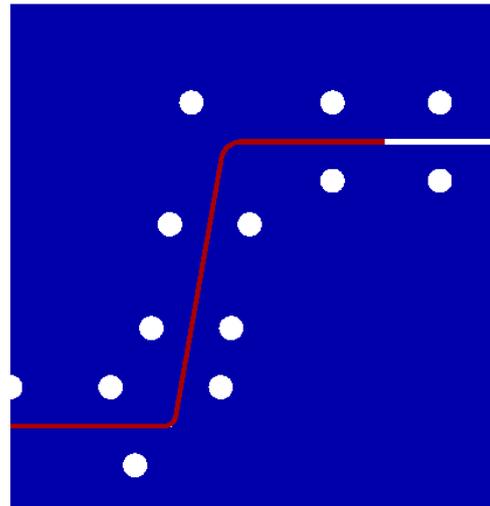
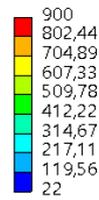


Imagen 36. Condiciones iniciales

De este modo, se tiene que la simulación a desarrollar consta de 2 pasos de carga. En el primero de ellos, con una duración de 0,1 segundos, se inicializa el campo térmico del modelo por medio de restringir la temperatura inicial de los componentes. En el segundo paso, se elimina la restricción de temperatura, y se deja correr el modelo hasta llegar a los 10 segundos de simulación, tiempo suficiente para que se produzca el enfriamiento de la chapa por debajo de la temperatura de austenización.

11.2.6 Condiciones de contorno y parámetros de la simulación

11.2.6.1 Coeficiente de transferencia de calor en la interfase

En un caso teórico ideal, la transferencia de calor de la chapa a los utillajes se produciría a lo largo de toda la superficie de contacto entre estos. Sin embargo, debido a que las superficies de ambos materiales no son perfectamente lisas, el contacto se produce en pequeñas zonas puntuales, mientras que, en las zonas intermedias, queda aire atrapado. Debido a que este aire es un mal conductor térmico, se producirá una resistencia a la transferencia de calor en la interfase entre ambas superficies.

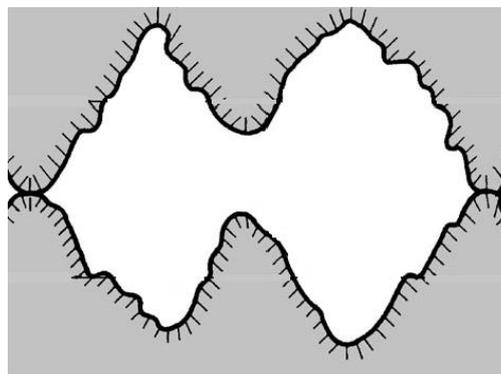


Imagen 37. Detalle de la interfase de contacto [7]

Este fenómeno se modeliza mediante el denominado como coeficiente de transferencia de calor en la interfase (IHTC, "Interphase Heat Transfer Coefficient"), tal y como se explica en el

punto Resistencia térmica por contacto. En la realidad, este parámetro no adopta un valor constante; depende, entre otros, de la rugosidad superficial y de la presión ejercida en el contacto. Aun así, debido a que se ha prescindido de realizar una simulación acoplada, no se puede calcular la presión en la zona de contacto, y, por lo tanto, no se puede expresar este parámetro en función de dicha presión de contacto. Sin embargo, existen numerosas referencias bibliográficas [5] [13] que han tratado de estimar el valor de este parámetro, así como han tratado de obtener un valor equivalente constante. A partir de estas referencias, puede concluirse que un valor adecuado, y, consecuentemente, el que se ha empleado en el proyecto, para el IHTC es el siguiente:

$$h_{htc} = 0,0025 \left[\frac{W}{mm^2 K} \right]$$

11.2.6.2 Refrigeración en los conductos

Cuando el agua fluye por el interior de los conductos de los troqueles, se produce una transferencia de calor por convección interna forzada. Por lo tanto, en dichos conductos se ha introducido una condición de contorno donde se ha supuesto que el líquido refrigerante, en este caso agua, fluye a una temperatura constante de 22°C, es decir, temperatura ambiente. Para estimar el coeficiente de convección se han empleado los números adimensionales de Reynolds, Prandtl y Nusselt, empleando la metodología explicada en el apartado Transferencia de calor por convección. Así mismo, el cálculo se ha realizado para conductos de diámetro 6 y 8mm.

Tabla 7. Coeficiente de convección

Parámetro	Unidades	Ø6 mm	Ø8 mm
Diámetro de los conductos	m	0,006	0,008
Velocidad del fluido	m/s	1	
Viscosidad dinámica	kg/(m s)	0,00089	
Densidad	kg/m ³	1000	
Diámetro hidráulico	m	0,008	
Caudal	m ³ /s	0,019	0,025
Viscosidad cinemática	m ² /s	8,94E-07	
Número de Reynolds		6711,4094	8948,54586
Calor específico	J/(kg K)	4186	
Conductividad térmica	W/(m K)	0,607	
Número de Prandtl		6,17	
Longitud de un conducto	m	0,06	
Factor de fricción de Darcy, f	-	0,032	
Coeficiente de corrección de T ^a	-	1	
Número de Nusselt		63,00	86,01
Coeficiente de convección forzada	W/(m ² K)	6373,71127	6526,20627

La velocidad del fluido refrigerante, depende directamente del circuito de refrigeración y de las bombas instaladas. Sin embargo, debido a que este aspecto queda fuera de los límites de trabajo, para seleccionar la velocidad del fluido se ha asumido que esta debe ser una potencia de 10. Bajo esta premisa, 0,1 m/s resulta excesivamente lento, y 10 m/s excesivamente rápido. De este modo, asumir que la velocidad del fluido es de 1m/s es el orden de magnitud más razonable.

Cabe destacar que, en este caso, resulta preferible emplear una condición de contorno en los conductos de convección en lugar de imponer directamente la temperatura del fluido

refrigerante. Esto es debido a que, al establecer una convección, se está acotando el flujo térmico máximo que son capaces de disipar los conductos. Este límite depende del gradiente de temperatura entre el refrigerante y la superficie metálica, así como de la velocidad del fluido (del coeficiente de convección). De este modo, se obtiene una situación en la que el refrigerante puede no llegar a ser capaz de evacuar el calor a la misma velocidad que le llega, de modo que se produciría un calentamiento en los utillajes.

En el hipotético caso de tener un coeficiente de convección prácticamente infinito o muy elevado, no existiría un límite superior en el flujo de calor que los conductos pueden disipar; todo el calor que llegara a los conductos sería inmediatamente desalojado. De este modo, al no haber un flujo neto de calor, los utillajes no se calentarían en la zona de los conductos, de modo que, la temperatura de estos sería la misma que la del líquido refrigerante. A partir de aquí, se puede concluir que, imponer una condición de contorno de temperatura en los conductos es equivalente a imponer una convección muy elevada, lo cual puede no ser realista y poco conservador, ya que se estaría asumiendo una capacidad de enfriamiento superior a la que realmente se dispone.

A continuación, se muestra una gráfica en la que se compara la temperatura máxima alcanzada en los utillajes en función de la condición de contorno de refrigeración impuesta. En ella se compara una condición de temperatura constante en los conductos, con la situación en la que se refrigera por medio de convección forzada con velocidad del fluido de 1 m/s. Adicionalmente, se incluyen las curvas para convección con velocidad del fluido de 10 y 100 m/s, valores exageradamente elevados, pero que demuestran que la condición de contorno de temperatura es análoga a tener un coeficiente de convección extremadamente alto.

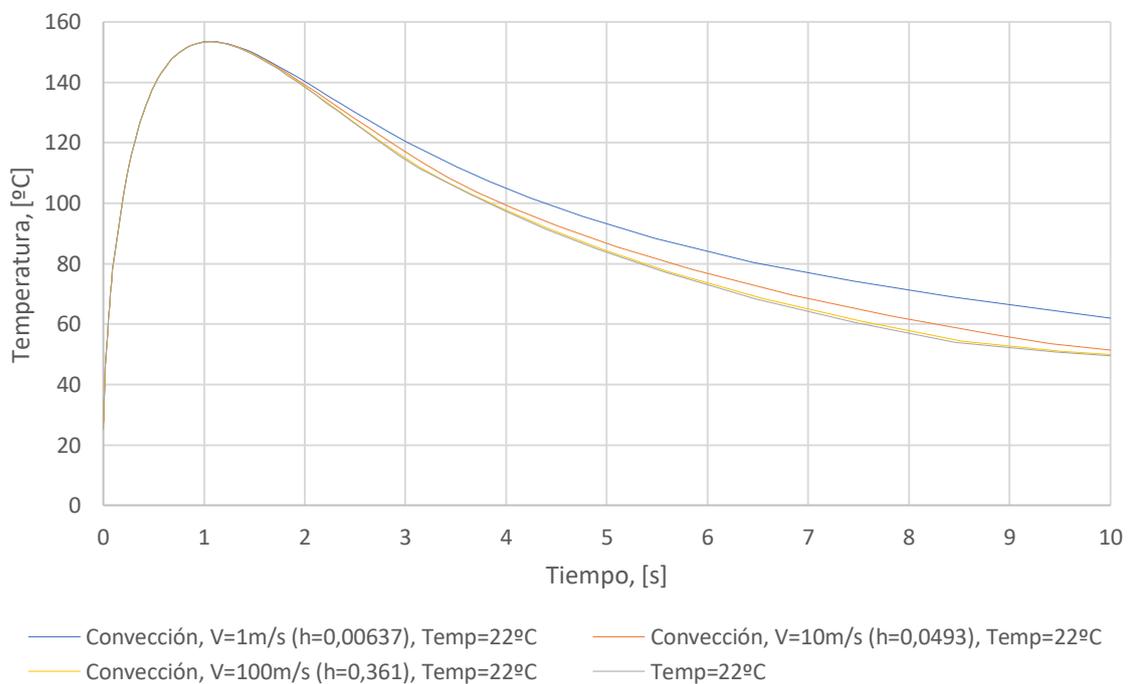


Gráfico 6. Comparación de la temperatura máxima de los utillajes en función de las diferentes condiciones de contorno de refrigeración

11.2.6.3 Simetría

Tal y como se ha explicado en el punto 11.2.2, aprovechando que el modelo es simétrico, solamente se va a simular uno de los dos lados. Por ello, se impone la condición de simetría: en el plano de simetría no puede existir flujo de calor en dirección normal a este.

11.2.7 Discretización espacial, mallado

En un modelo de elementos finitos, el proceso de discretización espacial o mallado, es un aspecto tan importante como establecer unas condiciones de contorno adecuadas, y por ello, debe prestarse especial atención en cómo se realiza.

Generalmente, un mallado más denso, con un tamaño de elemento menor, y empleando elementos de orden superior, conducen a resultados más precisos, pero, a su vez, implica un aumento en el coste de cálculo. Por lo tanto, el mallado ideal es aquel que permite tener el menor coste sin que ello afecte de forma significativa al resultado de la modelización. En lo que corresponde a este trabajo, debido a que en la fase de diseño de experimentos se va a resolver el modelo de elementos finitos un elevado número de veces, resulta especialmente importante cumplir con el objetivo de eficiencia de cálculo.

En primer lugar, cabe destacar que, para modelar correctamente la transferencia de calor, es recomendable emplear, como mínimo, tres elementos en las paredes más delgadas de la geometría. Esto implica que, debido a que la chapa tiene un espesor de 1,2mm, este componente debe mallarse con elementos de 0,4mm. Adicionalmente, en las caras de contacto de los utillajes con la chapa se debe emplear el mismo tamaño de elemento, lo cual permite que los nodos de la malla de los utillajes coincidan con los de la chapa. Partiendo de esta restricción, a continuación, se va a analizar si es necesario emplear elementos de primer o segundo orden, así como el tamaño de los elementos en los utillajes.

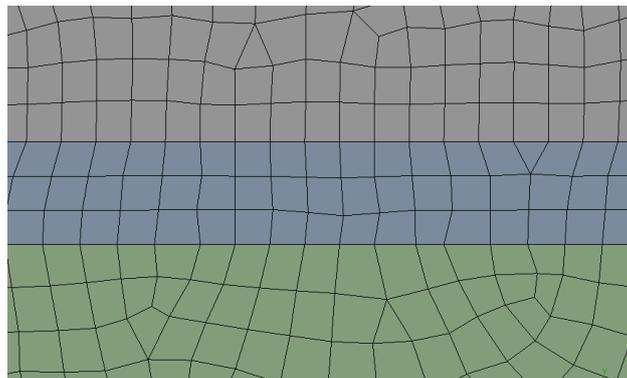


Imagen 38. Detalle de la malla en la zona de contacto entre superficies (componente superior: punzón; componente central: chapa; componente inferior: matriz)

De cara a obtener el mallado óptimo, es decir, aquel que permite tener una mejor relación entre coste y precisión, se lleva a cabo un estudio de sensibilidad en el que se varían los diferentes parámetros. Las pruebas realizadas se recogen en la siguiente tabla. Cabe destacar que en la iteración 11 se ha empleado un tamaño de elemento de 1,2mm en la chapa, es decir, un único elemento en el espesor de la chapa; si bien esta era una posibilidad que se ha descartado en el párrafo anterior, resulta importante analizar cuál es su efecto. La nomenclatura de la tabla es la siguiente:

- Orden: orden de los elementos
 - L -> Lineal, orden 1
 - Q -> Cuadrático, orden 2
- $T_{\text{Conductos}}$: tamaño de elemento en el borde de los conductos
- $T_{\text{Utillajes}}$: tamaño global del mallado en los utillajes
- N_{Nodos} : número total de nodos
- $N_{\text{Elementos}}$: número total de elementos
- t , [s]: tiempo de simulación requerido, en segundos
- Almac., [MB]: espacio de almacenamiento requerido, en MegaBytes

Tabla 8. Resumen de las configuraciones probadas en el mallado

Config.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Orden	L	Q	L	Q	L	Q	L	L	L	L	L
$T_{\text{Conductos}}$	0,1	0,1	0,5	0,5	1	1	5	1	1	5	5
$T_{\text{Utillajes}}$	4	4	4	4	4	4	4	5	10	10	10
N_{Nodos}	26259	77091	11752	34113	9311	26867	8284	9100	8946	7792	2096
$N_{\text{Elementos}}$	24332	24410	10721	10684	8414	8354	7476	8215	8069	7006	1796
t , [s]	44	70	25	36	22	31	19	23	22	20	7
Almac., [MB]	497	604	220	267	562	212	154	171	168	146	24

De cara a poder realizar una valoración acerca de cuál es la mejor iteración, se han representado gráficamente los resultados obtenidos.

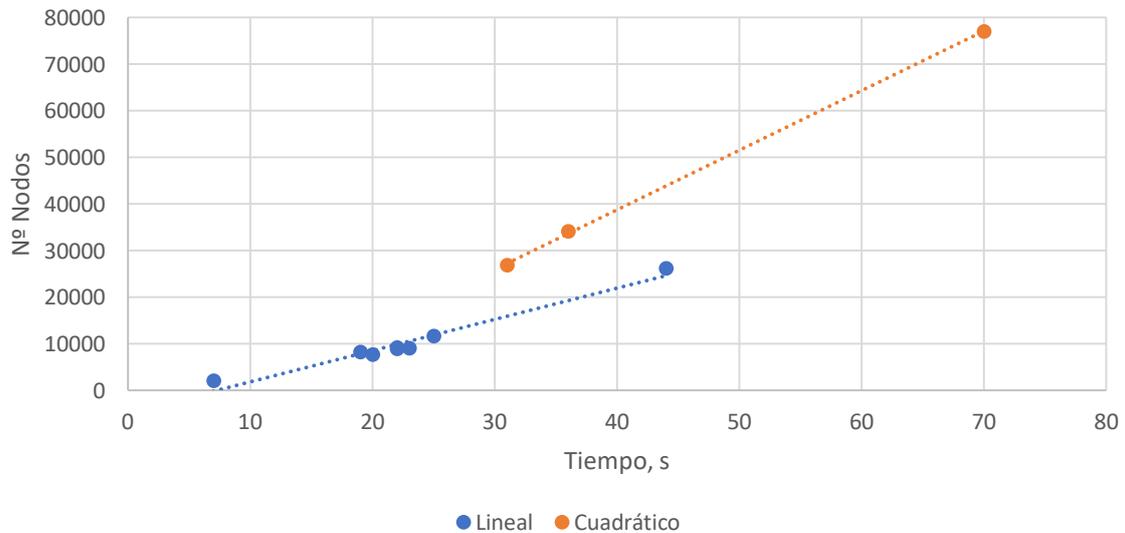


Gráfico 7. Comparativa del coste computacional entre las diferentes configuraciones de mallado

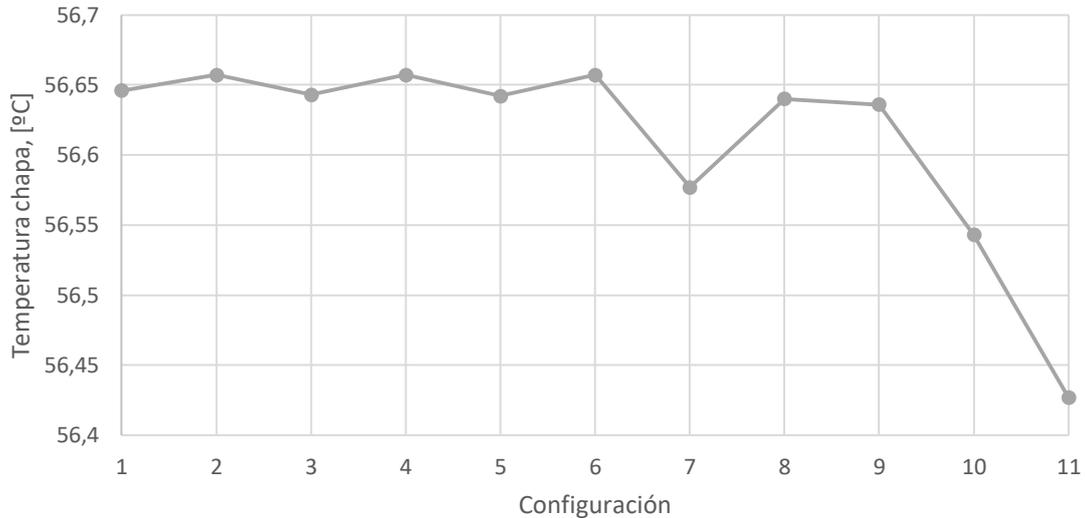


Gráfico 8. Temperatura máxima final en la chapa en función de la configuración del mallado

Analizando el coste computacional, se observa que las tres configuraciones que emplean elementos cuadráticos (2, 4 y 6), así como la configuración 1, que es en la que se emplea un tamaño de elemento menor, presentan un coste muy superior al resto.

En lo que respecta a la precisión de los resultados, empleando para ello la referencia de la temperatura máxima final en la chapa, se observa que las configuraciones 7, 10 y 11 difieren significativamente del resto. Así pues, debido a que estas tres configuraciones son las que presentan un mayor error, son descartadas. Del mismo modo, se observa que, en las configuraciones de mayor coste computacional, 1, 2, 4 y 6, los resultados obtenidos son prácticamente idénticos a los de las configuraciones 8 y 9. Por este motivo, las cuatro configuraciones de mayor coste pueden ser descartadas en favor de estas dos últimas, sin sacrificar precisión en los resultados.

De las alternativas restantes (iteraciones 3, 5, 8 y 9), resulta inmediato descartar las alternativas 3 y 5; no presentan una mejor precisión que las otras dos, pero sí un mayor coste. Las iteraciones restantes, 8 y 9, debido a que presentan prácticamente idénticos resultados y coste, se considera que ambas opciones son igualmente válidas; se selecciona la iteración 8. Con todo ello, la malla obtenida se muestra en la siguiente imagen.

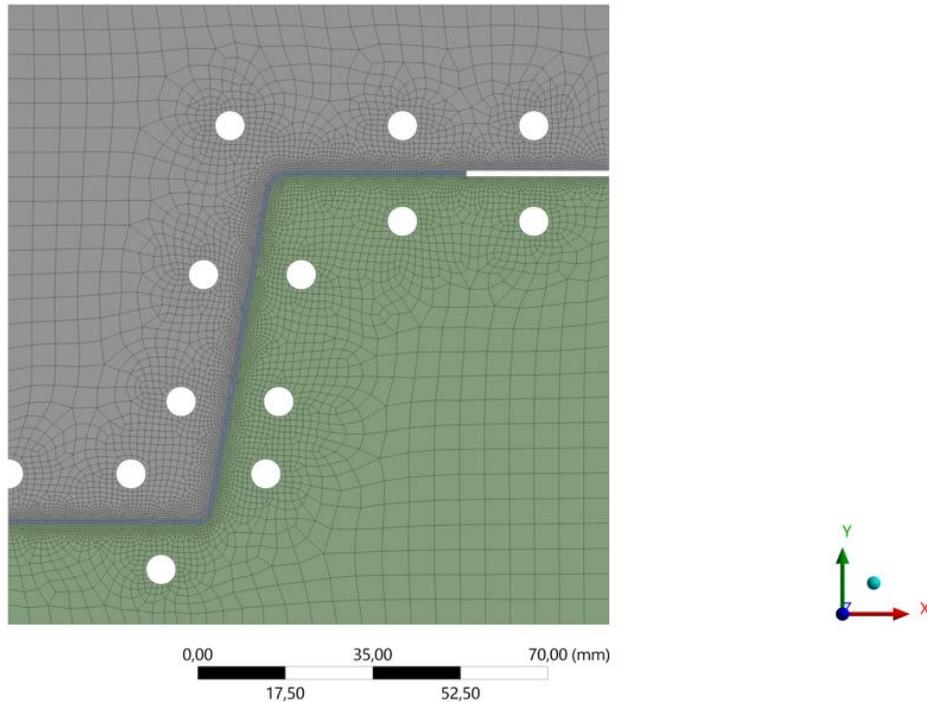


Imagen 39. Malla de elementos finitos

11.2.8 Discretización temporal, incremento de tiempo

Debido a que la simulación a realizar es de estado transitorio, resulta necesario establecer un incremento de tiempo para la integración de la ecuación diferencial y su propagación temporal. De este modo, al igual que en el caso del mallado, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad para estudiar la situación óptima entre precisión y coste. Los casos que se han estudiado son los siguientes:

- Δt , [s]: incremento de tiempo, en segundos
- t , [s]: tiempo de cálculo requerido, en segundos
- Almac., [MB]: espacio de almacenamiento requerido, en MegaBytes

Tabla 9. Resumen de las configuraciones en el incremento de tiempo

Configuración	1	2	3	4	5
Δt , [s]	0,001	0,01	0,1	1	Variable
t , [s]	1204	126	25	13	23
Almac., [MB]	13446,144	1427	561	561	171
Temp. max. final, [°C]	56,015	56,047	56,411	60,856	56,64

Cabe destacar que este análisis solamente se ha llevado a cabo para el segundo paso de carga, ya que el primero se emplea únicamente para establecer las condiciones iniciales. A continuación, se muestran las gráficas que resumen los resultados obtenidos.

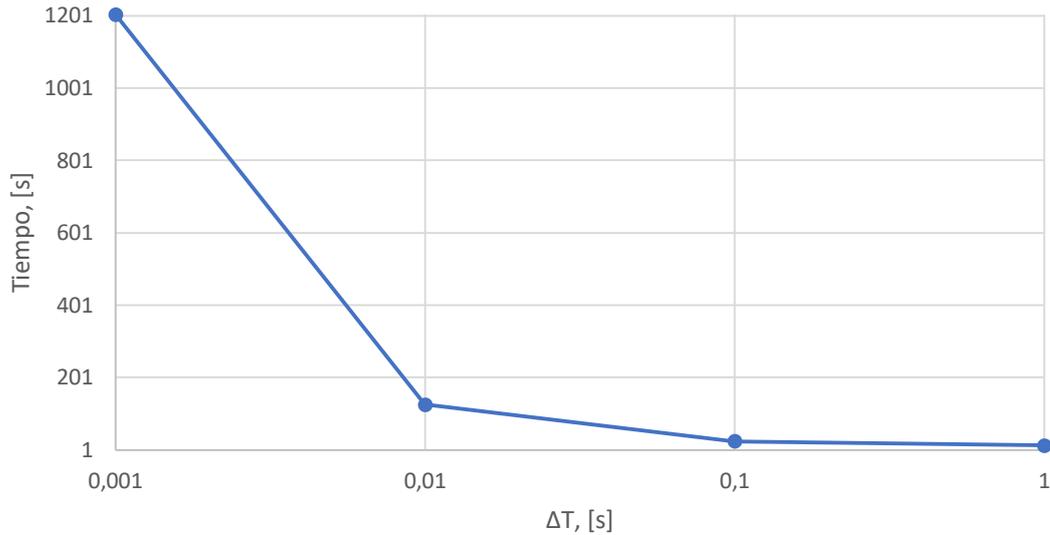


Gráfico 9. Comparativa del coste computacional entre las diferentes configuraciones del incremento de tiempo

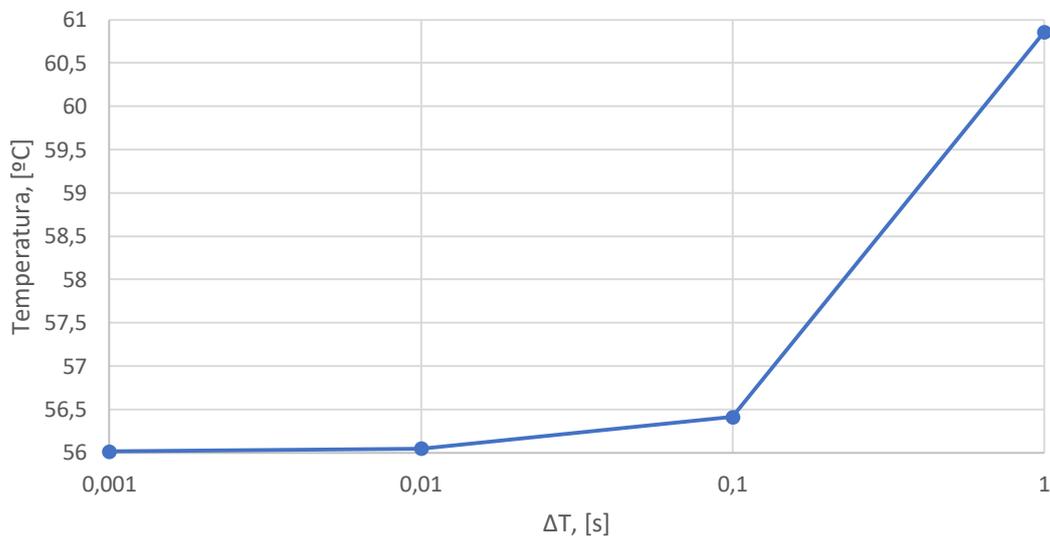


Gráfico 10. Temperatura máxima final en la chapa en función del incremento de tiempo

Se observa que las dos opciones extremas pueden ser rápidamente descartadas; un incremento de tiempo de 0,001s tiene un coste desproporcionado, y aporta los mismos resultados que un ΔT de 0,01 segundos. Por el contrario, un incremento de tiempo de 1 segundo tiene un coste mínimo, pero se comete un error de 10°C en la temperatura final. Analizando las dos opciones restantes, se observa que la configuración con un $\Delta T=0,1$ segundos, presenta un coste un 48% menor con respecto al de $\Delta T=0,01s$, con un error de 0,3°C, es decir, el 5%. Por este motivo, y teniendo en mente que reducir el coste de cálculo es prioritario a la hora de plantear el DOE, la alternativa de $\Delta T=0,1s$ resulta preferible. Sin embargo, analizando la Tabla 9, se observa que la configuración 5, es decir, con un incremento de tiempo ajustado automáticamente por el programa, permite obtener resultados muy similares a los de $\Delta T=0,1s$. Por ello, siendo ambas soluciones igualmente adecuadas, se opta por dejar que el incremento de tiempo se ajuste de forma automática.

11.3 Definición del modelo de optimización

11.3.1 Vector de variables de diseño

Llegados a este punto, se tiene un modelo de elementos finitos completamente definido, y donde se ha prestado especial cuidado para lograr que este pueda ejecutarse en el menor tiempo posible sin que ello afecte de forma notoria a la precisión. Así pues, a partir de ahora, se trabajará sobre este modelo para realizar la optimización.

De cara a definir la optimización, el primer paso consiste en establecer el vector de variables de diseño, es decir, aquel que contiene los parámetros que se quieren optimizar. En este caso, este vector contiene las coordenadas y diámetro de todos los conductos.

- D: diámetro de los conductos
- H: distancia entre el eje de simetría y el eje del conducto
- L: distancia entre el centro de los conductos y el eje neutro de la chapa

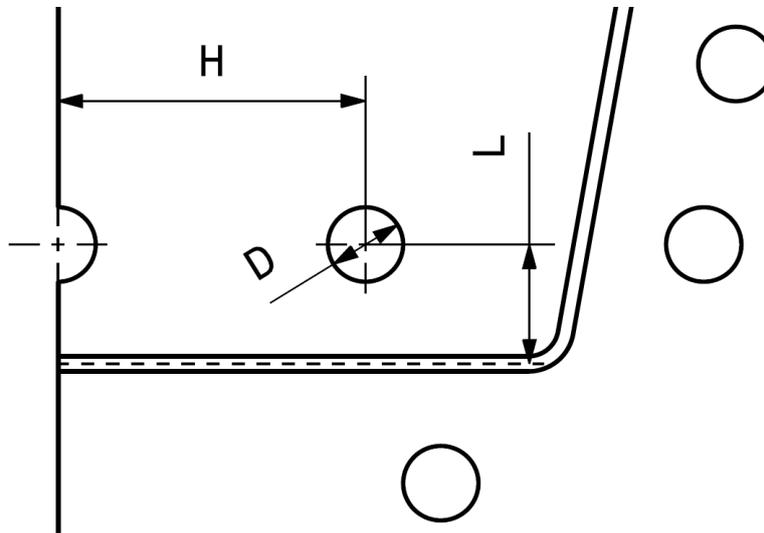


Imagen 40. Representación de los parámetros a optimizar

Así pues, las coordenadas de los conductos en la configuración inicial es la siguiente:

Tabla 10. Configuración inicial de los conductos

Conducto	D, [mm]	H, [mm]	L, [mm]
1	6	-	9,60
2	6	24,5	9,60
3	6	34,5	9,60
4	6	39	9,60
5	6	44,279	9,60
6	6	78,75	9,60
7	6	105	9,60
8	6	30,5	9,60
9	6	51,453	9,60
10	6	54,016	9,60
11	6	58,516	9,60
12	6	78,75	9,60
13	6	105	9,60

Cabe destacar que el número total de conductos no es una variable de diseño, lo cual se debe a dos motivos. Por un lado, resulta intuitivo pensar que, cuanto mayor sea la superficie de enfriamiento, es decir, cuantos más conductos haya, mejor será la eficiencia de la refrigeración; por lo tanto, de cara a mejorar el enfriamiento, bastaría con aumentar el número de conductos tanto como fuera posible. Sin embargo, en la realidad esta no es una solución viable, ya que existen diferentes factores limitantes que no permiten incrementar de forma ilimitada el número de conductos. Un claro ejemplo de este caso es el caudal de líquido refrigerante: cuantos más conductos, mayor caudal, y, consecuentemente, mayor potencia de bombeo será necesaria. En este caso, habría que buscar un equilibrio entre el coste y consumo de la bomba, y el diseño de los conductos. Sin embargo, debido a que, tal y como se ha explicado, en este proyecto solamente se va a estudiar el posicionamiento de los conductos, por lo que un análisis del sistema de bombeo quedaría fuera de los límites establecidos. Por otro lado, al mantener constante el número de conductos, se puede comprobar directamente la mejora como consecuencia de un correcto posicionamiento de los conductos.

11.3.2 Ecuaciones de restricción

El siguiente paso para definir la optimización, consiste en plantear las ecuaciones de restricción. En este caso, se emplean inecuaciones para delimitar el valor máximo y mínimo entre los cuales debe encontrarse cada valor del vector de variables de diseño.

$$D_{min} \leq D \leq D_{max} \quad [34]$$

$$H_{min} \leq H \leq H_{max} \quad [35]$$

$$L_{min} \leq L \leq L_{max} \quad [36]$$

A la hora de acotar el rango del parámetro D, se debe tener en cuenta, además de la refrigeración, la fabricación de los utillajes. Es decir, por un lado, lo habitual es realizar los conductos por medio de un proceso de taladrado; dadas las dimensiones de los utillajes propuestos, un rango de diámetros razonable para los conductos resulta ser entre 6 y 8 milímetros. Así pues, en este rango, el diámetro habitual de las brocas es de 6 y 8 milímetros; existen diámetros de herramientas intermedios, pero su uso es menos frecuente.

En lo que respecta al parámetro L, la profundidad del conducto con respecto a la superficie de estampación, también debe tenerse en cuenta en el proceso de fabricación. Es decir, si L es excesivamente pequeño, el taladrado se realizaría muy cerca de la superficie de estampación del troquel. En el caso de que, por un error de fabricación, la posición del agujero se desviase con respecto a la cota del plano, existiría riesgo de dañar la superficie de estampación. Por lo tanto, con objeto de mantener una distancia se impone que entre la superficie y el centro del agujero debe existir, al menos, una distancia de 1,5 veces el diámetro.

Finalmente, en lo que respecta al parámetro H, este se acota para evitar que los conductos lleguen a intersectar entre sí. De este modo, con la combinación de las inecuaciones referentes a H y a L, se acota una superficie dentro de la cual debe encontrarse el centro del conducto.

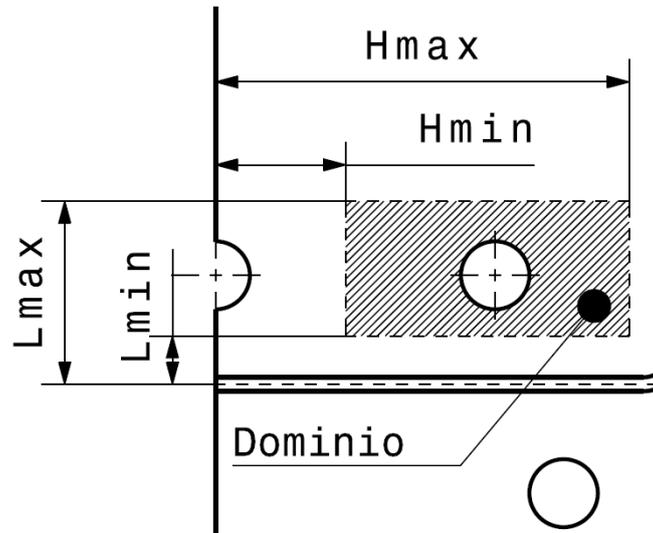


Imagen 41. Representación del dominio de optimización

11.3.3 Función objetivo

La función objetivo hace referencia a la función que se quiere optimizar. Para poder definir esta función, en primer lugar, deben plantearse los objetivos de optimización:

- Objetivo 1: temperatura máxima de la chapa en el instante final de la simulación.
 - o De cara a mejorar la eficiencia del proceso de estampación, uno de los objetivos a cumplir es el de minimizar el tiempo de proceso. Así pues, este depende directamente de la velocidad de enfriamiento de la chapa. Por lo tanto, cuanto menor sea la temperatura de la chapa al finalizar la simulación, mayor habrá sido su velocidad de enfriamiento.
- Objetivo 2: diferencia de temperaturas en la chapa
 - o A lo largo del enfriamiento de la chapa, resulta importante estudiar el gradiente máximo de temperaturas en el interior de la misma. Si la diferencia de temperatura entre dos puntos es demasiado elevada, se generarán en el interior de la chapa tensiones residuales que pueden llegar a deformar completamente el componente fabricado. Por este motivo, de cara a un correcto diseño de los conductos, debe considerarse que, además de una velocidad de enfriamiento elevada, que esta sea homogénea a lo largo de toda la chapa. Para contemplar este efecto, se considera, como criterio de optimización adicional, minimizar la temperatura promedio de la chapa en el instante final.
- Objetivo 3: tensiones debidas a dilataciones térmicas
 - o Los materiales tienden a experimentar dilataciones de origen térmico cuando estos se calientan. Si la deformación se encuentra restringida, se generan tensiones internas en las piezas que pueden llegar a ser de un orden de magnitud similar al de la propia carga de la prensa. Así pues, en el caso de los utillajes, es poco probable que se llegue a alcanzar el límite de fluencia; sin embargo, las tensiones de origen térmico sí que pueden llegar a acortar la vida a fatiga de estos. Por lo tanto, resulta importante minimizar estas tensiones.
 - o Concretamente, debido a que se está optimizando únicamente la posición y diámetro de los conductos, resulta necesario centrar el estudio de las tensiones en el perímetro de los conductos. Así mismo, el fenómeno de fatiga se origina

debido a las tensiones de tracción; por este motivo, se plantea como objetivo, la minimización de la tensión principal máxima en el contorno de los conductos.

Se han planteado tres objetivos de optimización, todos ellos dependientes de las variables D, H y L, y donde cada objetivo tiene una función asociada. Es decir, por ejemplo, la temperatura máxima de la chapa en el instante final es una función que depende de la posición y diámetro de los conductos. De este modo, la función objetivo a optimizar será una combinación lineal de estas tres funciones:

$$f(x) = \sum_{i=1}^3 w_i * g_i(x) \quad [37]$$

El parámetro w_i es una función de peso a asociado a la importancia de cada una de las funciones; este parámetro se define en el punto 11.6. Cabe destacar que, debido a que la función objetivo depende, a su vez, de diferentes objetivos de optimización, se trata de un problema de optimización multiobjetivo.

11.3.4 Optimizaciones a realizar

Con objeto de poder contrastar diferentes resultados, se van a llevar a cabo diferentes optimizaciones:

- Optimización 1: solamente se consideran los objetivos relacionados con la transferencia de calor, es decir, los objetivos 1 y 2. Del mismo modo, se permite optimizar las tres cotas de cada conducto, D, H y L. Cabe destacar que el diámetro de los conductos se plantea como una variable continua, donde todos los valores comprendidos entre 6 y 8 milímetros son igualmente válidos. Del mismo modo, dadas las limitaciones del software Ansys a la hora de introducir las ecuaciones de restricción, L_{\min} será igual a $1,5 * \varnothing 6\text{mm}$ (más la mitad del espesor de la chapa, $1,2/2=0,6\text{mm}$; esto se debe a que la referencia de L se toma en la línea neutra de la chapa); no es posible establecer esta inecuación de forma paramétrica tal que $L_{\min}=1,5 * D$. Mediante esta optimización se busca comprobar la capacidad de mejora máxima que permite esta metodología en el diseño de los conductos.
- Optimización 2: al igual que en la Optimización 1, solamente se consideran los objetivos térmicos. Sin embargo, se fuerza a que el diámetro de los conductos sea de 6 milímetros; de modo que el parámetro L también queda indirectamente restringido. De este modo, se logra estudiar, de forma independiente, el parámetro de mayor influencia en la eficiencia de los conductos: la separación que existe entre estos. Así mismo, al haber fijado el diámetro a un valor entero, se garantiza que la solución propuesta podrá ser fabricada mediante taladrado; un tamaño de broca habitual es de 6 milímetros.
- Optimización 3: similar a la Optimización 2, pero, en este caso, se impone que el diámetro de los conductos sea de 8 milímetros. Esto permite comparar los resultados entre los dos diámetros que menor problema suponen a la hora de poder mecanizar. Este estudio resulta importante porque, a priori podría pensarse que emplear conductos de mayor diámetro resulta ventajoso de cara a una mejor refrigeración, ya que permite mayor superficie de transferencia de calor y un mayor coeficiente de convección. Sin embargo, dada la limitación en el parámetro L, los conductos de diámetro 8 están más alejados de la superficie de la chapa, lo cual resulta perjudicial de cara a la eficiencia.
- Optimización 4: en este último caso, se permite que se puedan optimizar los tres parámetros a la vez, y también se consideran los tres objetivos de optimización. De este

modo, al considerar el efecto de las tensiones de origen térmico, se pueden comprar el efecto perjudicial que estas provocan en la solución con respecto a una situación de enfriamiento ideal.

A continuación, se muestra un resumen de estas cuatro optimizaciones planteadas:

Tabla 11. Resumen de las optimizaciones planteadas

Número	1	2	3	4
D, [mm]	Variable	6	8	Variable
H, [mm]	Variable	Variable	Variable	Variable
L, [mm]	Variable	9,6	12,6	Variable
Objetivos	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2, 3

11.4 Diseño de experimentos, DOE

La fase de diseño de experimentos consiste en muestrear la función objetivo dentro del dominio acotado por las ecuaciones de restricción. Para ello, se pueden definir manualmente una serie de puntos del dominio a muestrear, pero, existen diferentes algoritmos, que permiten realizar esta tarea de forma automática.

Uno de los métodos más utilizados es el hiper-cubo latino (*“Latin Hypercube Sampling”, LHS*), el cual está basado en el método de Montecarlo. A su vez, existe una evolución de este método conocida como *“Optimal Space-Filling Shape” (OSF)*; muestrea el dominio de la función de forma pseudoaleatoria, igual que el LHS, pero tratando de maximizar la distancia entre los puntos. De este modo, se logra obtener una mejor información de la hiper-superficie de muestreo. Adicionalmente, el software empleado para este paso, Ansys, incluye tres variantes de este algoritmo, las cuales permiten controlar la separación entre los puntos: Max-min Distance, Centered L2 y Maximum Entropy.

Para evaluar cuál de estos métodos es el que permite obtener los mejores resultados en el algoritmo predictivo, se ha llevado cabo a un muestreo, DOE, para cada algoritmo. Para ello, en cada caso, se ha tomado una pequeña muestra de N=50 puntos, y se ha analizado cuál es el error del algoritmo predictivo tras haber sido entrenado con esta nube de puntos. Es decir, se establece que el DOE debe contener una muestra de 50 puntos, de modo que cada algoritmo de muestreo los dispersará de forma diferente. En este análisis se quiere comprobar cuál de estos métodos realiza el muestreo más adecuado para obtener un mejor entrenamiento en el algoritmo predictivo

Los resultados, son los que se muestran a continuación en la siguiente tabla. Cabe destacar que este análisis se ha realizado para la optimización 2, es decir, en la que solamente se ajusta la posición de los conductos, y el diámetro de estos se restringe a 6 milímetros; las conclusiones extraídas de este análisis se extrapolan para el resto de optimizaciones.

Tabla 12. Selección del método de muestreo

Error RMS	LHS	OSF - Max-min	OSF - Centered L2	OSF - Maximum Entropy
Temperatura máxima, [°C]	0,395	0,508	0,471	0,297
Temperatura promedio, [°C]	0,026	0,082	0,024	0,028
Combinación Lineal	0,264	0,334	0,311	0,252

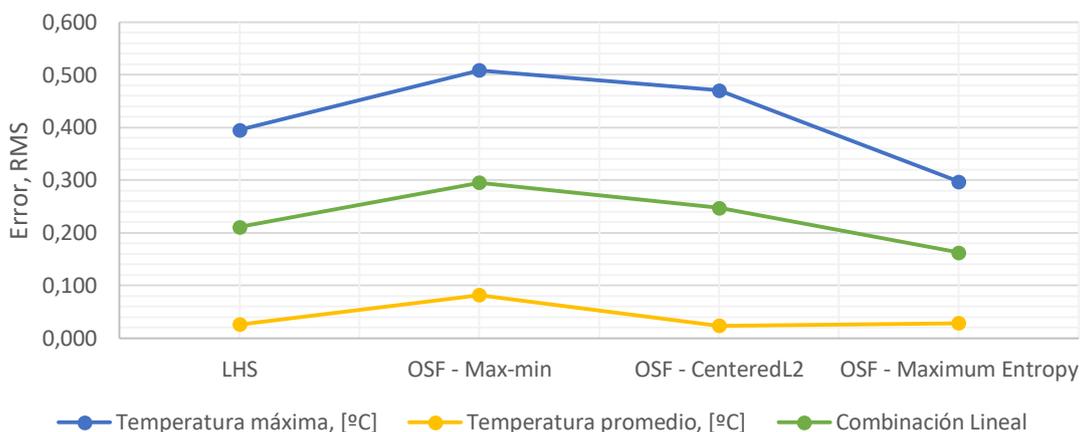


Gráfico 11. Error RMS del algoritmo predictivo en función del algoritmo DOE

En esta gráfica se ha representado la raíz del error cuadrático medio (RMSE, “*Root Mean Square Error*”) del algoritmo predictivo tras haber muestreado el espacio de trabajo con cuatro métodos diferentes.

En lo que respecta a las conclusiones que pueden extraerse de esta gráfica, se observa que la temperatura máxima presenta el menor error cuando el muestreo se ha hecho de acuerdo al método OSF - Maximum Entropy, mientras que en el caso de la temperatura promedio esto ocurre para el caso de OSF - Centered L2. Para decidir qué método de DOE es el mejor, se ha obtenido una única curva por medio de una combinación lineal (el factor de peso para ambos parámetros es del 50%). De este modo, se obtiene la curva denotada como “Combinación Lineal”, donde se observa que el error combinado mínimo ocurre para el caso de OSF - Maximum Entropy. Por lo tanto, este es el método que se va a considerar para realizar el DOE.

Adicionalmente, cabe destacar que el algoritmo OSF se encuentra limitado a 20 parámetros en el software empleado, mientras el método LHS no presenta dicha limitación. Por este motivo, en la optimización 1, donde se excede el número máximo de parámetros, se ha empleado un muestreo por LHS.

Finalmente, queda por definir el número de puntos de muestreo que es necesario tomar. Es decir, en el paso anterior se han tomado 50 muestras como valor representativo para poder comparar entre sí los diferentes métodos. Pero, en esta ocasión, una vez definido el método DOE, debe definirse cuántas muestras son necesarias para representar correctamente el dominio de optimización completo. Para ello, se tienen en cuenta las inecuaciones planteadas en el punto 11.3.2. Concretamente, tras considerar el rango de todos los parámetros existentes, tiene que diferencia máxima entre el valor superior e inferior de cualquier parámetro es de 20mm. Así pues, siendo este el rango máximo de variabilidad del problema, podría resultar interesante conseguir una resolución de un punto por cada milímetro. Por este motivo, se opta

por realizar un DOE cuyo número total de muestras sea de 20 por cada parámetro. Así mismo, cabe destacar que, bajo este procedimiento, se garantiza que el resto de parámetros sean muestreados con una distancia menor a 1 milímetro.

Cabe destacar que cada una de las cuatro optimizaciones planteadas depende de variables de diseño diferentes; es decir, la función objetivo es diferente para cada caso. Esto implica que se deba resolver un DOE completo para cada optimización. A continuación, se muestra una tabla en la que se recoge el número total de puntos a calcular para cada caso.

Tabla 13. Número de muestras en el DOE

	1	2	3	4
Método de muestreo	LHS	OSF – Maximum entropy	OSF – Maximum entropy	LHS
Número de parámetros	38	13	13	38
Número de puntos	760	260	260	760

Del mismo modo, cabe recordar que cada punto del DOE implica una resolución del modelo de elementos finitos completo. Por este motivo, emplear una resolución menor a 1mm implicaría incrementar de forma significativa el coste de cálculo. Así mismo, dada la precisión del método del algoritmo de predicción una distancia de muestreo menor a 1mm no supone una mejora significativa.

A modo de ejemplo, en la siguiente imagen se muestra la distribución de resultados obtenidos en el DOE de la optimización 1.

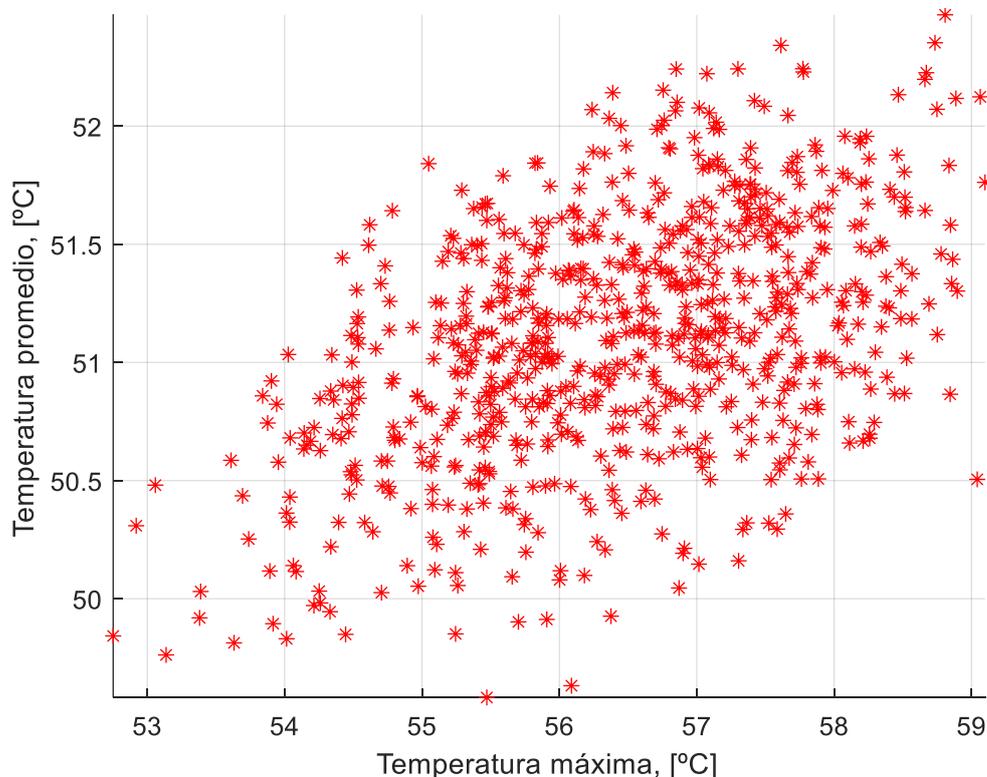


Imagen 42. Resultados del DOE de la optimización 1

11.5 Algoritmos predictivos, metamodelos

Tal y como se ha explicado en el apartado 10.5, esta es una fase intermedia entre el DOE y la optimización. Esta consiste en crear un modelo, a partir del modelo de elementos finitos, para poder predecir la salida del sistema (por ejemplo, la temperatura final de la chapa) a partir de los parámetros de entrada (posición y diámetro de los conductos de enfriamiento).

El primer paso para el empleo de estos algoritmos consiste en realizar el “entrenamiento” o ajuste de los parámetros internos del modelo. Para ello se emplean los puntos del DOE calculados en la fase anterior; al ser puntos en los que se conoce tanto la entrada como la salida, permiten realizar dicho ajuste, así como verificar si las soluciones que aporta el metamodelo se ajustan correctamente al modelo de elementos finitos.

El software de elementos finitos empleado dispone varios algoritmos programados de antemano. Para seleccionar cuál de ellos escoger, se entrenan todos ellos con la misma serie de datos; posteriormente, se calcula el RMSE al estimar la respuesta (temperatura) en unos puntos de control o validación. De este modo, el algoritmo que se seleccione será el que mejor se ajuste a esta serie de datos.

A continuación, se recogen los resultados obtenidos en los diferentes algoritmos empleados. Así pues, igual que en el análisis del DOE, los resultados mostrados a continuación son los correspondientes a la optimización 2 y las conclusiones obtenidas son las que se utilizarán para analizar el resto de casos.

Tabla 14. Comparativa entre algoritmos predictivos

Error RMS	Genetic Aggregation	Red Neuronal: 3 neuronas	Red Neuronal: 10 neuronas	Full 2 nd order polynomial	Kriging
Temperatura Máxima	0,13	88,63	60,60	18,36	37,64
Temperatura Promedio	0,01	43,21	3,58	10,32	15,49

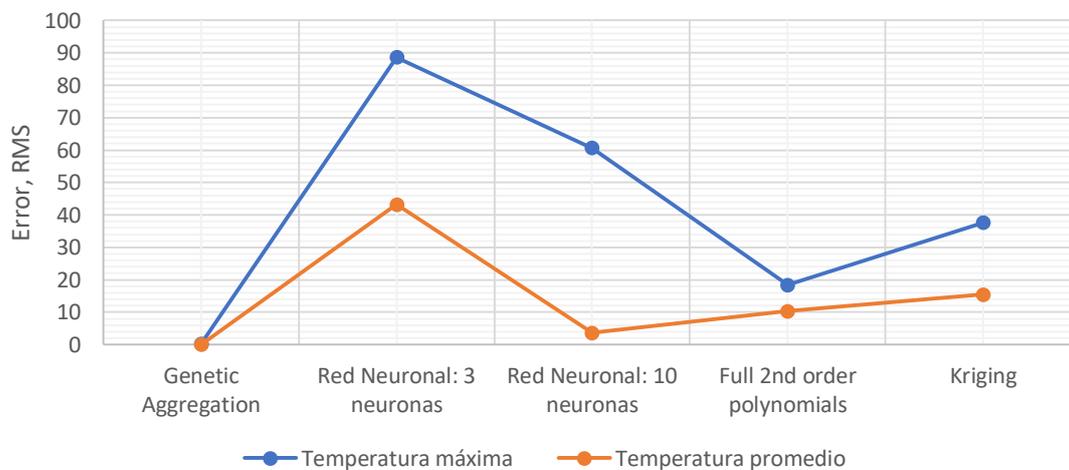


Gráfico 12. Error RMS del algoritmo predictivo

Entre los métodos estudiados, se encuentran las Redes Neuronales; en este caso, se observa que la que dispone de 3 neuronas es el algoritmo que produce un mayor error. De igual modo, la red neuronal de 10 neuronas presenta una mejora sustancial en la predicción de la temperatura promedio, pero su precisión es muy inferior al resto en el caso de la temperatura máxima. Esto es debido a que, tal y como está implementado este algoritmo en el software empleado, este se encuentra muy restringido: solamente cuenta con una capa de profundidad, y con un máximo de 10 neuronas. De este modo, la red neuronal no dispone del suficiente número de parámetros para aproximar correctamente los efectos debidos a todas las variables de diseño.

Por otro lado, a modo de referencia, se incluyen los métodos denominados como “*Full 2nd Order Polynomials*” y “*Kriging*”; ambos se basan en métodos estadísticos [14]. Así pues, si bien en este trabajo no se ha profundizado en el funcionamiento de los mismos, se ha decidido incluir sus resultados para poder compararlos con los otros métodos y porque el método de “*Genetic Aggregation*” depende de ellos.

Concretamente, el método Genetic Aggregation, es un Algoritmos Evolutivos cuya superficie de respuesta es la combinación lineal de las superficies de respuesta obtenidas mediante otros métodos. Para ello, este método crea una población inicial, constituyente de diferentes algoritmos predictivos: redes neuronales, Kriging y otros métodos implementados en el software. Así pues, generación tras generación, se ajustan por separado las superficies de respuestas de cada uno de estos métodos por separado, y se juntan todas ellas en una única superficie [14]. De este modo, debido a que el método de Genetic Aggregation es el que depende de más parámetros, e incorpora en su interior el resto de métodos, es el que permite realizar las aproximaciones de mayor precisión. Por lo tanto, este es el método empleado de cara a plantear los metamodelos.

11.6 Optimización

Llegados a este punto, ya se dispone de un modelo completamente funcional y preparado para realizar la optimización. Tal y como se ha explicado en el apartado 10.6, esta fase consta de dos etapas: en la primera se buscan las zonas de extremos locales y en la segunda se refina para encontrar las zonas óptimas con mayor precisión.

En la primera fase, la de aproximación, se emplea un algoritmo genético conocido como “*Multi Objective Genetic Algorithm*”, MOGA. Se trata de un algoritmo diseñado para trabajar con problemas de optimización multiobjetivo, y es el implementado en Ansys para resolver este tipo de casos.

Antes de realizar la optimización deben establecerse tanto los objetivos como el peso o importancia relativa de cada uno de ellos. De cara a plantear los objetivos de optimización se recurre a los puntos calculados en el DOE, y se busca cuáles son los mejores resultados obtenidos para cada función; de este modo, se impone que las soluciones que se deben encontrar mediante el algoritmo MOGA deben ser, al menos, mejores que las encontradas en el DOE. Cabe destacar que es necesario que los objetivos de diseño impuestos deben ir en concordancia con los resultados obtenidos en la fase del DOE. Por ejemplo, en este caso, si, tras muestrear 760 puntos, la temperatura máxima de menor valor es de 52,8°C, y la diferencia entre el mejor y peor resultado es de unos 6°C, resulta poco probable encontrar una solución con, por ejemplo, 30°C

de temperatura máxima. Con todo ello, para el caso de la optimización 1, se definen los siguientes objetivos de diseño.

Tabla 15. Objetivos de diseño para la optimización 1

Función objetivo	Tipo de optimización	Objetivo
Temperatura máxima	Minimizar	51°C
Temperatura promedio	Minimizar	47°C

En lo que respecta a la función de peso, el software Ansys solamente admite asignar dos valores discretos: importancia “Higher” para los objetivos prioritarios y “Lower” para los secundarios. En este caso, se ha optado por dotar a las dos funciones objetivo con el mismo peso. Finalmente, en lo que respecta al resto de optimizaciones, el proceso para definir los objetivos es idéntico al explicado en este caso.

Una vez realizada la optimización con el algoritmo MOGA, este extrae una nube de puntos que son posibles candidatos a ser la configuración óptima. Así pues, antes de continuar con la segunda fase de la optimización, deben filtrarse los puntos de esta serie de datos, descartando aquellas soluciones de menor calidad. Para ello, se ha programado mediante Matlab un código que permite obtener el Frente de Pareto de estas soluciones, de modo que aquellas configuraciones que no forman parte de este frente, pueden ser descartadas. A continuación, se muestra, para la optimización 1, el Frente de Pareto tras aplicar el algoritmo MOGA.

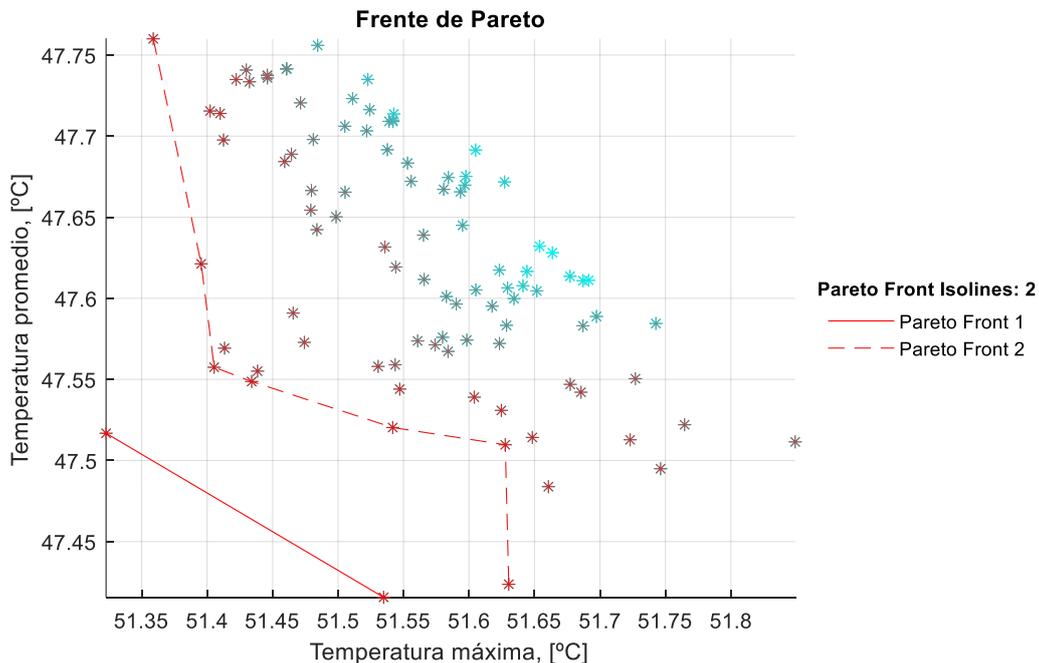


Imagen 43. Frente de Pareto, optimización 1, MOGA

Así pues, estos puntos presentan una cierta incertidumbre con respecto al modelo FEM, ya que se han obtenido a partir de la estimación del metamodelo. Por este motivo, resulta necesario validar dichos puntos, es decir, calcularlos mediante el modelo de elementos finitos para obtener los resultados de temperaturas con mayor precisión y calcular así el verdadero frente de Pareto. Adicionalmente, considerando la incertidumbre del algoritmo predictivo, resulta conveniente validar también los puntos pertenecientes al segundo frente de Pareto; es decir, los puntos que, tras descontar los puntos del frente de Pareto de la nube de datos original,

conformarían el nuevo frente. Así pues, tras validar los puntos del primer y segundo frente de Pareto, se obtiene el siguiente resultado.

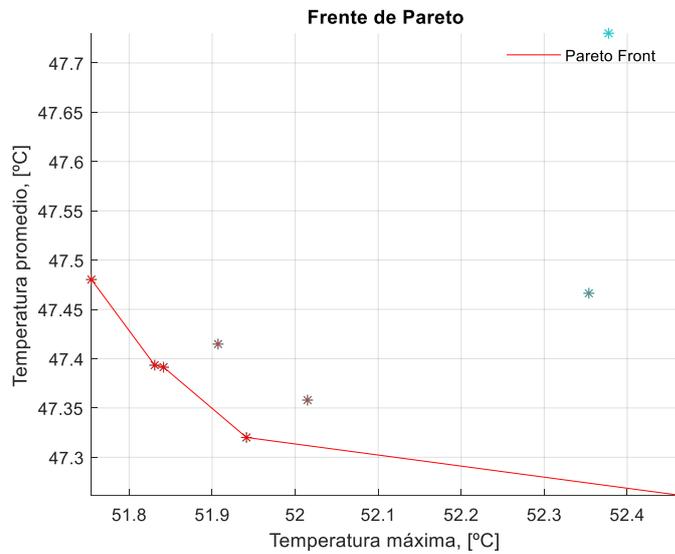


Imagen 44. Frente de Pareto de los puntos validados de la optimización MOGA

A partir de este análisis se concluye que existen cinco posibles soluciones; estas son las que conforman el frente de Pareto de la optimización MOGA. Estos puntos corresponden con la configuración de los conductos mostradas en la siguiente tabla, estando todas las unidades indicadas en milímetros.

Tabla 16. Configuraciones geométricas de los conductos; frente de Pareto de la optimización MOGA

Configuración	1	2	3	4	5
D1	7,73	7,92	7,73	7,82	7,92
D2	7,96	7,71	7,76	7,42	7,71
D3	7,76	7,63	7,75	7,75	7,77
D4	7,75	7,31	6,98	7,00	7,30
D5	7,07	7,59	7,07	7,56	7,59
D6	7,21	7,73	7,21	7,31	7,73
D7	7,77	7,50	6,18	6,61	7,50
D8	7,62	7,23	7,62	7,73	7,21
D9	7,89	7,94	7,89	7,56	7,94
D10	6,59	6,56	6,59	6,48	7,13
D11	7,99	7,87	7,99	7,71	7,92
D12	7,87	7,83	7,87	7,63	7,83
D13	6,98	6,98	6,98	6,07	6,98
L1	10,78	10,29	10,32	10,25	10,25
L2	9,76	9,68	9,76	9,68	9,68
L3	9,61	9,67	9,60	9,60	9,67
L4	9,66	9,61	9,61	9,65	9,61
L5	9,75	9,83	9,75	9,94	9,83
L6	9,71	9,74	9,71	9,71	9,74
L7	9,81	10,8	9,81	9,89	10,83
L8	9,99	9,65	9,99	9,67	9,65
L9	9,83	9,64	9,61	9,61	9,64
L10	9,62	9,77	9,62	9,62	9,77
L11	9,62	9,67	9,62	9,62	9,67
L12	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68
L13	10,09	10,35	10,09	9,91	10,27
H2	24,30	24,13	24,10	24,14	24,47
H3	33,08	33,05	33,08	33,03	33,05
H4	38,61	38,88	38,61	38,60	40,56
H5	49,12	49,06	49,12	48,92	49,06
H6	71,92	70,79	71,92	70,54	71,93
H7	85,32	85,62	85,32	85,44	85,62
H8	25,56	24,60	24,53	24,37	24,54
H9	50,85	50,75	50,76	50,04	50,75
H10	54,35	54,39	54,35	54,35	54,39
H11	58,94	58,94	58,94	58,90	58,94
H12	68,31	68,18	68,31	68,31	68,31
H13	83,63	83,53	83,63	84,29	84,31

En este punto finaliza la primera fase de la optimización, la correspondiente con la detección de los extremos relativos de la función. A continuación, se planea el cálculo con mayor precisión de estos extremos; para ello, se emplea un algoritmo de optimización Sequential Quadratic Programming, SQP, incorporado en Ansys: “*Nonlinear Programming by Quadratic Lagrangian*”, NLPQL.

La desventaja de este método es que solamente admite un objetivo de optimización, por lo que debe seleccionarse uno de los empleados en la fase MOGA. Para ello, analizando el error del algoritmo predictivo en la Tabla 14, se observa que dicho error es un orden de magnitud menor en la estimación de la temperatura promedio con respecto a la temperatura máxima. Por ello, debido a que el metamodelo aproxima con mayor precisión la temperatura promedio, se decide emplear este parámetro como función a optimizar mediante el algoritmo NLPQL. En lo que respecta al valor objetivo, este se establece que debe ser menor a la temperatura promedio mínima obtenida mediante el algoritmo MOGA.

Los puntos de partida a partir de los que comenzar a realizar la búsqueda son los que conforman el frente de Pareto de la optimización anterior. Debido a que en este caso se quiere afinar con mayor precisión el resultado, se acota la zona de búsqueda de cada parámetro para un rango de $\pm 0,5\text{mm}$, es decir, cada parámetro solo puede variar 0,5 milímetros con respecto a la solución anterior. Al igual que en el MOGA, una vez obtenidos los puntos de la optimización NLPQL, es necesario validarlos mediante el modelo de elementos finitos.

A continuación, se muestra el frente de Pareto de todas las soluciones calculadas mediante elementos finitos para la optimización 1. Es decir, se muestran en una misma gráfica tanto los puntos del DOE, como los puntos validados de las optimizaciones MOGA y NLPQL.

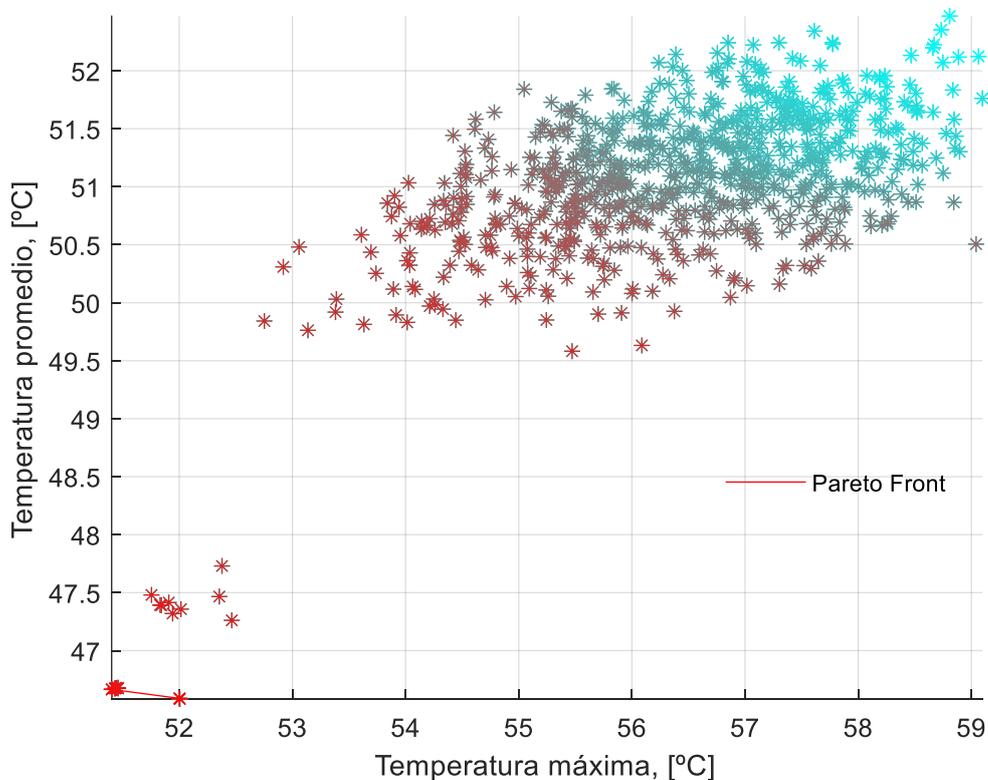


Imagen 45. Frente de Pareto de la optimización 1

Así pues, el frente de Pareto queda constituido por cuatro configuraciones, siendo estas las mostradas en la siguiente tabla (todas las cotas están en milímetros):

Tabla 17. Cotas de las configuraciones óptimas de la optimización 1

Configuración	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4
Temperatura máxima, [°C]	52,01	52,01	51,40	51,40
Temperatura promedio, [°C]	46,58	46,59	46,67	46,67
D1	7,98	7,98	7,98	7,98
D2	8,00	8,00	8,00	8,00
D3	8,00	8,00	8,00	8,00
D4	8,00	8,00	7,23	7,23
D5	7,32	7,32	7,32	7,32
D6	7,46	7,46	7,46	7,46
D7	7,52	7,52	6,43	6,43
D8	7,87	7,87	7,87	7,87
D9	8,00	8,00	8,00	8,00
D10	6,84	6,84	6,84	6,84
D11	8,00	8,00	8,00	8,00
D12	8,00	8,00	8,00	8,00
D13	7,23	7,23	7,23	7,23
L1	10,53	10,53	10,07	10,07
L2	9,60	9,60	9,60	9,60
L3	9,60	9,60	9,60	9,60
L4	9,60	9,60	9,60	9,60
L5	9,60	9,60	9,60	9,60
L6	9,60	9,60	9,60	9,60
L7	9,60	9,60	9,60	9,60
L8	9,74	9,74	9,74	9,74
L9	9,60	9,60	9,60	9,60
L10	9,60	9,60	9,60	9,60
L11	9,60	9,60	9,60	9,60
L12	9,60	9,60	9,60	9,60
L13	9,84	9,84	9,84	9,84
H2	24,55	24,55	24,35	24,35
H3	33,00	33,00	33,00	33,00
H4	38,50	38,50	38,52	38,50
H5	49,37	49,37	49,37	49,37
H6	72,17	72,17	72,17	72,13
H7	85,07	85,07	85,07	85,07
H8	25,31	25,31	24,28	24,28
H9	51,10	51,10	51,01	51,01
H10	54,60	54,44	54,25	54,25
H11	59,19	59,19	59,19	59,19
H12	68,06	68,06	68,06	68,06
H13	83,38	83,38	83,38	83,38

Llegados a este punto, se tiene un total de 4 soluciones o configuraciones diferentes propuestas para los conductos, y, a priori, todas ellas igualmente válidas. Sin embargo, resulta necesario seleccionar solamente una alternativa entre todas ellas. Para ello, en el apartado Análisis de resultados se estudia en detalle cada solución, escogiendo así la mejor.

En lo que respecta a la implementación de este modelo en el software Ansys Workbench, este se ha planteado del siguiente modo.

- Se introducen las propiedades de los diferentes materiales que constituyen el modelo
- Se genera la geometría
 - o Este paso también se emplea para definir las variables de diseño del problema. Para ello, mediante la herramienta CAD “Design Modeler” de Ansys, se dibujan los conductos, y se definen sus coordenadas y diámetros mediante cotas paramétricas.

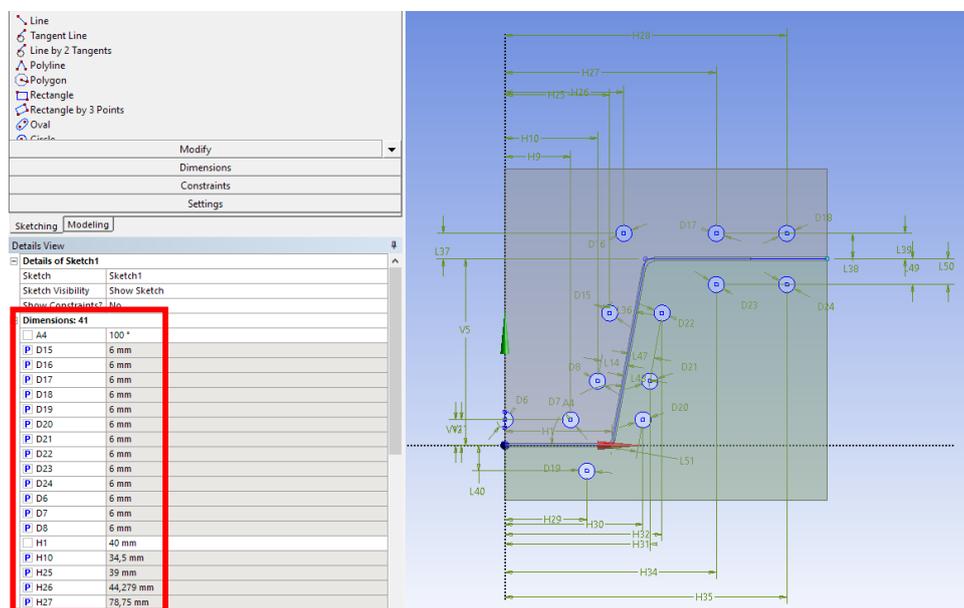


Imagen 46. Definición de variables de diseño (cotas paramétricas, P)

- Se plantea el modelo de elementos finitos
 - o En este caso, dicho modelo corresponde con el “Transient Thermal”.
 - o Igualmente, es este modelo se indican cuáles son las funciones objetivo.

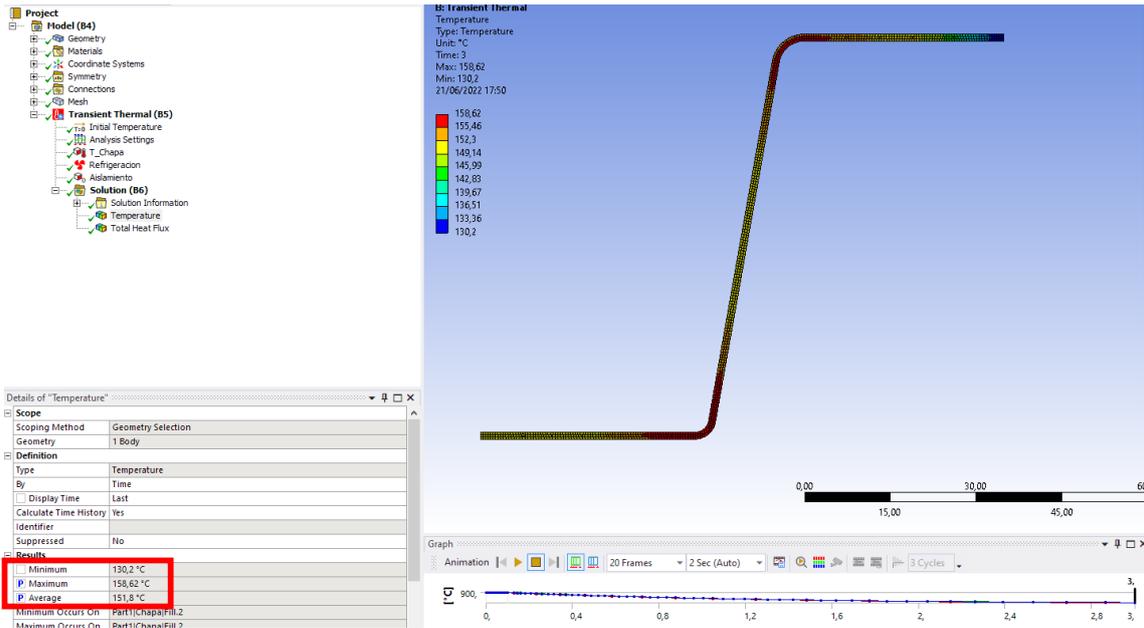


Imagen 47. Defunción de las funciones objetivo

- Para establecer el problema de optimización se emplean las herramientas incorporadas en el bloque “*Design Exploration*”
 - o Concretamente, en este caso, la herramienta empleada es la “*Response Surface Optimization*”. Esta permite llevar a cabo el DOE, metamodelos, y posterior optimización.
 - o La herramienta “*Direct Optimization*” realiza la optimización directamente sobre el modelo de elementos finitos; es decir, no emplea los metamodelos, por lo que el coste de su ejecución es significativamente mayor.
 - o El análisis “*Six Sigma Analysis*” permite realizar un modelo de optimización considerando la fiabilidad del componente. Por lo tanto, aporta una capa de complejidad al problema; resultaría interesante, en una línea de investigación futura, incorporar esta herramienta.
 - o El bloque “*Parameter correlation*” se emplea para estudiar la relación que existe entre las diferentes variables de diseño, de modo que se puedan descartar aquellas de menor influencia. En este caso, debido a que el objetivo es encontrar la mejor configuración posible, se ha decidido prescindir de su uso, pero en otros casos, podría resultar interesante de cara a simplificar el problema de optimización.

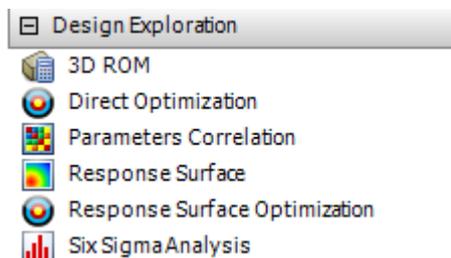


Imagen 48. Bloques con diferentes metodologías de optimización incorporadas en Ansys Workbench

- El bloque “*Response Surface Optimization*” contiene los siguientes pasos:
 - “*Design of Experiments*”: permite plantear el DOE.
 - “*Response Surface*”: genera los metamodelos o superficies de respuesta aproximadas al problema de elementos finitos.
 - “*Optimization*”: se lleva a cabo la optimización de la superficie de respuesta
 - Se deben emplear dos bloques “*Response Surface Optimization*”; el primero de ellos para la fase de optimización MOGA, y el segundo para la de NLPQL. Sin embargo, ambos bloques pueden compartir la información del DOE y superficie de respuesta, lo que reduce el coste total de la simulación; es decir, solamente es necesario calcular estas dos fases una sola vez.

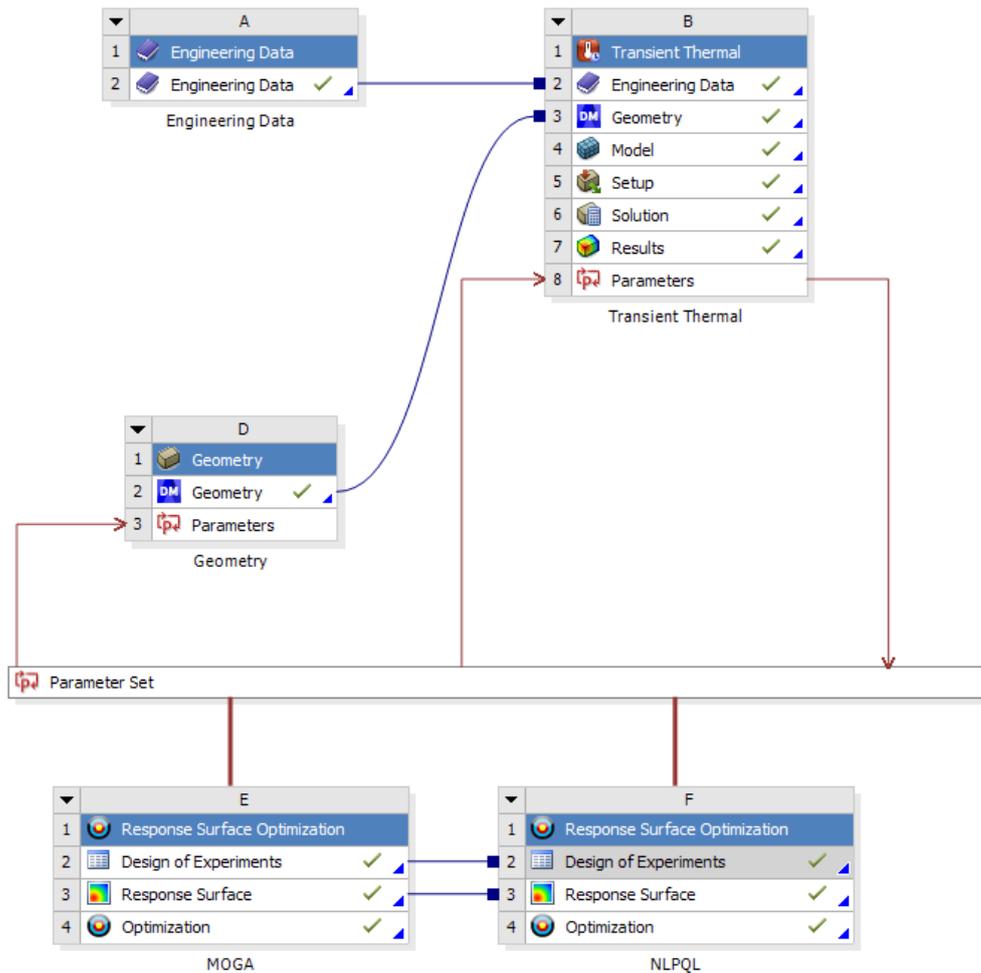


Imagen 49. Secuencia de bloques para definir el modelo en Ansys Workbench

11.7 Consideración de tensiones debidas a la dilatación térmica

Hasta ahora, la metodología de diseño solamente se ha explicado para la optimización 1; esta depende de la temperatura máxima y promedio de la chapa, de modo que la función objetivo se puede obtener a través de un único análisis térmico transitorio. Sin embargo, en la optimización 4 uno de los objetivos que se plantean es el de minimizar las tensiones internas en los utillajes debidas a las dilataciones térmicas.

Por lo tanto, con objeto de poder analizar las tensiones, debe realizarse un análisis estático estructural, además del correspondiente modelo térmico transitorio. Así pues, en este caso, el campo térmico y de deformaciones no están fuertemente acoplados. Es decir, al calentar los

utillajes, estos se deforman como consecuencia de la dilatación; sin embargo, debido a que en la situación que se está estudiando la prensa se encuentra presionando los utillajes entre sí, la dilatación térmica no provocará una variación en las zonas de contacto entre piezas. De este modo, debido a que el contacto entre superficies no varía, puede asumirse que el campo térmico no depende del de las deformaciones. Esto permite resolver en un primer paso el modelo térmico transitorio y, posteriormente, exportar el campo de temperaturas a un análisis estático estructural. Del mismo modo, gracias a que no existe un fuerte acoplamiento entre ambos modelos, el coste de resolver los dos modelos por separado es significativamente menor a tener que resolverlos de forma conjunta (Tabla 6).

A continuación, se muestra las conexiones entre modelos que deben realizarse en Ansys para plantear en este problema de optimización. Se observa que del modelo “*Transient Thermal*” se exportan los resultados al bloque “*Static Structural*”; la información que se comparte es la del campo térmico en el modelo en el instante en el que ocurre la máxima temperatura en los utillajes.

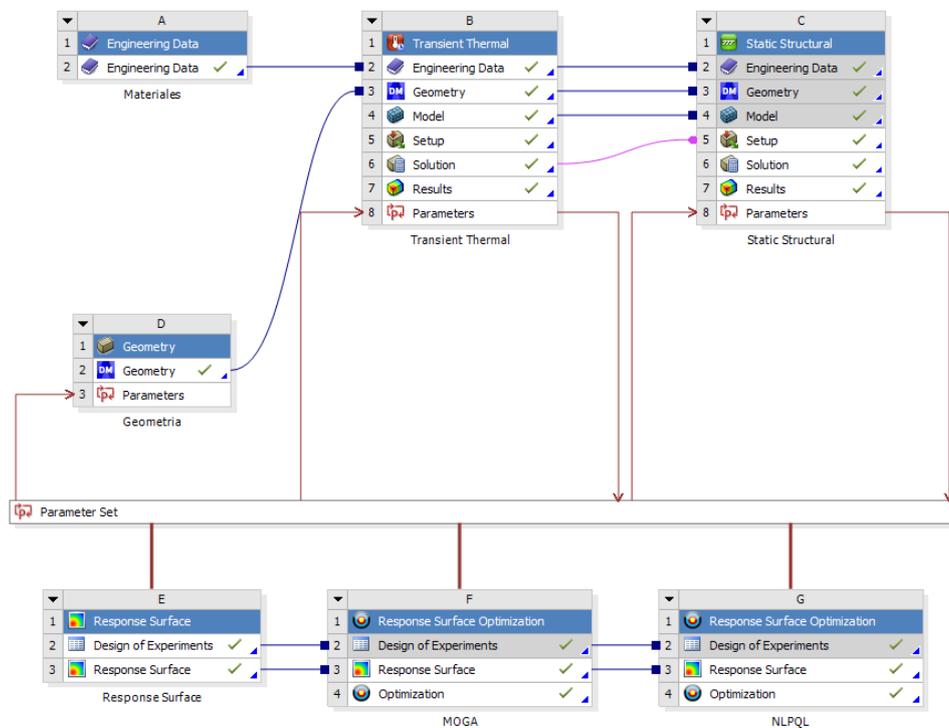


Imagen 50. Secuencia de conexiones del modelo

El siguiente paso del problema, consiste en definir el modelo estático estructural para analizar las tensiones. En lo que respecta a las propiedades mecánicas de los materiales, en este caso se van a emplear las propiedades generales o estándar de los aceros.

Tabla 18. Propiedades mecánicas consideradas para los aceros

Material	Módulo elástico (E), [GPa]	Coefficiente de Poisson (ν)	Coefficiente de dilatación lineal (α), [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
22MnB5 4Cr5MoSiV1	210	0,33	$1,2 \cdot 10^{-5}$

En lo que respecta a las condiciones de contorno, en este caso se ha planteado una situación sencilla, en la que el origen de las tensiones generadas en los utillajes es consecuencia de la restricción a la deformación de los componentes; es decir, no se ha considerado, por ejemplo, la carga de la prensa. Sin embargo, el modelo planteado es suficiente para comparar la idoneidad de diferentes configuraciones de los conductos en lo que se refiere a las tensiones generadas. Con todo ello, a continuación, se explican las cargas y condiciones de contorno consideradas:

- Cargas:
 - Campo de temperaturas importadas desde el modelo térmico.
- Condiciones de contorno:
 - En las caras de contacto de los utillajes con el resto de la prensa, se considera una condición de contorno de empotramiento; es decir, se restringen todos los grados de libertad de desplazamiento y giro.
 - En el plano de simetría, se restringen el grado de libertad de traslación en la dirección perpendicular a dicho plano de simetría (dirección X), así como el giro en la dirección normal (giro en Z). Estas dos condiciones de contorno constituyen la condición de simetría en un modelo bidimensional.
- Contacto entre componentes:
 - Dada la fuerte presión que existe en el contacto entre las piezas como consecuencia de la carga de la prensa, se asume que la fuerza debida a la fricción es muy elevada, y, por lo tanto, que no se pueden dar deslizamientos entre piezas. De este modo, se asume un contacto tipo "Bonded" o unión rígida. Así mismo, si bien esta se trata de una simplificación, es un contacto lineal, lo que reduce significativamente el coste computacional del modelo con respecto a otro tipo de contactos.

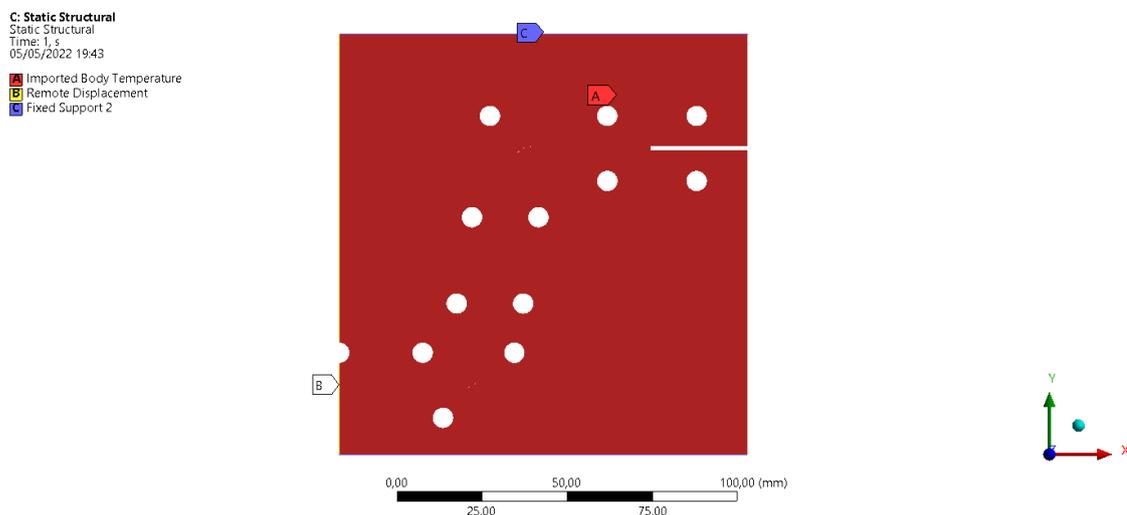


Imagen 51. Cargas y condiciones de contorno del modelo mecánico

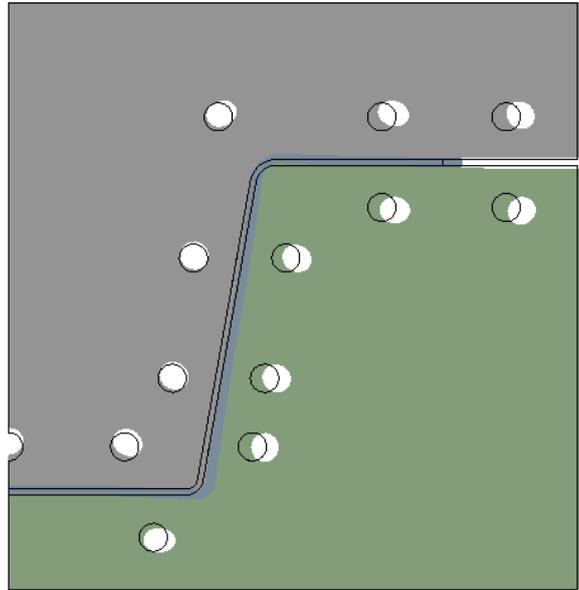


Imagen 52. Deformada (aumentada) del sistema en el modelo estático estructural

Por último, tal y como se ha explicado, la función objetivo a optimizar en este caso es la tensión principal máxima en el contorno de los conductos.

C: Static Structural
 Maximum Principal Stress
 Type: Maximum Principal Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 Max: 240,7
 Min: 0
 05/05/2022 19:40

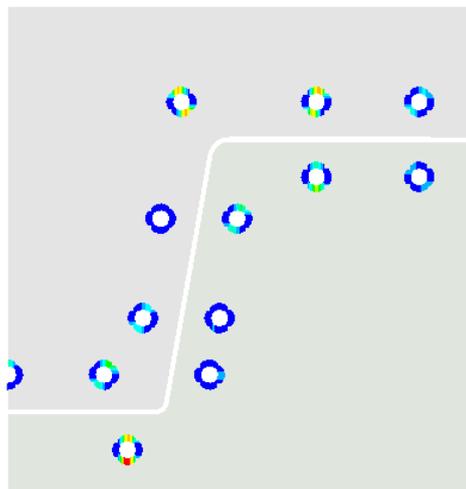
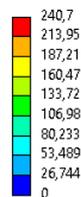


Imagen 53. Medición de tensiones principales máximas en el contorno de los conductos

Así pues, con la salvedad de que en este caso ha sido necesario plantear un modelo estático, estructural además de un térmico transitorio, el procedimiento a seguir para realizar esta optimización es el mismo al explicado para la optimización 1.

12 Ampliación del método - Optimización tridimensional

12.1 Introducción

Hasta ahora, la geometría con la que se ha trabajado en todo momento ha resultado ser lo suficientemente sencilla como para poder plantear la optimización como un problema bidimensional. Sin embargo, para un caso en el que se disponga de una geometría general de los utillajes, no tiene porqué poder realizarse esta simplificación; en dicho caso, habría que realizar el análisis tridimensional del modelo completo.

Bajo esta situación, la metodología propuesta en este proyecto seguiría siendo válida; para ello, simplemente habría que establecer tantos parámetros como fuera necesario para definir completamente la geometría de los conductos en el espacio. Sin embargo, esto presenta varios problemas; por un lado, aumentar el número de parámetros a optimizar, implica un aumento directo en el coste de cálculo de la fase del DOE; un número de parámetros excesivamente elevados produciría un coste de cómputo desproporcionado en esta fase. Adicionalmente, cada punto definido en el DOE requeriría calcular un modelo térmico transitorio de una geometría tridimensional; tal y como ya se ha visto en este trabajo (Tabla 5), esto también resulta en un aumento exponencial del coste computacional. Por último, un incremento en el número de parámetros provocaría que el propio proceso de optimización fuese más complejo: aumentaría el número de combinaciones o interacciones entre parámetros o habría una superficie de respuesta más compleja, entre otros.

Por este motivo, y teniendo presente que dos de los objetivos de este proyecto son la eficiencia de cálculo y el poder aplicar la metodología independientemente de la geometría de los utillajes, se decide plantear una solución a este problema. Para ello, se va a realizar el análisis de una geometría que no puede ser directamente simplificada a una simulación bidimensional. Así pues, la geometría propuesta es la que se muestra en la siguiente imagen.

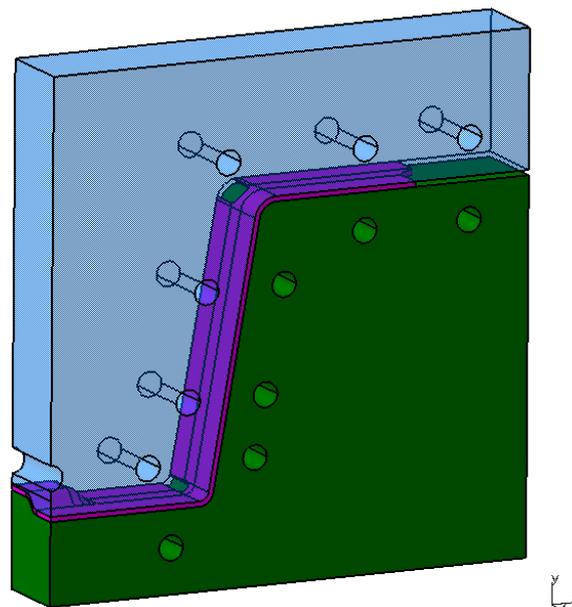


Imagen 54. Geometría para optimización tridimensional

Para la generación de esta geometría se ha partido del modelo mostrado en el punto 11.1 y se ha modificado de modo que no pueda ser simplificado a un problema bidimensional.

12.2 Desarrollo de la solución

Tal y como se ha comentado, plantear directamente la optimización de la geometría tridimensional completa sería muy costoso computacionalmente; tanto, que la metodología propuesta no resultaría ventajosa frente a otros métodos tradicionales.

De este modo, la alternativa que se propone para poder optimizar geometrías tridimensionales de un modo eficiente, es la siguiente: seccionar la geometría por diferentes puntos y optimizar cada una de estas secciones por separado. Por ejemplo, en el caso de la geometría propuesta se estudiarían la primera y última sección; estas se muestran en las siguientes imágenes.

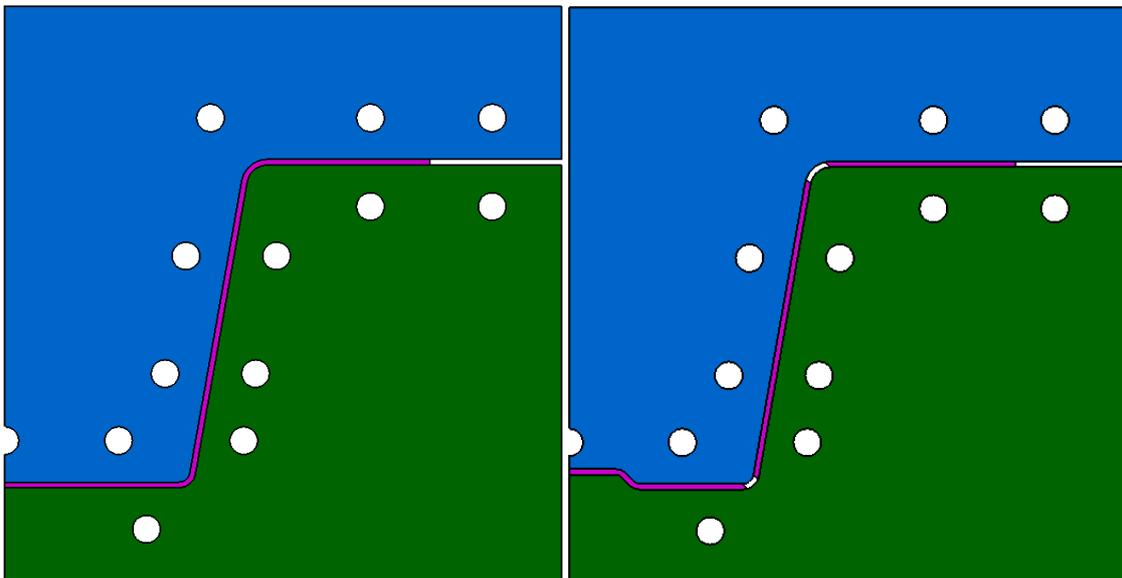


Imagen 55. Sección 1 (izquierda); sección 2 (derecha)

Se observa que la denotada como “Sección 1” coincide con la sección optimizada en el punto 11. Esto permite que se puedan aprovechar los resultados de la sección 1, y solamente quedaría pendiente analizar la “Sección 2”.

Por otro lado, se observa que la geometría planteada sigue manteniendo la simetría descrita en el punto 11.2.2; se ha propuesto de este modo para reducir el coste de cálculo de este ejemplo. Sin embargo, dicha simetría no afecta a la generalidad del método; en el caso de que no exista plano de simetría, se analizaría la sección completa.

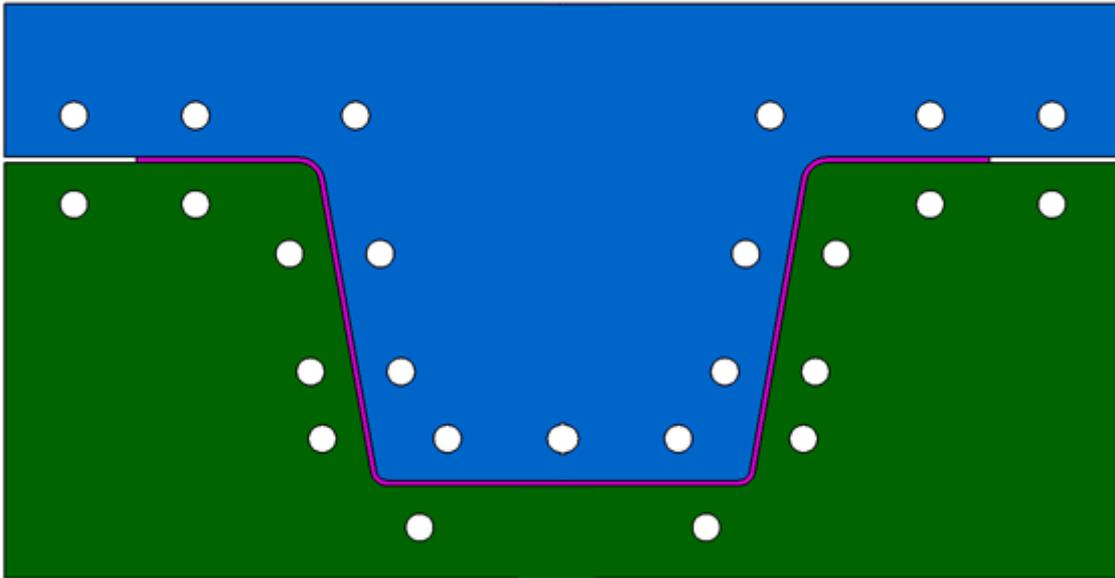


Imagen 56. Planteamiento de la sección completa en el caso de que no exista plano de simetría

En resumen, la estrategia que se propone, consiste en seleccionar diferentes secciones, y analizar cada una de ellas mediante el método definido en el punto anterior. Del mismo modo, cuantas más secciones se seleccionen, mayor será el coste computacional del proceso de optimización completo. Por ello, el coste de este método aumente de forma lineal con respecto al número de secciones consideradas: una optimización de N secciones multiplica el coste de cálculo por N con respecto a una sola sección. Sin embargo, tal y como se ha observado, realizar la optimización directamente sobre la geometría tridimensional aumenta el coste de forma exponencial. Por este motivo, a pesar de que N sea un número elevado, del orden de 10 o 100 secciones diferentes, sigue resultando beneficioso, en cuanto a la eficiencia del método, analizar las secciones por separado.

Así pues, el número de secciones total a escoger, así como su posición, dependerá de la complejidad de la geometría de la pieza. Cuantos más compleja sea, más secciones será necesario analizar de cara a un correcto análisis.

Finalmente, quedaría definir la trayectoria de los conductos a lo largo de todas las secciones estudiadas. Es decir, en la solución óptima de cada una de las secciones, un mismo conducto puede quedar posicionado en coordenadas completamente diferentes. Esto implicaría que dicho conducto no podría ser fabricado por medio de taladrado.

Para ello, en el apartado de Análisis de resultados se van a analizar dos alternativas posibles. La primera consiste en forzar a que un mismo conducto quede alineado a lo largo de todas las secciones optimizadas. Para ello, se va a calcular un valor ponderado para cada una de las variables de diseño, D, H y L.

$$P_j = \sum_{i=1}^N w_{ij} p_{ij} \quad [38]$$

Donde:

- P: denota las variables de diseño; en este caso, D, H y L
- j: referencia a la variable “j”-ésima
- i: referencia a la sección “i”-ésima
- p_{ij} : valor de la variable de diseño p_j en la sección i
- N: número de secciones
- w_{ij} : función de peso

En este caso, la función de peso w_{ij} representa la importancia relativa del parámetro p_{ij} en la sección “i” con respecto al resto de secciones. Es decir, por ejemplo, representa la importancia del diámetro obtenido para el conducto 1 en la sección 1, con respecto al diámetro del mismo conducto en resto de las secciones.

Para calcular el valor de w_{ij} se puede emplear, por ejemplo, la temperatura máxima alcanzada en el contorno de los conductos. De este modo, se tiene que un parámetro será más importante que se cumpla, cuanto mayor sea la temperatura que alcance dicho conducto. Si la temperatura se eleva mucho es debido a que recibe un gran flujo de calor, por lo que interesa mantener el conducto en dicha localización, y ajustar la posición en el resto de secciones. De este modo, siendo $T_{\max ir}$ la temperatura máxima en el contorno del conducto “r” en la sección “i” se propone calcular la función de peso del siguiente modo:

$$w_{ir} = T_{\max ir} * \sum_{n=1}^N \frac{1}{T_{\max nr}} \quad [39]$$

Por otro lado, también se va a estudiar la mejora que aporta en la optimización el emplear unos conductos que pasen a través de las coordenadas y diámetros calculados para cada una de las secciones. Es decir, en este caso, los conductos tendrían que curvarse y ajustar su diámetro para adaptarse y cumplir con el diseño de todas las secciones calculadas. Para ello, la geometría de los conductos se generará mediante curvas de tipo “Spline” o curvas tridimensionales. Así pues, esta solución no podría ser fabricada por medio de técnicas tradicionales, y habría que recurrir a otros métodos más novedosos, como la fabricación aditiva. Sin embargo, el interés de realizar este estudio reside en analizar la máxima capacidad de mejora que se podría llegar a alcanzar.

En cuanto a la optimización a llevar a cabo, esta se va a plantear igual que la denotada como optimización 1; es decir, ajustar los parámetros D, H y L de todos los conductos, considerando únicamente los objetivos referentes a la temperatura de la chapa.

13 Análisis de resultados

13.1 Metodología de análisis

A lo largo de este documento, se han desarrollado un total de 5 optimizaciones, las cuales se recogen en la Tabla 11 y en el punto 12. En este apartado, por un lado, se va a analizar los resultados obtenidos para cada uno de estos casos, y por otro, se van a comparar entre sí.

13.2 Optimización 1

13.2.1 Curva de enfriamiento

En primer lugar, para entender los resultados obtenidos, resulta necesario disponer de más información, además de la temperatura promedio y temperatura máxima de la chapa en el instante final de la simulación. Por dicho motivo a continuación, se compara la evolución de la temperatura máxima de la chapa bajo las cuatro configuraciones obtenidas en el frente de Pareto de la optimización 1. Adicionalmente, se añaden, a modo de referencia, los casos en los que no se dispone de refrigeración en los conductos, así como la solución inicial o de partida.

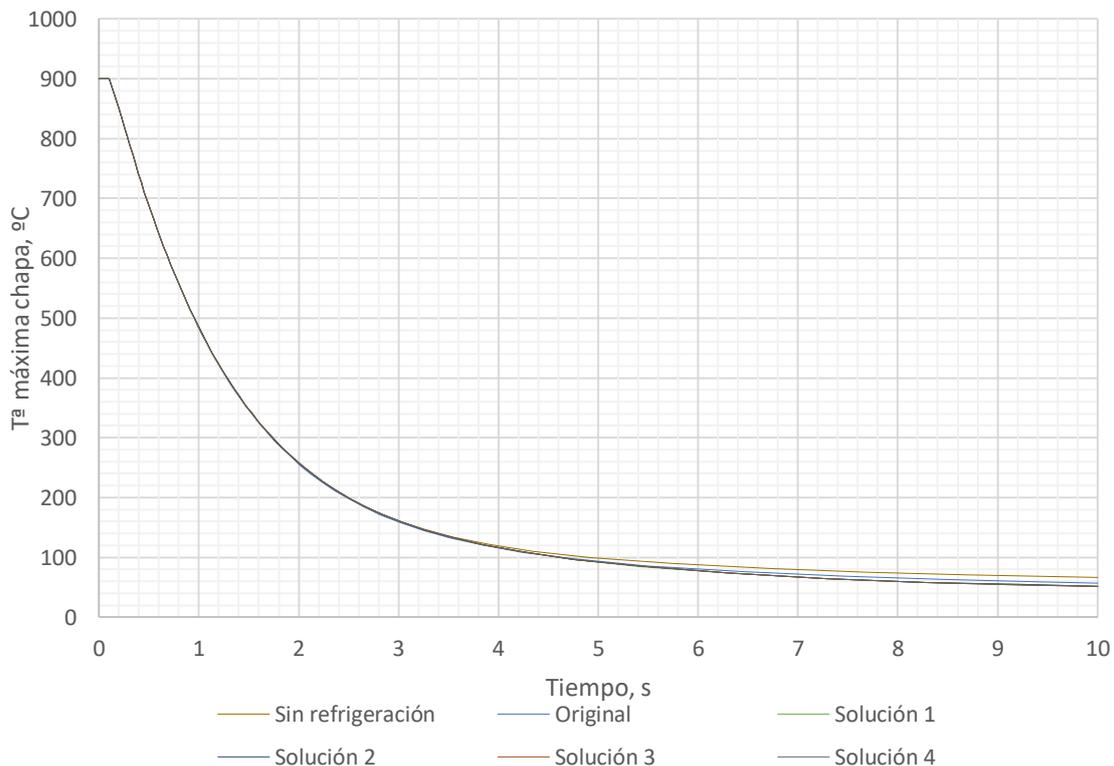


Gráfico 13. Optimización 1. Evolución de la temperatura máxima de la chapa. Comparativa entre soluciones

Tal y como puede observarse en este gráfico, la evolución de todas las curvas es muy similar durante la primera mitad de la simulación, entre el instante inicial y el segundo 5 aproximadamente. Por ello, puede deducirse que, en este caso, en la primera mitad del proceso de estampación, la refrigeración de los utillajes tiene un efecto despreciable. Esto puede interpretarse como consecuencia de diferentes causas. Por un lado, en los utillajes, al considerar la temperatura inicial de estos igual a la del fluido, en el instante inicial no existe ningún gradiente de temperaturas en los utillajes, y, por lo tanto, no existe flujo de calor.

En segundo lugar, la masa de la chapa, con un espesor de 1,2mm, es muy inferior a la de los utillajes. De igual modo, la distancia entre la superficie de los utillajes y la de los conductos es, como mínimo de 6 mm en cualquier punto, por lo que, incluso considerando únicamente este espesor de los utillajes, la masa de la chapa sigue siendo despreciable. Esto implica que, a pesar de que la chapa pueda estar muy caliente, la cantidad de energía térmica que contiene en su interior es mínima; la capacidad calorífica de la chapa es muy pequeña en comparación con los utillajes. Al transmitir esta energía a los utillajes, como estos son significativamente más masivos, pueden distribuir el calor entre un volumen mayor, presentando un calentamiento mínimo.

Esto, a su vez, provoca un gradiente de temperaturas mínimo en los utillajes entre la superficie en contacto con la chapa y la que está en contacto con los conductos de enfriamiento. Consecuentemente, en esta primera fase de enfriamiento, existe un flujo de calor despreciable hacia los conductos. Con todo, puede afirmarse que, durante la primera mitad del proceso de enfriamiento, entorno a los 5 primeros segundos, el enfriamiento de la chapa ocurre exclusivamente por conducción del calor hacia los utillajes, y estos lo disipan gracias a su mayor capacidad calorífica, sin que la refrigeración tenga prácticamente ningún efecto.

Sin embargo, a partir del segundo cinco de la simulación, puede observarse cómo las curvas comienzan a separarse; en los casos en los que no existe refrigeración o esta es más ineficiente, la velocidad a la que disminuye la temperatura es menor en comparación a las soluciones óptimas propuestas. Llegados a este punto, se habrá generado un gradiente térmico en los utillajes entre los conductos y la chapa, de modo que el efecto de la refrigeración comienza a predominar. En aquellos casos en los que se tenga una refrigeración más optimizada, se facilitará el flujo de calor de la chapa a los conductos, permitiendo así una temperatura menor en la chapa.

En las siguientes imágenes se representan los vectores del flujo de calor de la solución inicial para los instantes $t=2s$ y $t=10s$. Analizando el campo vectorial para en el instante de $t=2s$, se observa que el flujo de calor es normal a la superficie de la chapa, y este se distribuye a lo largo del volumen de los utillajes; en esta primera fase, el flujo de calor en el contorno de los conductos es mínimo. Sin embargo, en el caso de $t=10s$, el campo vectorial es completamente distinto; en él, el flujo predominante apunta hacia los conductos. Por lo tanto, se observa de primera mano que, efectivamente, solo es a partir de la segunda mitad del ciclo simulado, cuando la presencia de los conductos resulta ventajosa en la curva de enfriamiento.

B: Transient Thermal
 HF - t=2s
 Type: Total Heat Flux
 Unit: W/mm²
 Time: 2
 Max: 0,74898
 Min: 4,7585e-12
 26/06/2022 13:01

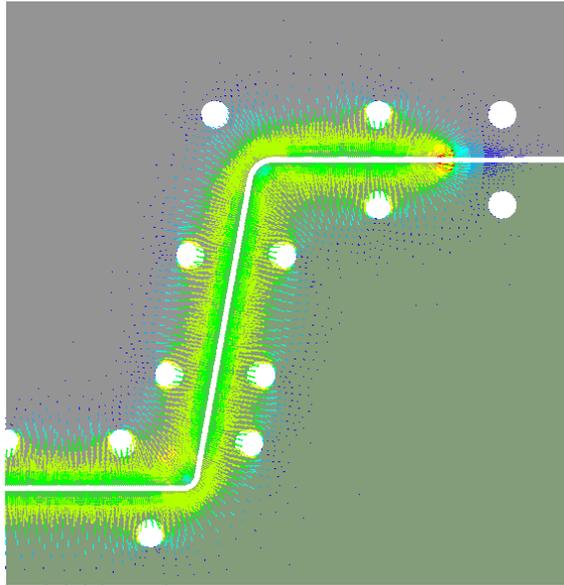
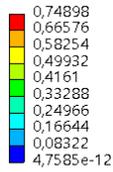


Imagen 57. Campo vectorial del flujo de calor – t=2s

B: Transient Thermal
 HF - t=10s
 Type: Total Heat Flux
 Unit: W/mm²
 Time: 10
 Max: 0,16807
 Min: 4,1044e-5
 26/06/2022 13:02

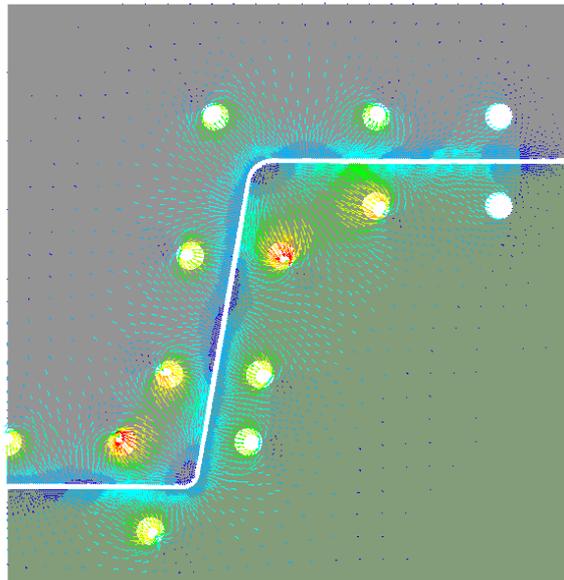
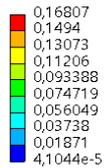


Imagen 58. Campo vectorial del flujo de calor – t=10s

Adicionalmente, es importante destacar que, para cuando los efectos de la refrigeración son notorios, la temperatura de la chapa ha descendido hasta unos 100°C. Por dicho motivo, en este caso, la capacidad de mejora de los resultados con respecto a los iniciales es limitada.

13.2.2 Estado estacionario

Hasta ahora, todas las simulaciones que se han llevado a cabo han considerado que, en el instante inicial, la temperatura de los utilajes es completamente homogénea y que estos se encuentran a 22°C, la misma temperatura que las del fluido refrigerante. Esto solamente es cierto cuando los utilajes han estado en reposo un tiempo lo suficientemente prolongado como para que las temperaturas hayan vuelto a homogeneizarse desde la última estampación realizada.

Sin embargo, en un proceso industrial real, lo habitual es realizar estampaciones de forma continua; es decir, inmediatamente tras abrir la prensa para retirar la pieza recién conformada, introducir de nuevo una chapa caliente, para, a continuación, estamparla y conformarla. Así pues, si bien el modelo térmico empleado hasta ahora puede resultar útil para comparar diferentes configuraciones de forma cualitativa, no es capaz de reflejar correctamente lo que ocurre en un proceso de estampación continuo. A medida que van realizándose estampaciones de forma sucesiva, los utillajes van calentándose progresivamente, y, consecuentemente, alterando el modo en el que se transmite el calor a través de ellos. Al cabo de un tiempo determinado, tras realizar un cierto número de estampaciones, se alcanza el equilibrio entre el calor aportado por la chapa y el desalojado por los conductos; en dicho caso, puede decirse que se ha alcanzado el estado estacionario. En esta situación, los utillajes tendrán la misma temperatura inicial y la misma variación de temperatura a lo largo de todos los ciclos.

Así pues, para comparar los diferentes resultados obtenidos, resulta conveniente estudiar la capacidad de enfriamiento en el estado estacionario, ya que este será el modo de trabajo habitual de los utillajes. Para ello, se han simulado 10 ciclos de estampación consecutivos con unas condiciones de contorno idénticas a las empleadas en el modelo desarrollado para la optimización (11.2). En este caso, tras acabar un ciclo de 10s, la temperatura de la chapa se vuelve a elevar inmediatamente hasta 900°C, y se deja enfriar otros 10 segundos. A continuación, se muestra una gráfica en la que se observa la evolución de la temperatura máxima de los utillajes.

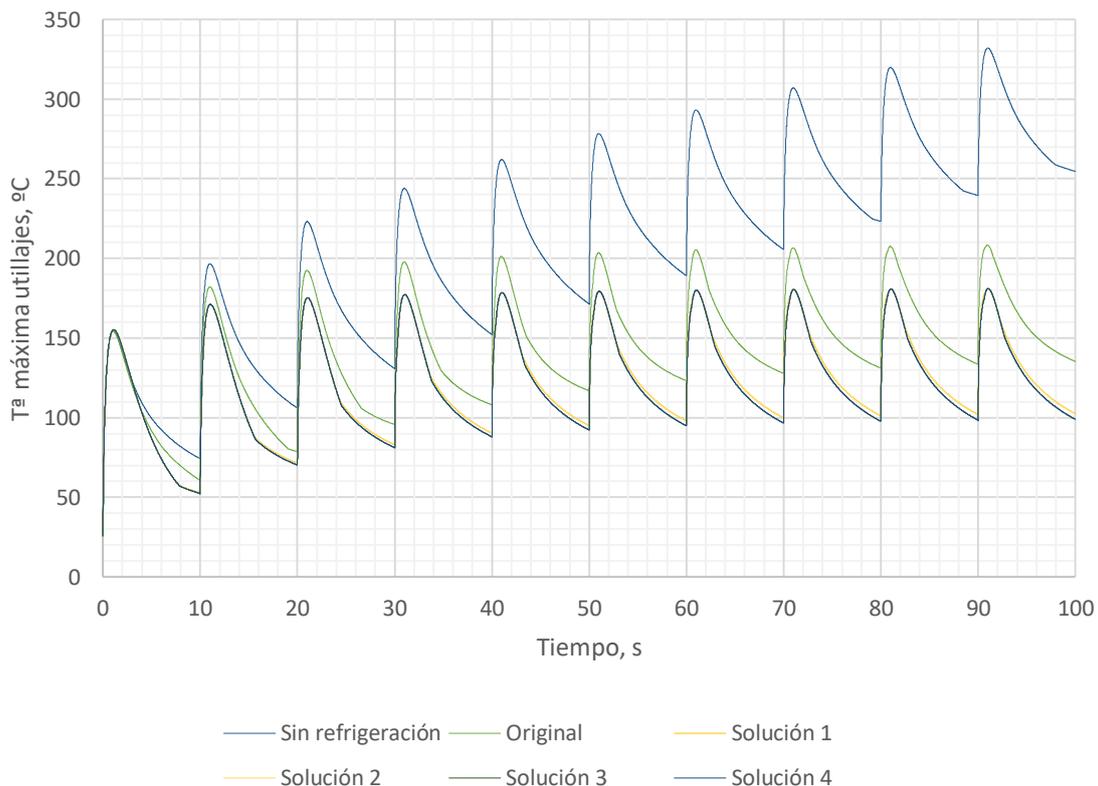


Gráfico 14. Optimización 1. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima en los utillajes

Puede observarse que en el caso de referencia en el que no existe refrigeración, la temperatura máxima de los utillajes no llega a un rango estacionario; esto es debido a que, al no contemplar en la simulación ningún mecanismo de pérdida de energía, la temperatura de los

utillajes aumentará hasta alcanzar la temperatura máxima de la chapa, 900°C. En el resto de casos, en cambio, puede observarse cómo, a partir del sexto ciclo, la temperatura máxima que alcanzan los utillajes es aproximadamente la misma en los ciclos sucesivos: se alcanza un estado estacionario. También cabe destacar que las curvas de las soluciones 1 y 2 son prácticamente indistinguibles entre sí en la gráfica; lo mismo ocurre con las soluciones 3 y 4. A continuación, se recoge una tabla en la que se resumen los datos más representativos de esta gráfica, donde se han marcado en color verde los mejores resultados.

Tabla 19. Optimización 1. Resumen de temperaturas de los utillajes en estado estacionario

Caso	Temperatura máxima utillajes, [°C]	Temperatura final utillajes, [°C]
Sin enfriamiento	332,05	254,65
Original	208,32	135,32
Solución 1	180,96	102,51
Solución 2	180,93	102,48
Solución 3	181,05	98,96
Solución 4	181,03	98,96

A partir de estos resultados, por un lado, se observa que en las cuatro soluciones que conforman el frente de Pareto, la temperatura máxima que se alcanza en los utillajes es unos 30°C menor a la solución original. Por otro lado, también se observa que, en ninguno de los casos, la temperatura final de los utillajes es cercana a 22°C; es decir, se confirma que el campo térmico de los utillajes en estado estacionario es diferente al supuesto en el modelo empleado para realizar la optimización. Por dicho motivo, de cara a poder seleccionar una u otra solución, resulta conveniente estudiar las temperaturas de la chapa en estado estacionario.

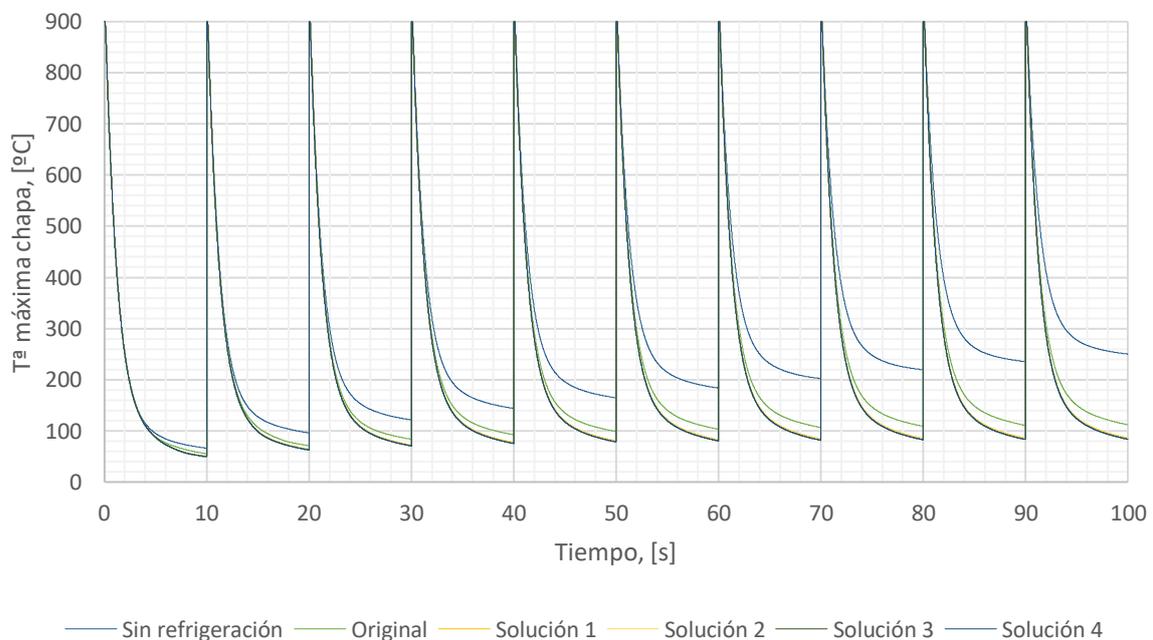


Gráfico 15. . Optimización 1. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima de la chapa

Para poder comparar cuantitativamente los resultados obtenidos, a continuación, se recogen la temperatura máxima y promedio de la chapa en el instante final de la simulación, es decir, al cabo de 10 ciclos. Adicionalmente, con objeto de ayudar a extraer conclusiones, se incluye el tiempo, en segundos, que la chapa tarda en bajar desde los 900°C hasta un valor determinado. La temperatura máxima de la chapa al final del proceso de estampación depende de las necesidades del fabricante, pero en cualquier caso debe ser lo suficientemente baja como para garantizar el temple del acero. En este caso, dicho valor se ha considerado en 200°C para el último ciclo simulado. De este modo, $t_{200^{\circ}\text{C}}$, [s] representa el tiempo que tarda en disminuir la temperatura máxima de la chapa de 900°C a 200°C en el último ciclo de estampación simulado.

Tabla 20. Optimización 1. Resumen de resultados en la chapa en estado estacionario

Caso	Temperatura máxima, [°C]	Temperatura promedio, [°C]	$t_{200^{\circ}\text{C}}$, [s]
Sin enfriamiento	250,01	207,07	-
Original	111,94	84,35	3,274
Solución 1	86,20	61,94	2,884
Solución 2	86,19	61,97	2,884
Solución 3	83,57	62,31	2,854
Solución 4	83,57	62,30	2,854

Se observa que, en la solución original, la temperatura máxima de la chapa es del orden de 30°C superior y la promedio 20°C superior a las calculadas en las soluciones del frente de Pareto. Tal y como se ha comentado, esta diferencia se debe a que, las diferentes configuraciones de los conductos, provocan diferentes campos térmicos estacionarios en los utillajes. Cuanto mejor sea la capacidad de enfriamiento de los conductos, menor será la temperatura de los utillajes durante el proceso en estado estacionario, y, consecuentemente, mayor será su capacidad para enfriar rápidamente la chapa.

13.2.3 Diferencia de temperaturas en la chapa

Otro aspecto importante a considerar a la hora de evaluar la idoneidad de los resultados es la diferencia de temperaturas en el interior de la chapa; es decir, la diferencia entre la temperatura máxima y mínima que presenta la chapa en un determinado instante. Como ya se ha explicado, este parámetro es especialmente importante ya que afecta a las tensiones residuales que se puedan generar en el interior de la chapa: un enfriamiento no homogéneo provoca tensiones residuales internas en la chapa, induciendo una deformación, o incluso o una reducción de la capacidad resistente del componente fabricado. Por dicho motivo, interesa que la diferencia de temperaturas entre dos puntos cualesquiera de la chapa sea lo menor posible, siendo un valor de referencia que se suele tomar para estos casos de 50°C [1]. A continuación, se muestra una gráfica que representa la evolución de la diferencia de temperaturas en el interior de la chapa a lo largo de la simulación.

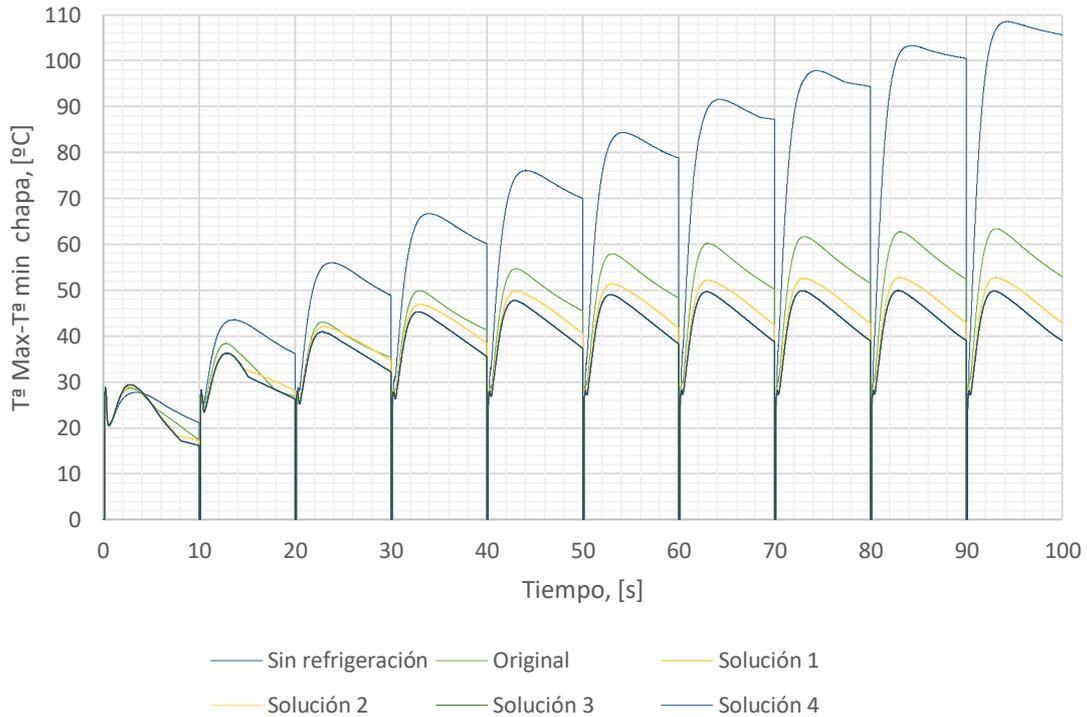


Gráfico 16. Optimización 1. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la diferencia de temperatura de la chapa

El valor máximo de esta gráfica, para cada curva, se recoge en la siguiente tabla:

Tabla 21. Optimización 1. Diferencia máxima de temperaturas en la chapa

Caso	Diferencia máxima de temperatura, [°C]
Sin enfriamiento	108,49
Original	63,40
Solución 1	52,73
Solución 2	52,70
Solución 3	49,92
Solución 4	49,91

Cuanto mayor es la eficiencia de los conductos de enfriamiento, menor es el gradiente de temperaturas en el interior de la chapa. De este modo, tanto en el caso de sin enfriamiento como en el caso original, la diferencia de temperaturas resulta excesiva y existiría riesgo de fabricar piezas con fallos. En el resto de casos, para las cuatro soluciones dadas, se observa que, si bien las dos primeras exceden el objetivo de 50°C, solo lo hacen en un 5%; por lo tanto, si bien en este aspecto las mejores configuraciones son la 3 y la 4, las soluciones 1 y 2 pueden considerarse igualmente válidas.

13.2.4 Elección de la solución

Llegados a este punto, se han obtenido una serie de nuevos parámetros que permiten caracterizar mejor cada una de las soluciones del frente de Pareto. A continuación, se resumen todos ellos en una tabla.

- A: temperatura máxima de la chapa al finalizar 1 ciclo, [°C]
- B: temperatura promedio de la chapa al finalizar 1 ciclo, [°C]
- C: temperatura máxima de la chapa al cabo de 10 ciclos (estado estacionario), [°C]
- D: temperatura promedio de la chapa al cabo de 10 ciclos (estado estacionario), [°C]
- E: tiempo necesario hasta descender a los 200°C en la chapa en el décimo ciclo, [s]
- F: temperatura máxima de los utillajes (estado estacionario), [°C]
- G: temperatura máxima final de los utillajes (estado estacionario), [°C]
- H: diferencia de temperatura máxima en la chapa en un instante dado (estado estacionario), [°C]

Tabla 22. Optimización 1. Resumen de resultados

Caso	A	B	C	D	E	F	G	H
Sin enfria.	66,85	61,66	250,01	207,07	-	332,05	254,65	108,49
Original	55,03	52,03	111,94	84,35	3,27	208,32	135,32	63,40
Solución 1	52,01	46,58	86,20	61,94	2,88	180,96	102,51	52,73
Solución 2	52,01	46,59	86,19	61,97	2,88	180,93	102,48	52,70
Solución 3	51,40	46,67	83,57	62,31	2,85	181,05	98,96	49,92
Solución 4	51,40	46,67	83,57	62,30	2,85	181,03	98,96	49,91

Se tienen 8 parámetros para caracterizar cada una de las soluciones; esto implica que haría falta un diagrama de 8 dimensiones para poder dibujar el frente de Pareto. Por lo tanto, en este caso, solamente se puede calcular dicho frente, es decir, no se puede dibujar. Sin embargo, atendiendo a las soluciones indicadas en verde en la tabla, se observa que cada solución destaca en, al menos un parámetro. Por dicho motivo, en este caso, las cuatro soluciones siguen conformando el frente de Pareto.

Con todo ello, se procede a calcular, mediante el código desarrollado en Matlab, el frente de Pareto de las 4 soluciones, considerando los 8 parámetros de la tabla anterior. Finalmente, empleando la metodología de selección del punto del frente de Pareto, se selecciona la mejor de las cuatro alternativas. A partir de este análisis, se obtiene que la Solución 4 es la configuración óptima para la optimización 1.

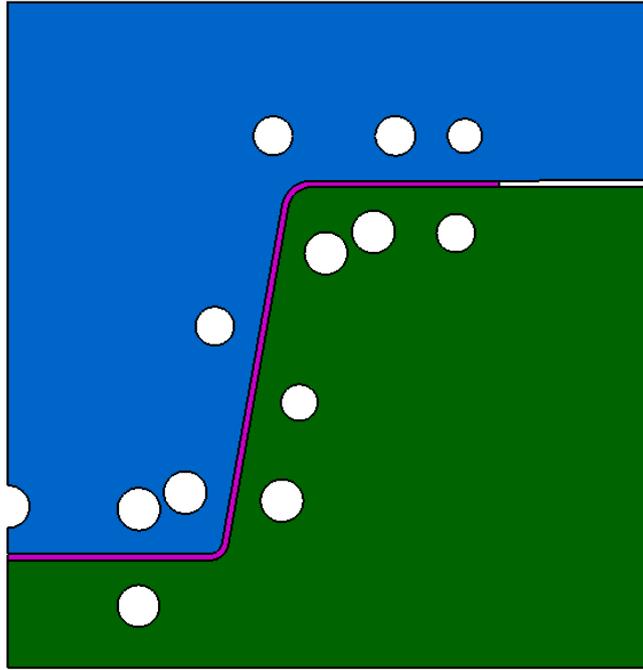


Imagen 59. Resultado de la Optimización 1

13.3 Optimización 2

Tanto para esta optimización como para las restantes, se va a seguir la misma metodología de análisis de los resultados que se ha empleado para el caso de la optimización 1.

13.3.1 Frente de Pareto

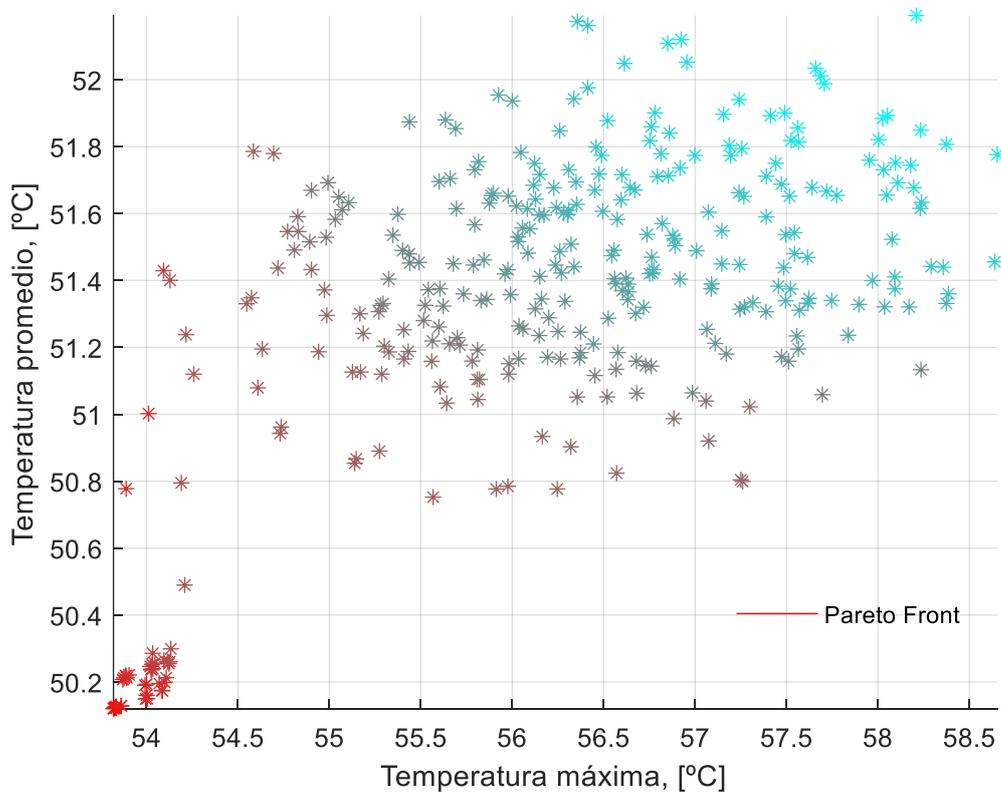


Imagen 60. Optimización 2. Frente de Pareto

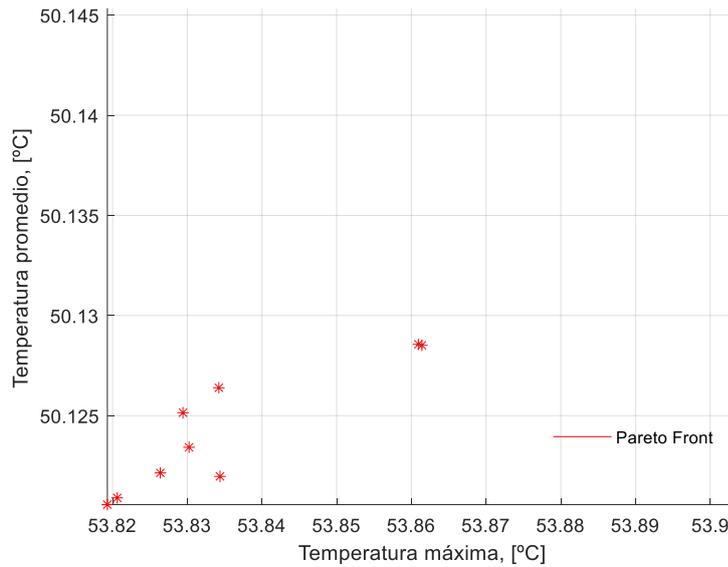


Imagen 61. Optimización 2. Detalle del frente de Pareto

En este caso, se tiene un frente de Pareto constituido por un único punto; por lo tanto, dicho punto será la solución para esta optimización; es decir, se trata de un caso particular en el que una misma solución es la mejor en todas las funciones objetivo. Así pues, las coordenadas de los conductos para este resultado son las siguientes.

Tabla 23. Optimización 2. Cotas de la configuración óptima

Configuración	Solución 1
Temperatura máxima, [°C]	53,82
Temperatura promedio, [°C]	50,12
H2	24,75
H3	33,00
H4	38,86
H5	49,77
H6	70,14
H7	84,01
H8	26,25
H9	51,17
H10	54,62
H11	59,50
H12	68,28
H13	83,09

13.3.2 Curva de enfriamiento

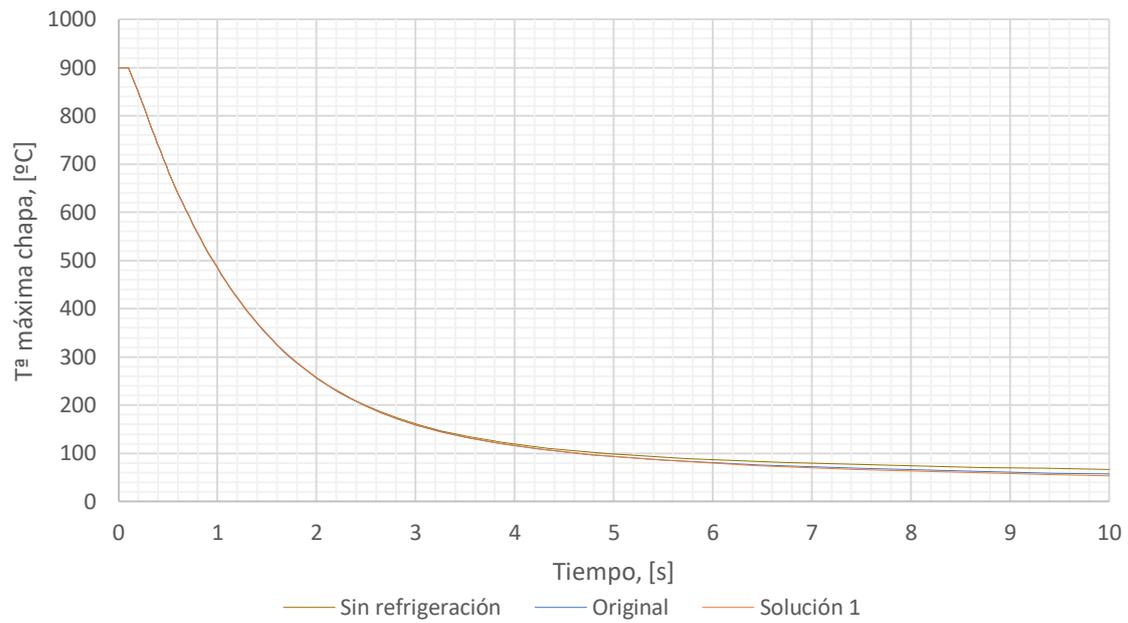


Gráfico 17. Optimización 2. Evolución de la temperatura máxima de la chapa. Comparativa entre soluciones

13.3.3 Estado estacionario

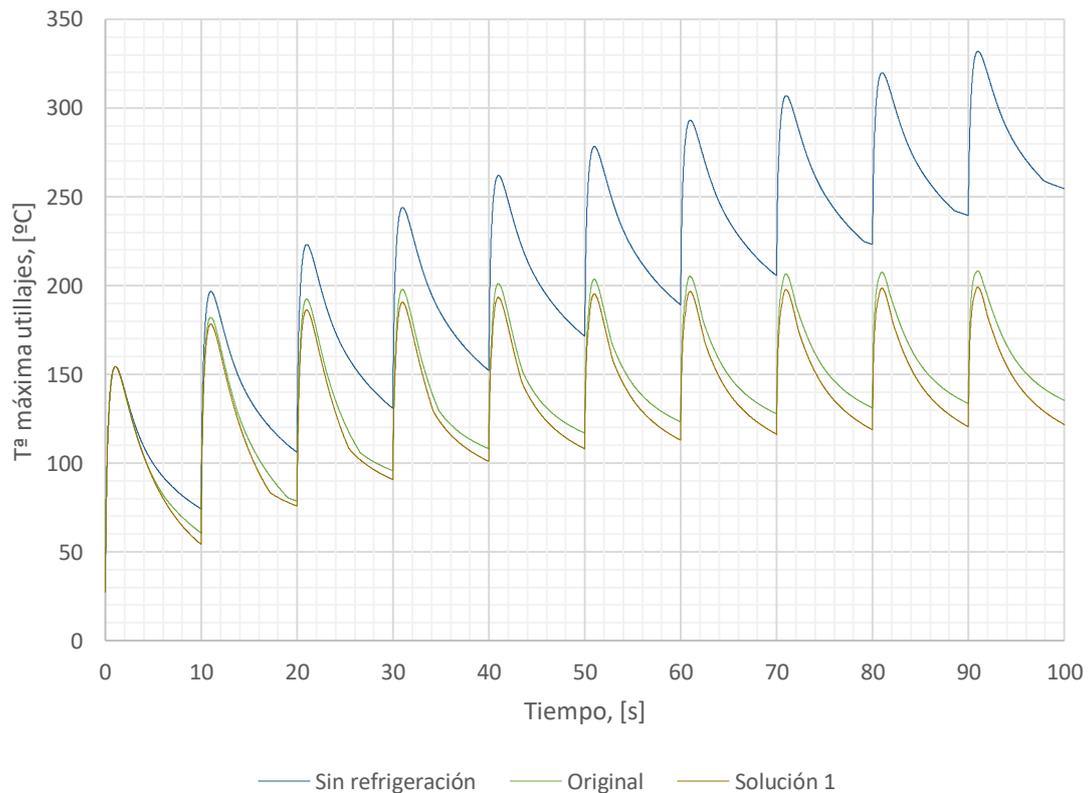


Gráfico 18. Optimización 2. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima en los utiliajes

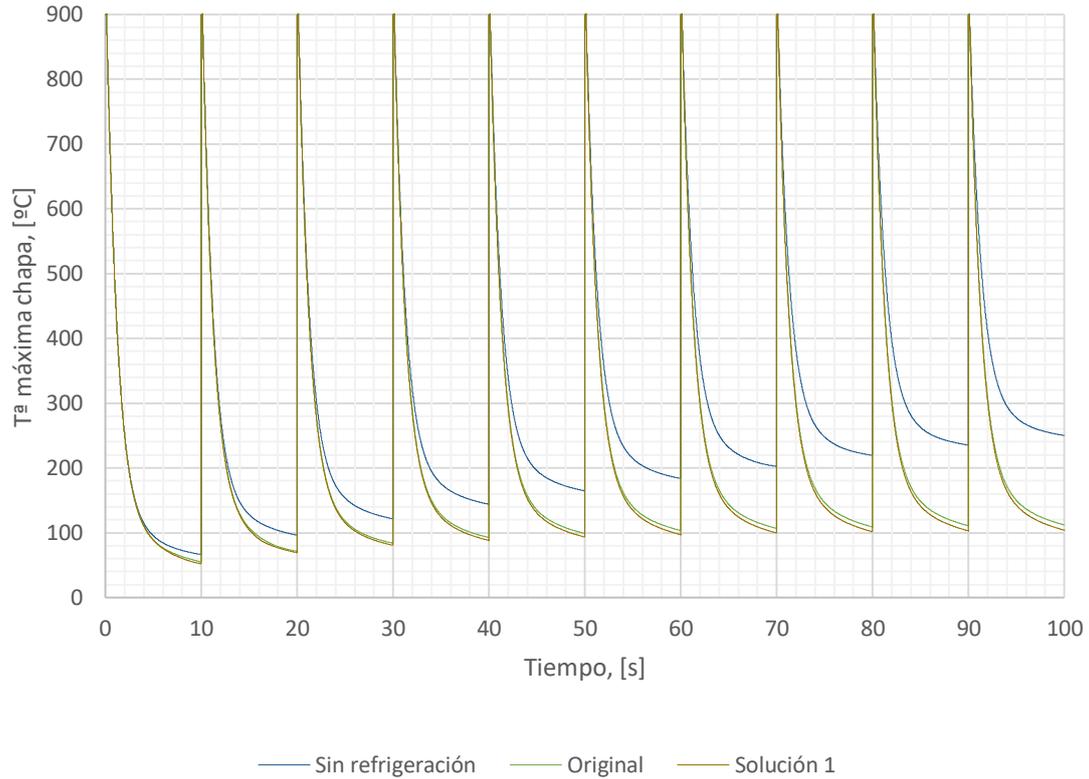


Gráfico 19. Optimización 2. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima de la chapa

13.3.4 Diferencia de temperaturas en la chapa

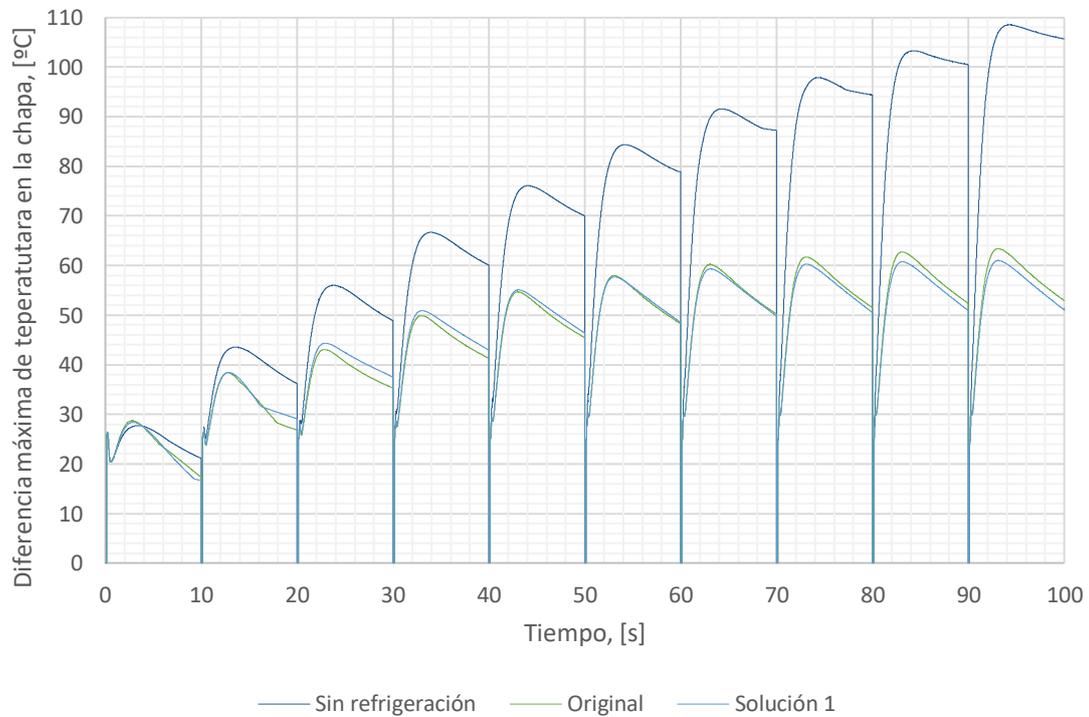


Gráfico 20. Optimización 2. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la diferencia de temperatura de la chapa

13.3.5 Elección de la solución

En este caso, debido a que el frente de Pareto es constituido por un solo punto, este resulta ser directamente el resultado de la optimización 2. Así pues, a continuación, se muestra la tabla en la que se resumen los resultados para dicha optimización.

Tabla 24. Optimización 2. Resumen de resultados

Caso	A	B	C	D	E	F	G	H
Original	55,03	52,03	111,94	84,35	3,27	208,32	135,32	63,40
Solución 1	53,82	50,12	105,99	78,86	3,13	199,15	122,44	60,99

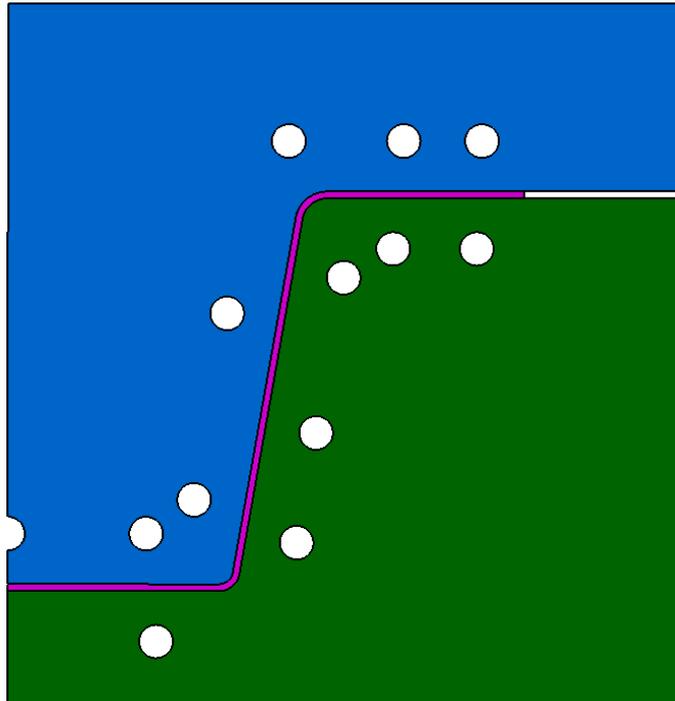


Imagen 62. Resultado de la Optimización 2

13.4 Optimización 3

13.4.1 Frente de Pareto

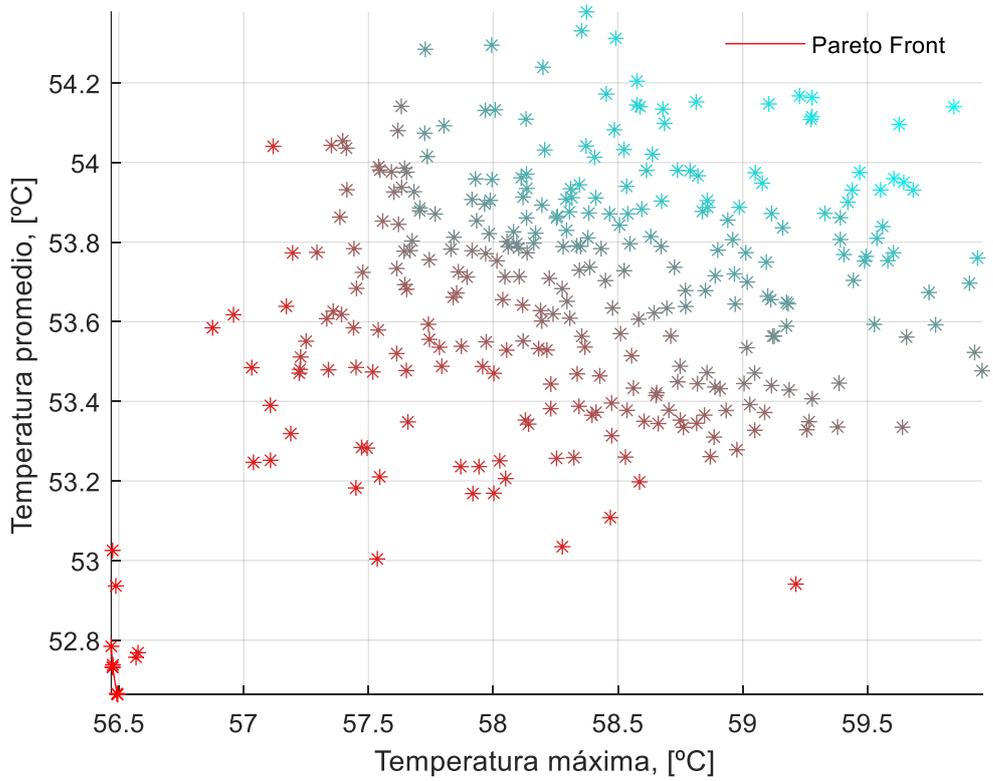


Imagen 63. Optimización 3. Frente de Pareto

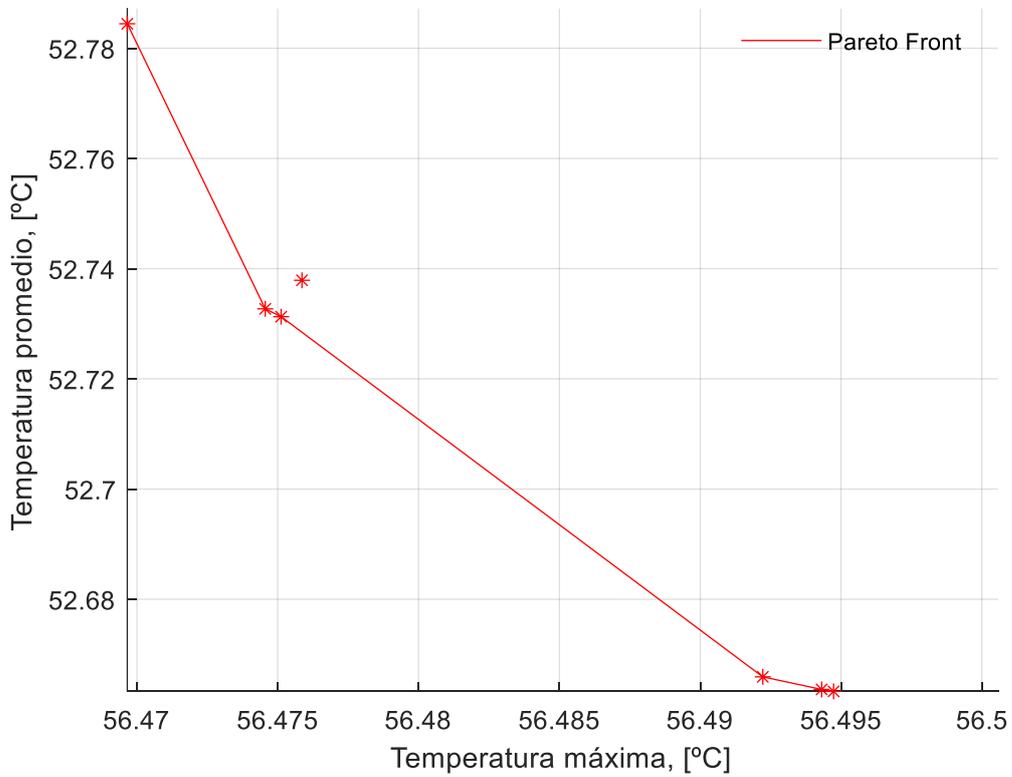


Imagen 64. Optimización 3. Detalle del frente de Pareto

En este caso, el frente de Pareto resulta estar constituido por 6 configuraciones diferentes de los conductos.

Tabla 25. Cotas de las configuraciones óptimas de la optimización 3

Configuración	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6
Temperatura máxima, [°C]	56,47	56,48	56,47	56,49	56,49	56,49
Temperatura promedio, [°C]	52,78	52,73	52,73	52,66	52,66	52,67
H2	24,74	24,75	24,75	24,75	24,75	24,75
H3	31,01	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
H4	37,66	37,50	37,50	37,53	37,53	37,53
H5	44,86	45,11	45,06	44,40	44,27	44,21
H6	65,95	66,20	66,12	63,50	63,50	63,39
H7	89,39	89,14	89,14	84,14	84,14	84,14
H8	29,09	28,84	28,84	27,43	27,43	27,49
H9	51,87	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00
H10	54,55	54,80	54,80	54,58	54,58	54,58
H11	60,84	61,00	61,00	60,93	60,93	60,93
H12	63,04	63,00	63,00	63,00	63,00	63,00
H13	81,46	81,21	81,21	80,92	80,92	80,92

13.4.2 Curva de enfriamiento

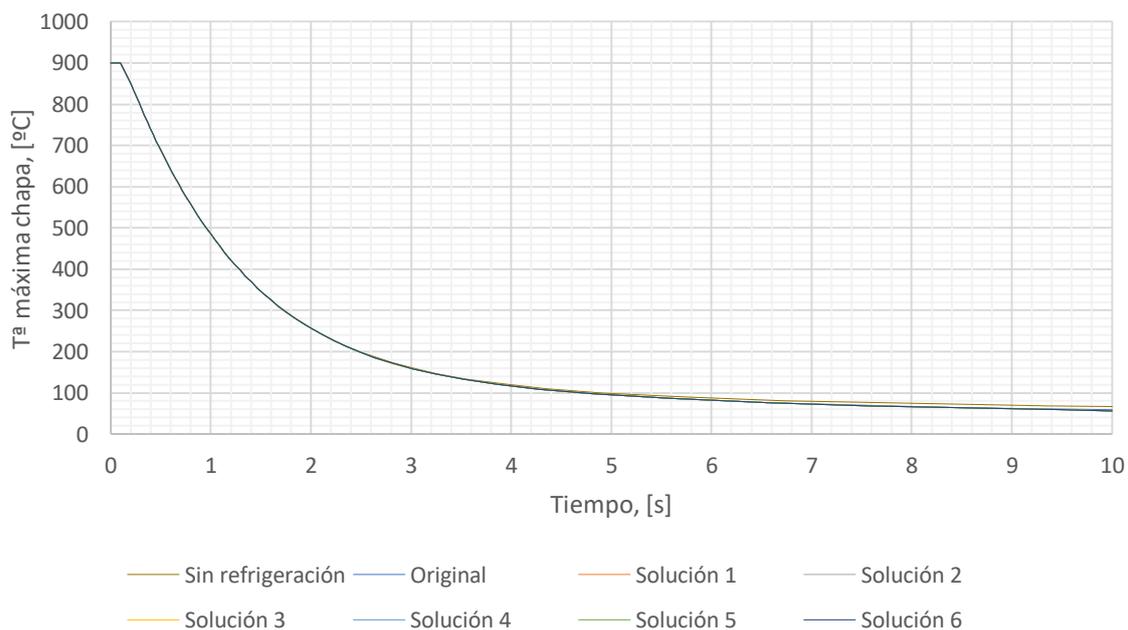


Gráfico 21. Optimización 3. Evolución de la temperatura máxima de la chapa. Comparativa entre soluciones

13.4.3 Estado estacionario

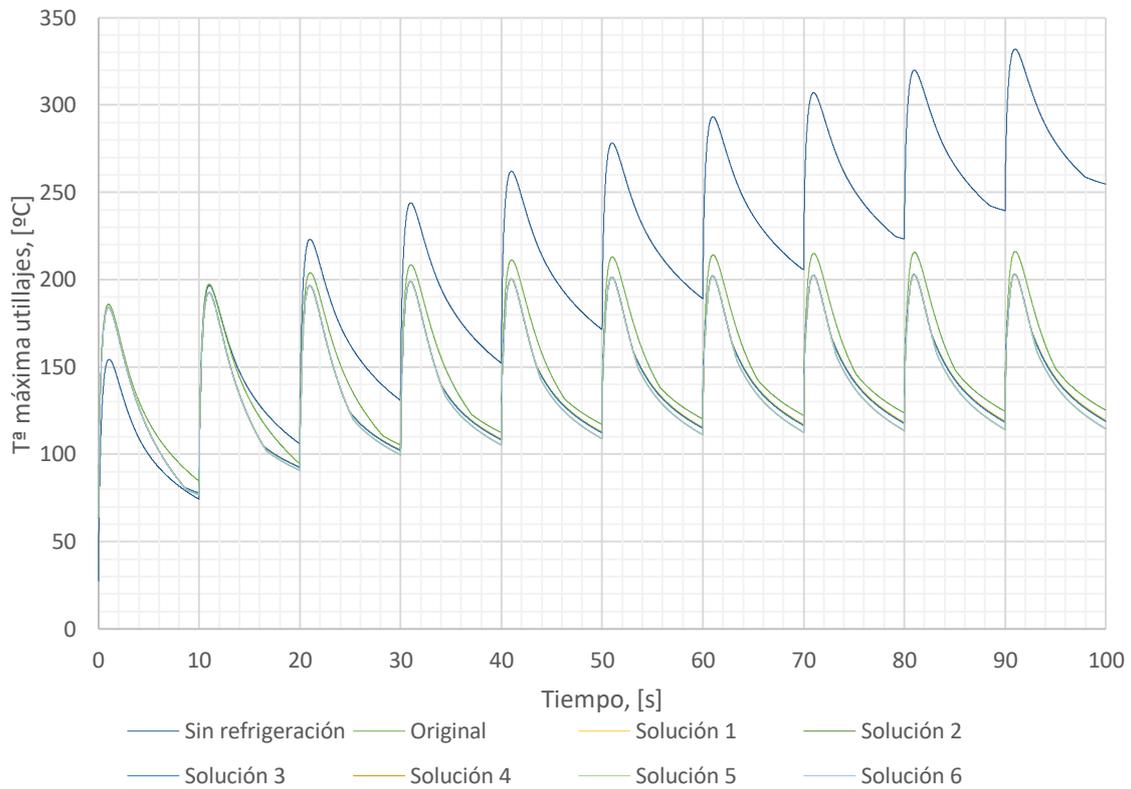


Gráfico 22. Optimización 3. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima en los utiliajes

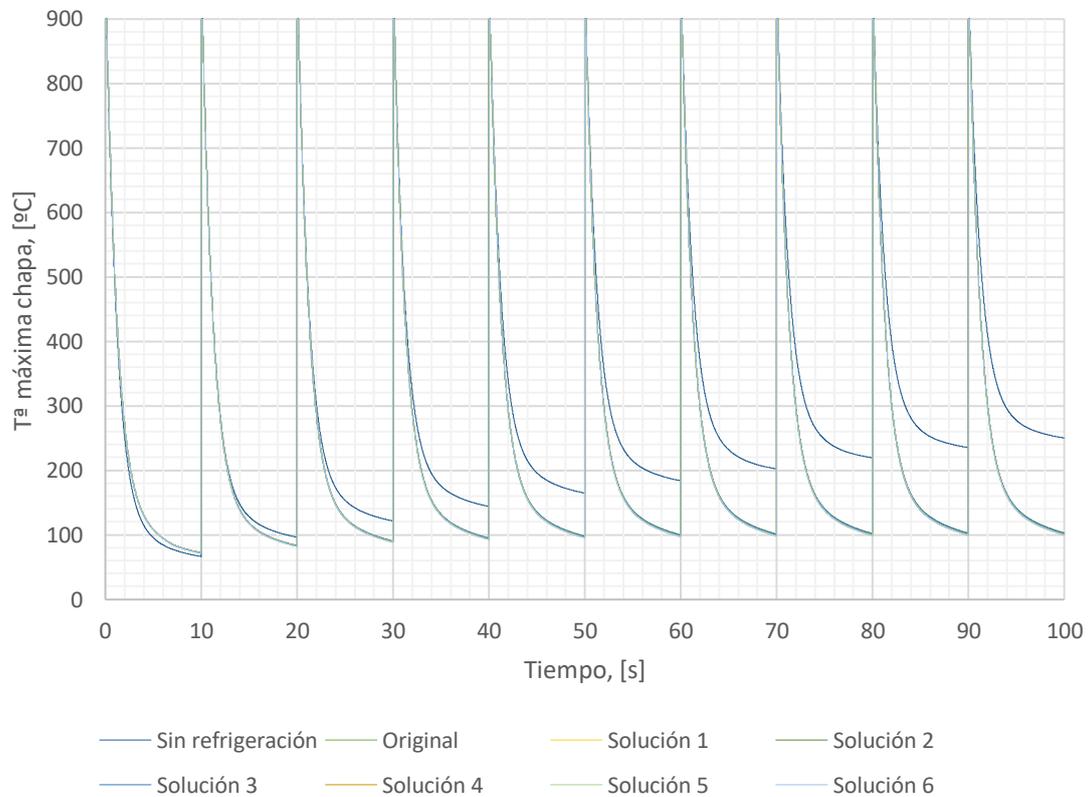


Gráfico 23. Optimización 3. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima de la chapa

13.4.4 Diferencia de temperaturas en la chapa

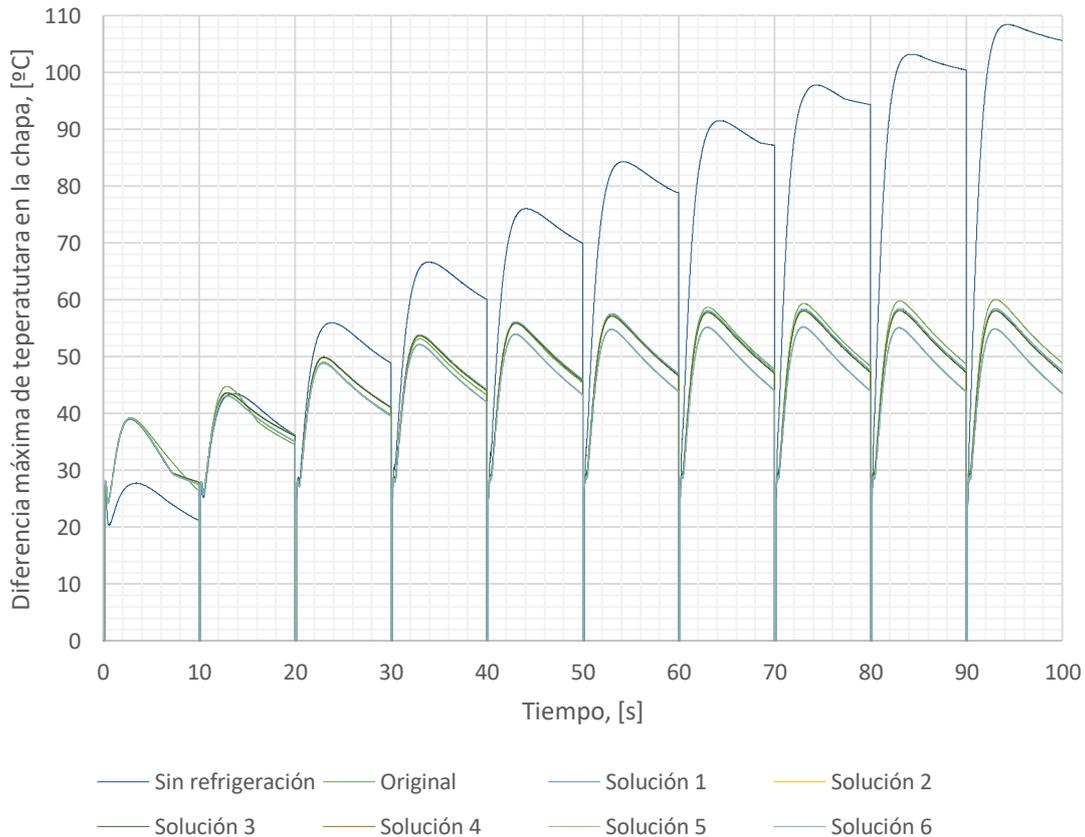


Gráfico 24. Optimización 3. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la diferencia de temperatura de la chapa

13.4.5 Elección de la solución

Tabla 26. Optimización 3. Resumen de resultados

Caso	A	B	C	D	E	F	G	H
Original	58,50	54,69	107,85	87,70	3,19	216,11	125,24	60,09
Solución 1	56,47	52,78	102,85	77,11	3,11	203,24	119,61	58,50
Solución 2	56,48	52,73	102,41	76,79	3,10	203,07	118,91	58,18
Solución 3	56,47	52,73	102,41	76,80	3,10	203,11	118,91	58,15
Solución 4	56,49	52,66	99,89	76,28	3,06	202,90	114,51	55,22
Solución 5	56,49	52,66	99,89	76,28	3,06	202,90	114,51	55,19
Solución 6	56,49	52,67	100	76,31	3,06	202,94	114,69	55,28

En esta tabla se observa que la optimización 5 destaca en la mayoría de los parámetros, por lo tanto, cabría esperar que fuese la mejor solución. Así pues, al emplear la metodología de cálculo definida para seleccionar un punto del frente de Pareto, efectivamente, la solución 5 resulta ser mejor para la optimización 3.

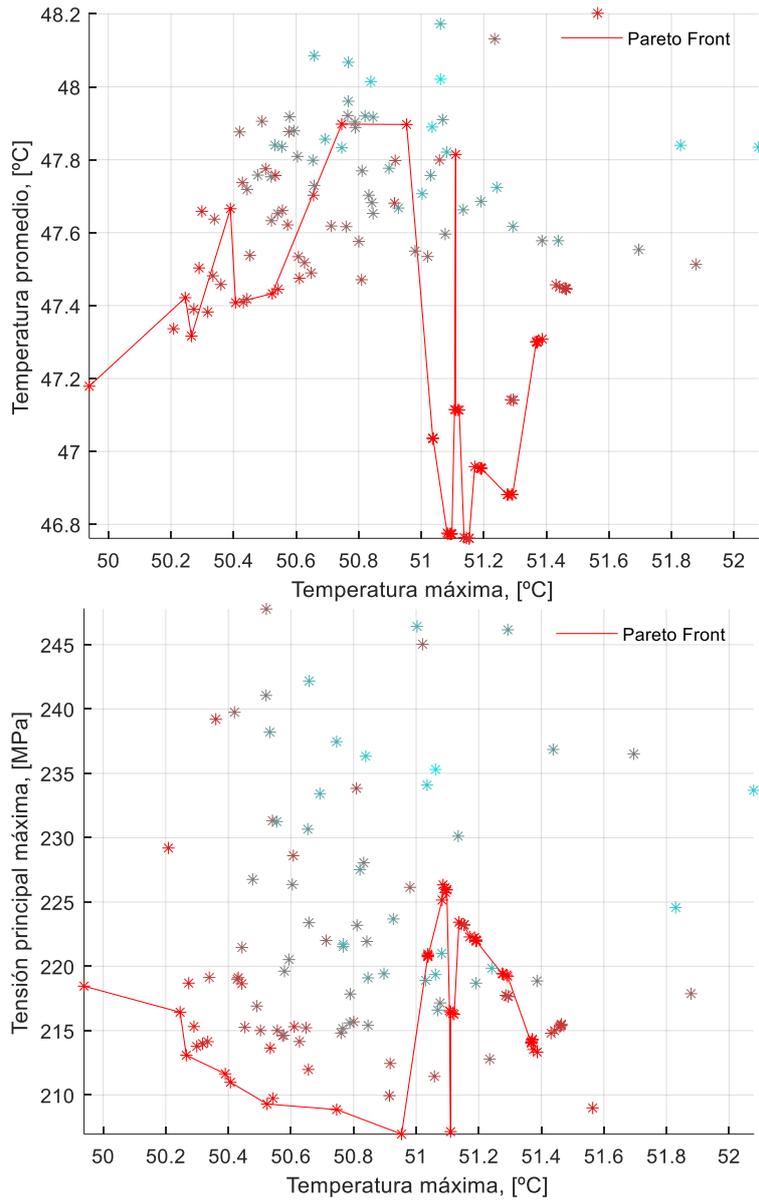


Imagen 66. Optimización 4 - Proyección bidimensional del frente de Pareto

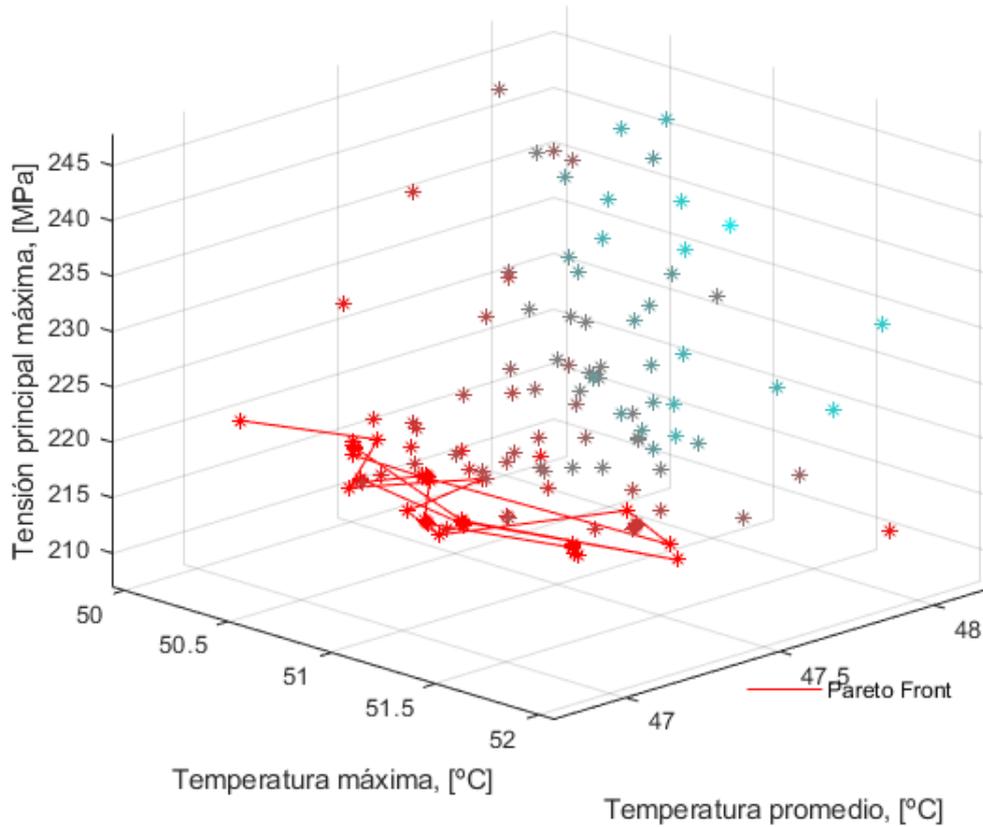


Imagen 67. Optimización 4 - Representación tridimensional del frente de Pareto

13.5.2 Análisis de parámetros adicionales

Debido a que se dispone de un elevado número de soluciones posibles, resulta poco práctico trabajar con las gráficas empleadas en los puntos anteriores. Por dicho motivo, en este caso, se procede directamente con el análisis de los parámetros que ayudan a complementar la información de cada solución. De igual modo, los puntos estudiados son los mismos a los mostrados en el punto 13.2.4, donde se incluye el parámetro I, tensión principal máxima en el contorno de los conductos (estado estacionario), [MPa].

Tabla 27. Optimización 4. Resumen de resultados

Caso	A	B	C	D	F	G	H	I
Solución 1	50,75	47,90	80,67	69,32	186,81	85,25	46,11	265,11
Solución 2	50,95	47,90	83,36	69,98	187,77	91,15	49,75	271,83
Solución 3	50,41	47,41	81,54	67,80	185,79	91,07	47,50	262,09
Solución 4	50,27	47,32	80,69	67,55	186,18	88,95	47,21	262,42
Solución 5	51,11	47,81	82,90	68,84	186,37	90,03	47,97	270,76
Solución 6	49,94	47,18	78,21	66,95	185,23	85,96	44,57	261,08
Solución 7	50,25	47,42	79,71	67,74	185,83	86,78	45,76	261,25
Solución 8	50,39	47,67	80,53	68,66	186,27	86,93	46,66	257,84
Solución 9	50,52	47,43	81,16	67,91	185,62	88,05	47,61	264,47
Solución 10	51,37	47,30	78,07	67,29	184,37	82,63	44,27	267,33
Solución 11	51,37	47,30	78,07	67,29	184,36	82,63	44,28	267,35
Solución 12	51,37	47,30	78,08	67,29	184,37	82,63	44,28	263,52
Solución 13	51,37	47,30	78,07	67,27	184,37	82,63	44,36	265,64
Solución 14	51,37	47,30	78,07	67,27	184,37	82,63	44,41	266,95
Solución 15	51,37	47,30	78,07	67,27	184,36	82,63	44,45	266,14
Solución 16	51,38	47,30	78,29	67,31	184,42	82,98	44,75	262,40
Solución 17	51,39	47,31	78,44	67,34	184,43	83,22	44,96	270,20
Solución 18	51,09	46,77	79,54	65,93	183,71	88,99	46,40	262,20
Solución 19	51,09	46,77	79,55	65,91	183,73	89,00	46,43	262,05
Solución 20	51,10	46,77	79,55	65,89	183,75	89,00	46,45	261,94
Solución 21	51,10	46,77	79,56	65,89	183,75	89,01	46,45	261,90
Solución 22	51,09	46,77	79,56	65,88	183,75	89,01	46,50	262,12
Solución 23	51,08	46,78	79,65	65,89	183,80	89,18	46,69	265,40
Solución 24	51,19	46,95	78,53	65,70	184,64	86,59	45,79	254,70
Solución 25	51,19	46,95	78,53	65,70	184,64	86,59	45,79	254,70
Solución 26	51,19	46,95	78,53	65,70	184,64	86,59	45,79	255,30
Solución 27	51,19	46,95	78,53	65,70	184,64	86,59	45,78	255,37
Solución 28	51,19	46,95	78,53	65,70	184,64	86,59	45,78	255,52
Solución 29	51,19	46,95	78,53	65,71	184,61	86,59	45,76	253,52
Solución 30	51,17	46,96	78,68	65,75	184,61	86,85	45,96	257,39
Solución 31	51,15	46,76	76,76	65,32	183,76	84,35	44,01	253,64
Solución 32	51,14	46,76	76,76	65,34	183,73	84,35	44,00	258,04
Solución 33	51,14	46,76	76,74	65,37	183,69	84,32	43,96	255,82
Solución 34	51,27	46,88	77,50	65,86	184,27	84,48	44,52	267,21
Solución 35	51,28	46,88	77,50	65,87	184,27	84,48	44,52	261,82
Solución 36	51,29	46,88	77,50	65,88	184,26	84,48	44,53	263,54
Solución 37	51,29	46,88	77,50	65,89	184,28	84,48	44,56	262,76
Solución 38	51,12	47,11	78,39	66,64	184,55	85,26	45,45	260,79
Solución 39	51,12	47,11	78,39	66,65	184,53	85,26	45,43	260,91
Solución 40	51,11	47,11	78,37	66,66	184,51	85,24	45,41	261,02
Solución 41	51,11	47,11	78,38	66,67	184,50	85,24	45,40	267,25
Solución 42	51,04	47,04	79,70	66,21	184,15	86,79	47,13	257,57
Solución 43	51,04	47,04	79,70	66,22	184,20	86,79	47,14	256,75
Solución 44	51,04	47,04	79,71	66,22	184,20	86,79	47,15	253,44
Solución 45	51,04	47,04	79,71	66,22	184,19	86,80	47,16	264,03

Así pues, tras calcular la mejor solución de este frente de Pareto de acuerdo a la metodología propuesta, se tiene que esta es la “Solución 31”. De igual modo, esta queda definida por las siguientes cotas de los conductos:

Tabla 28. Optimización 4. Cotas de la configuración óptima

Conducto	D, [mm]	H, [mm]	L, [mm]
1	8,00	-	9,60
2	7,94	24,54	9,60
3	8,00	33,00	9,60
4	7,63	38,50	9,73
5	7,19	43,82	10,64
6	7,83	73,05	9,80
7	6,78	85,29	10,02
8	8,00	18,92	9,60
9	7,79	50,65	9,60
10	7,39	54,78	9,60
11	8,00	59,50	9,60
12	7,28	68,27	9,60
13	7,12	83,54	10,26

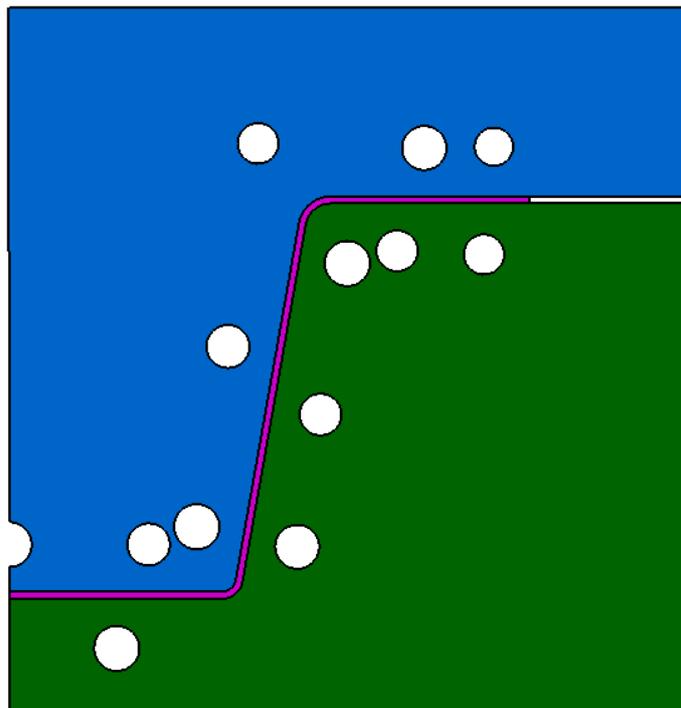


Imagen 68. Resultado de la Optimización 4

13.6 Optimización 5

13.6.1 Frente de Pareto

Esta optimización hace referencia a la geometría descrita en el punto Ampliación del método - Optimización tridimensional; concretamente, a la denotada como “Sección 2”. La Sección 1 es la misma que se ha calculado en los apartados anteriores de este punto, por lo que no resulta necesario volver a calcularla. Del mismo modo, cabe recordar que la optimización planteada es la misma a la “optimización 1”, es decir:

- Variables de diseño:
 - o Cotas D, H y L de todos los conductos
- Función objetivo a minimizar
 - o Temperatura máxima en la chapa al finalizar un ciclo de enfriamiento
 - o Temperatura promedio en la chapa al finalizar un ciclo de enfriamiento

Con todo ello, planteando la metodología de optimización descrita, se obtiene el siguiente frente de Pareto para la Sección 2.

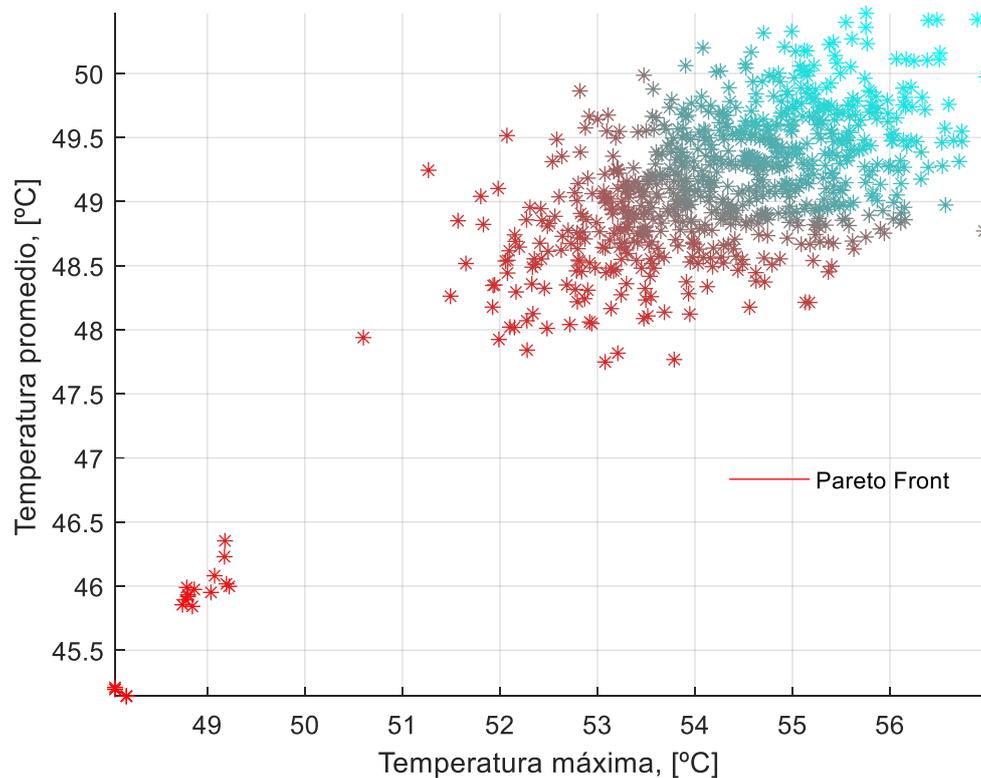


Imagen 69. Optimización 5. Frente de Pareto de la sección 2

Se tiene que el frente de Pareto queda constituido por 3 posibles soluciones, siendo estas las que recogen en la siguiente tabla.

Tabla 29. Cotas de las configuraciones óptimas de la sección 2

Configuración	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Temperatura máxima, [°C]	48,05	48,17	48,17
Temperatura promedio, [°C]	45,19	45,14	45,14
D1	7,91	7,91	7,91
D2	8,00	8,00	8,00
D3	7,80	7,80	7,80
D4	7,96	8,00	8,00
D5	7,45	7,77	7,58
D6	7,53	7,50	7,50
D7	7,30	7,33	7,33
D8	8,00	8,00	8,00
D9	6,31	7,52	7,52
D10	7,52	8,00	8,00
D11	8,00	8,00	8,00
D12	7,94	7,97	7,97
D13	6,60	6,63	6,63
L1	9,60	9,60	9,60
L2	9,60	9,60	9,60
L3	9,60	9,60	9,60
L4	9,60	9,60	9,60
L5	11,04	11,01	11,03
L6	9,60	9,60	9,60
L7	10,07	10,86	10,86
L8	9,60	9,77	9,77
L9	9,60	9,60	9,60
L10	9,60	9,60	9,60
L11	9,60	9,60	9,60
L12	9,60	9,60	9,60
L13	10,10	10,10	10,10
H2	23,73	23,73	23,73
H3	33,00	33,00	33,00
H4	38,50	38,50	38,50
H5	44,20	44,00	44,09
H6	61,01	61,25	61,25
H7	85,07	85,20	85,20
H8	17,62	17,62	17,62
H9	50,64	51,15	51,15
H10	54,56	54,56	54,56
H11	59,18	59,08	59,08
H12	68,00	68,00	68,00
H13	83,17	83,21	83,21

13.6.2 Curva de enfriamiento

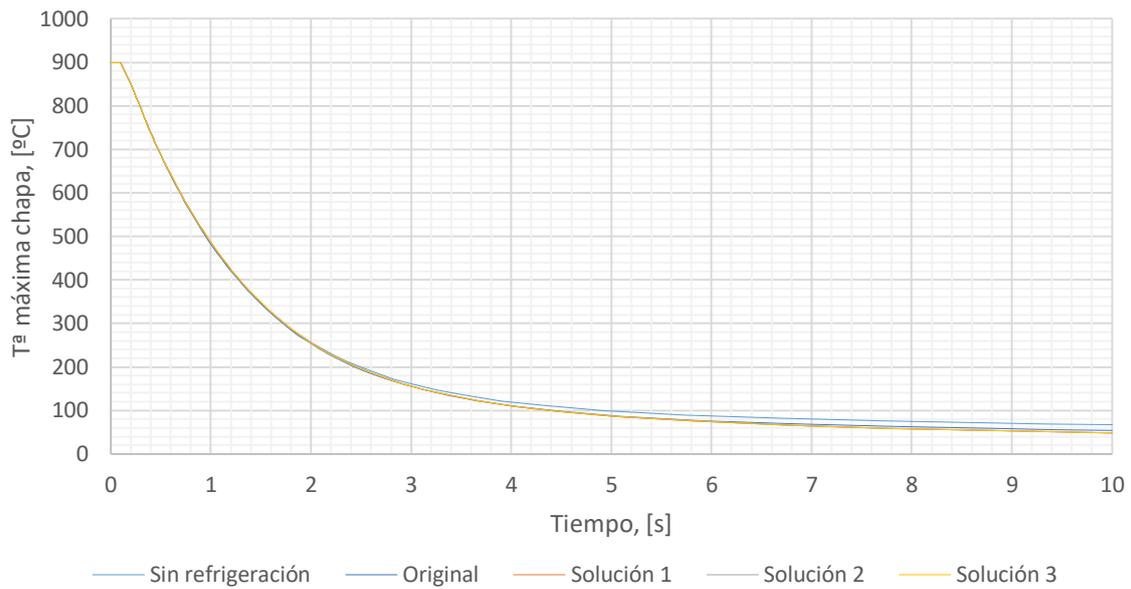


Gráfico 25. Optimización 5, Sección 2. Evolución de la temperatura máxima de la chapa. Comparativa entre soluciones

13.6.3 Estado estacionario

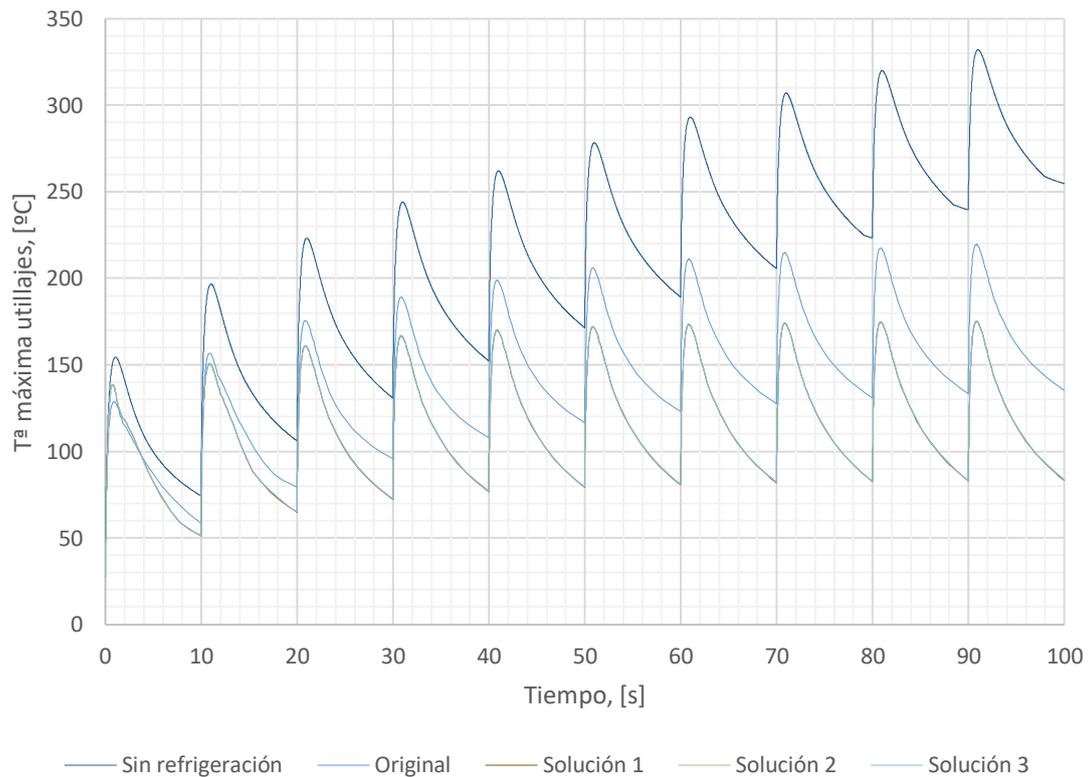


Gráfico 26. Optimización 5, Sección 2. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima en los utilillajes

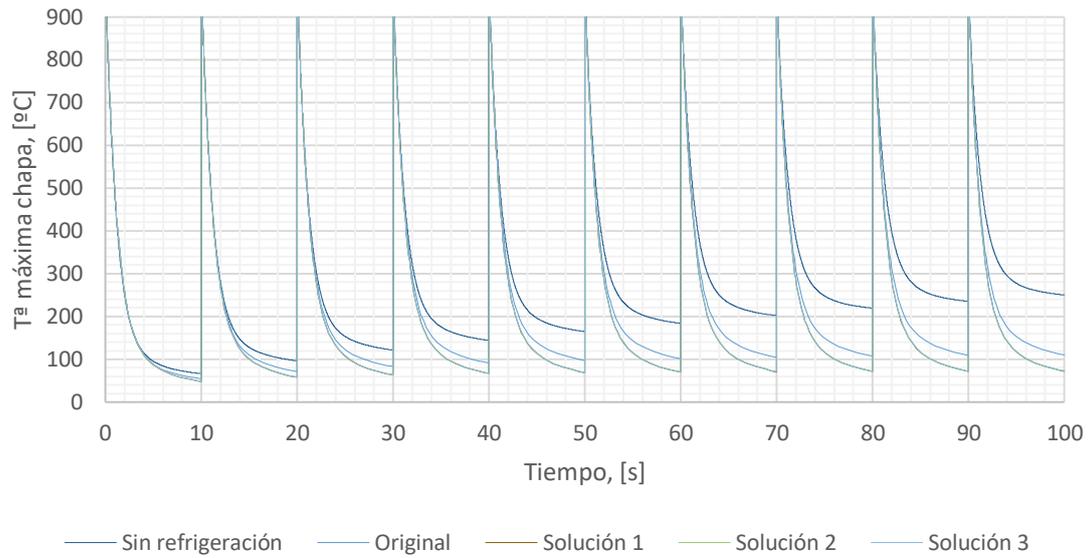


Gráfico 27. Optimización 5, Sección 2. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima de la chapa

13.6.4 Diferencia de temperaturas en la chapa

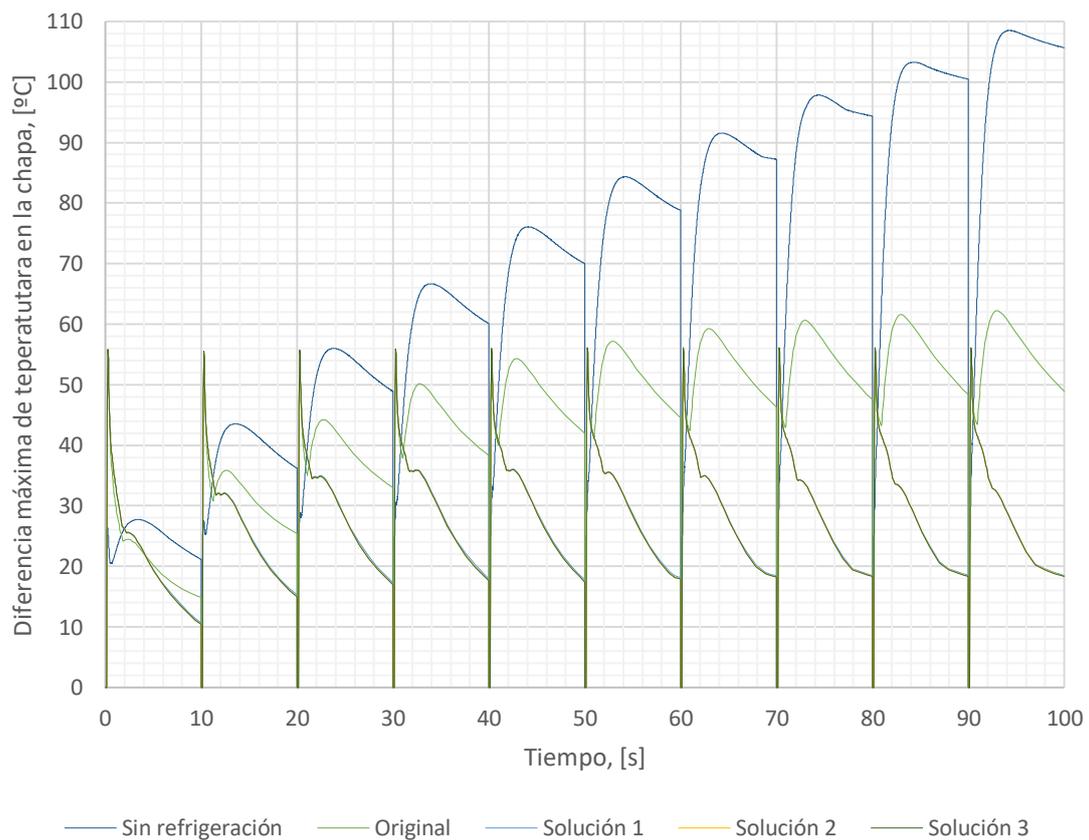


Gráfico 28. Optimización 5, Sección 2. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la diferencia de temperatura de la chapa

13.6.5 Elección de la solución

Finalmente, en la siguiente tabla se resumen los resultados de las tres soluciones para la optimización de la sección 2. Los encabezados de la tabla son los mismos a los descritos en el punto 13.2.4.

Tabla 30. Optimización 5, Sección 2. Resumen de resultados

Caso	A	B	C	D	E	F	G	H
Original	54,23	49,93	109,84	83,47	3,31	219,53	135,34	106,35
Solución 1	48,05	45,19	72,16	63,49	2,83	174,96	83,31	56,11
Solución 2	48,17	45,14	72,35	63,01	2,84	175,26	83,59	56,10
Solución 3	48,17	45,14	72,35	63,03	2,84	175,26	83,59	56,09

Al igual que en el resto de casos, con ayuda del código de Matlab, se obtiene la configuración óptima a partir de los datos de esta tabla; de este modo, se concluye que la solución 1 es la mejor de estas 3.

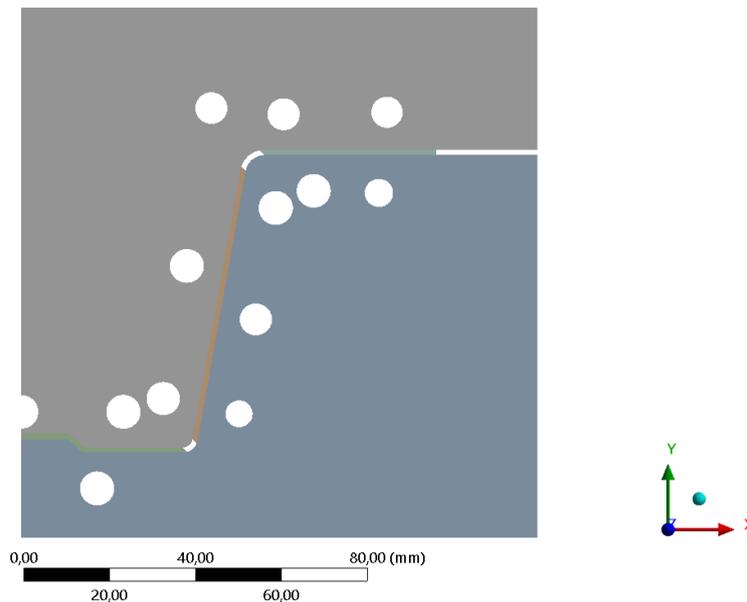


Imagen 70. Resultado de la Optimización 5

Cabe recordar que esta optimización se trata de una generalización para geometrías tridimensionales de la metodología propuesta. Por ello, tal y como se ha explicado en el apartado 12.2, se van a analizar dos soluciones posibles para el recorrido de los conductos:

- Recorrido recto
- Recorrido mediante splines

13.6.6 Recorrido recto

En este caso, se generan conductos rectos que unen entre sí las diferentes secciones optimizadas. Tal y como se ha indicado, la geometría de los conductos rectos se obtiene como media ponderada de las soluciones obtenidas para cada una de las secciones. Como factor de ponderación puede emplearse algún parámetro que ayude a caracterizar cada conducto en las diferentes secciones optimizadas; concretamente, en este caso, se ha empleado la temperatura máxima alcanzada en el contorno de cada conducto a lo largo del primer ciclo de enfriamiento.

Estas temperaturas, en °C, se recogen en la siguiente tabla; los resultados de la sección 1 provienen del resultado de la optimización 1.

Tabla 31. Temperatura máxima en el contorno de los conductos, [°C]

Conducto	Sección 1	Sección 2
1	75,59	123,32
2	82,69	83,57
3	92,68	85,02
4	75,67	79,18
5	51,14	33,68
6	76,77	69,28
7	65,73	70,88
8	77,35	75,12
9	79,22	68,05
10	73,89	77,16
11	95,46	79,62
12	83,19	79,34
13	70,13	68,78

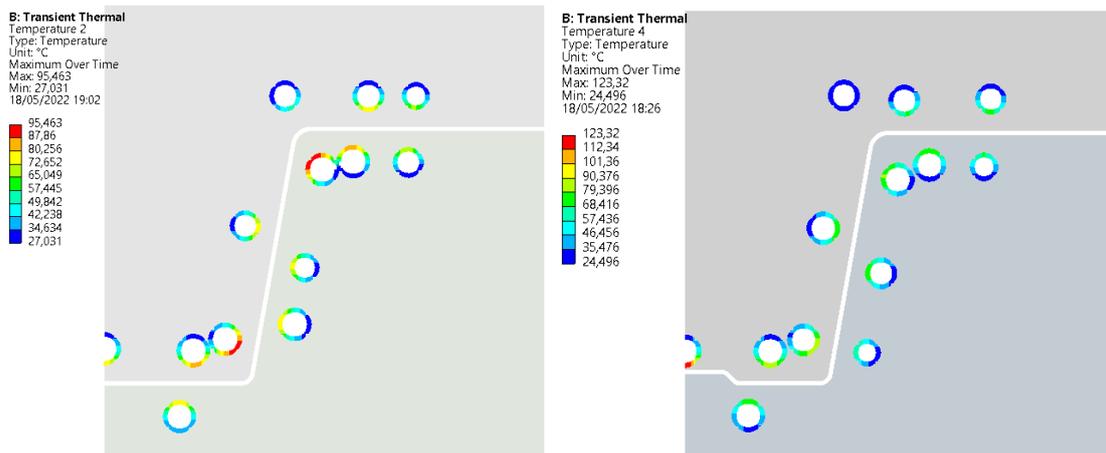


Imagen 71. Distribución de temperaturas en el contorno de los conductos. Sección 1 (izquierda); sección 2 (derecha)

Para obtener la posición y diámetro de los conductos definitivos, en primer lugar, debe expresarse las coordenadas de cada agujero en coordenadas absolutas. Es decir, las coordenadas de referencia empleadas, H y L, son locales para cada sección. Así pues, si bien el empleo de las coordenadas locales resulta útil de cara a establecer el dominio de optimización, no resultan prácticas para comparar secciones con diferentes ejes de referencia. Así pues, para obtener las nuevas coordenadas, basta con dibujar en el programa CAD los conductos de acuerdo a las coordenadas locales de cada sección, y, obtener de dicho CAD las coordenadas globales. En la siguiente imagen se muestra la relación entre los ejes locales (H y L) y los globales (X e Y).

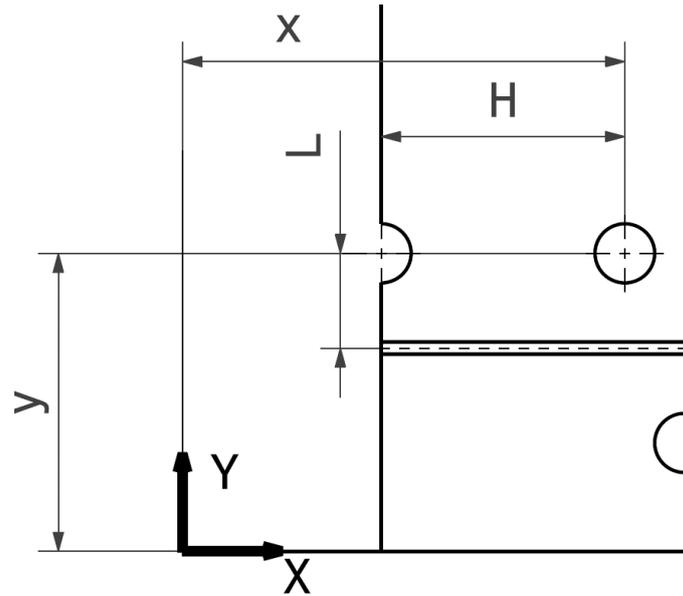


Imagen 72. Relación entre ejes locales y globales

Con todo ello, las coordenadas y diámetro de los conductos finales que se obtienen se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 32. Coordenadas y diámetro de los conductos rectos

Conducto	Sección 1			Sección 2			Global ponderado		
	x	y	Ø	x	y	Ø	x	y	Ø
1	0,00	9,47	7,98	0,00	9,00	7,91	0,00	9,18	7,94
2	24,35	9,00	8,00	23,73	9,00	8,00	24,04	9,00	8,00
3	33,00	12,13	8,00	33,00	12,13	7,80	33,00	12,13	7,90
4	38,50	43,32	7,23	38,50	43,32	7,96	38,50	43,32	7,60
5	49,37	79,00	7,32	44,20	80,44	7,45	47,32	79,57	7,37
6	72,13	79,00	7,46	61,01	79,00	7,53	66,85	79,00	7,49
7	85,07	79,00	6,43	85,07	79,47	7,30	85,07	79,24	6,88
8	24,28	-9,00	7,87	17,62	-9,00	8,00	21,00	-9,00	7,93
9	51,01	10,59	8,00	50,65	8,54	6,31	50,84	9,64	7,22
10	54,25	28,99	6,84	54,56	30,75	7,52	54,41	29,89	7,19
11	59,19	57,03	8,00	59,18	56,96	8,00	59,19	57,00	8,00
12	68,06	61,00	8,00	68,00	61,00	7,94	68,03	61,00	7,97
13	83,38	60,76	7,23	83,17	60,50	6,60	83,27	60,63	6,92

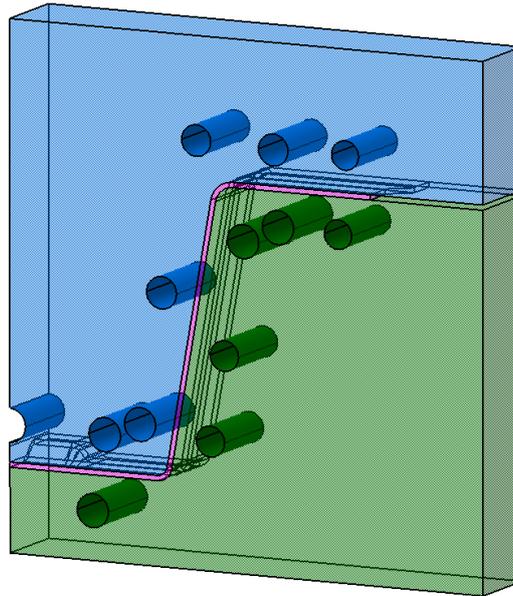


Imagen 73 Geometría de los conductos – recorrido mediante conductos rectos

13.6.7 Recorrido mediante splines

En este caso, cada una de las secciones optimizadas de forma separada permanecerá intacta tras dibujar los conductos. Es decir, el diámetro y posición de los conductos, en cada una de las secciones, permanece tal y como se ha optimizado, y en la zona intermedia, los conductos realizan una transición de una zona a la otra. Para ello se han empleado un tipo de curvas tridimensionales denominadas “*Spline*”, las cuales pueden generarse mediante prácticamente cualquier programa de diseño CAD. De este modo, debido a que no se necesita realizar ningún tratamiento adicional de los datos, se muestra a continuación el diseño obtenido de los conductos.

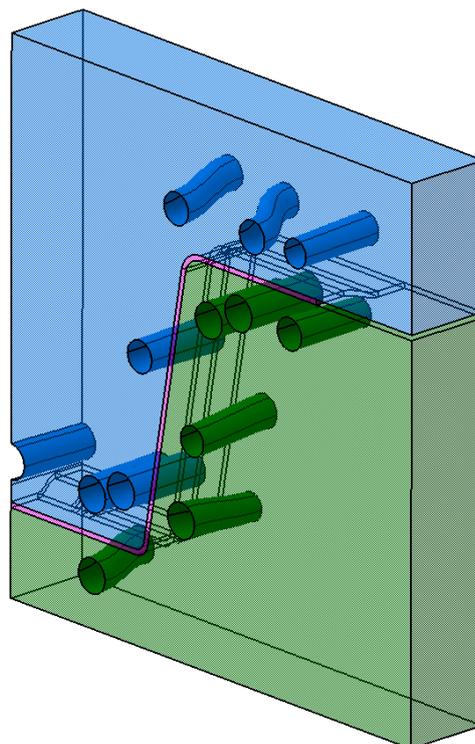


Imagen 74. Geometría de los conductos – recorrido mediante splines

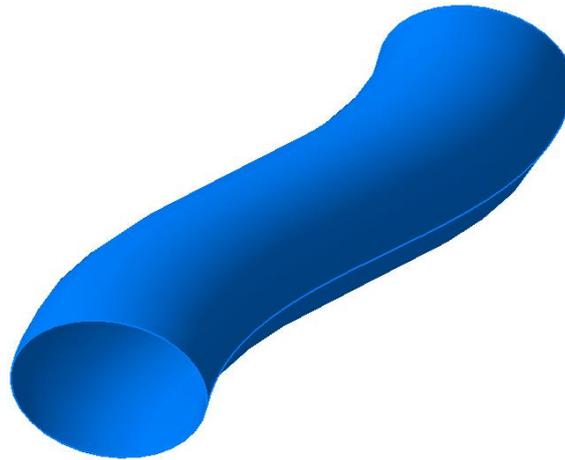


Imagen 75. Detalle de uno de los conductos

13.7 Comparación entre resultados

13.7.1 Optimizaciones 1, 2 y 3

En las tres optimizaciones que se comparan en este punto, solamente se han tenido en cuenta los objetivos de optimización referidos a aspectos térmicos; es decir, la temperatura máxima y promedio de la chapa en el instante final del primer ciclo de estampación. De este modo, son las tres optimizaciones en las que se ha buscado obtener el diseño de los conductos que permita la mejor capacidad de enfriamiento posible.

En lo que respecta a las optimizaciones 2 y 3, tanto el diámetro como la profundidad de los conductos están restringidos, y solamente se ajusta la distancia entre ellos. Al compararlas entre sí, se puede estudiar qué parámetros resultan más importantes: emplear un diámetro de conductos menor, pero poder acercarlo más a la superficie de la chapa (optimización 2), o tener un coeficiente de convección mayor gracias a tener un mayor diámetro, pero posicionar el conducto más alejado de la chapa (optimización 3).

A continuación, se muestra, en diferentes gráficas, la comparación directa de la configuración seleccionada para cada optimización.

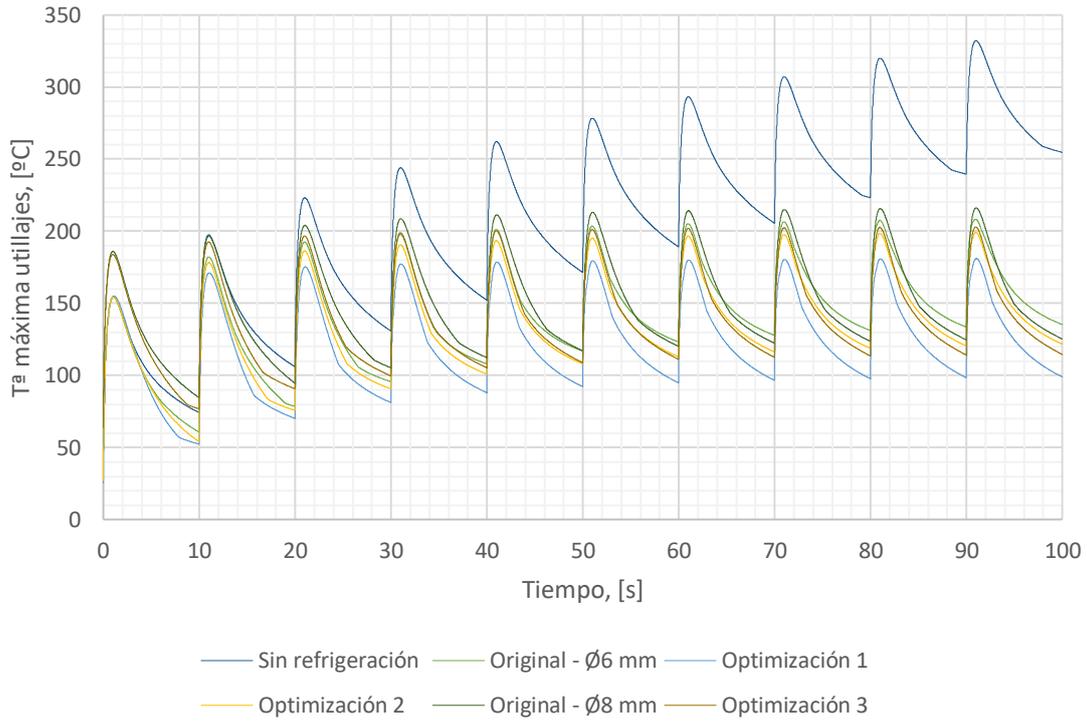


Gráfico 29. Optimizaciones 1, 2 y 3. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima en los utillajes

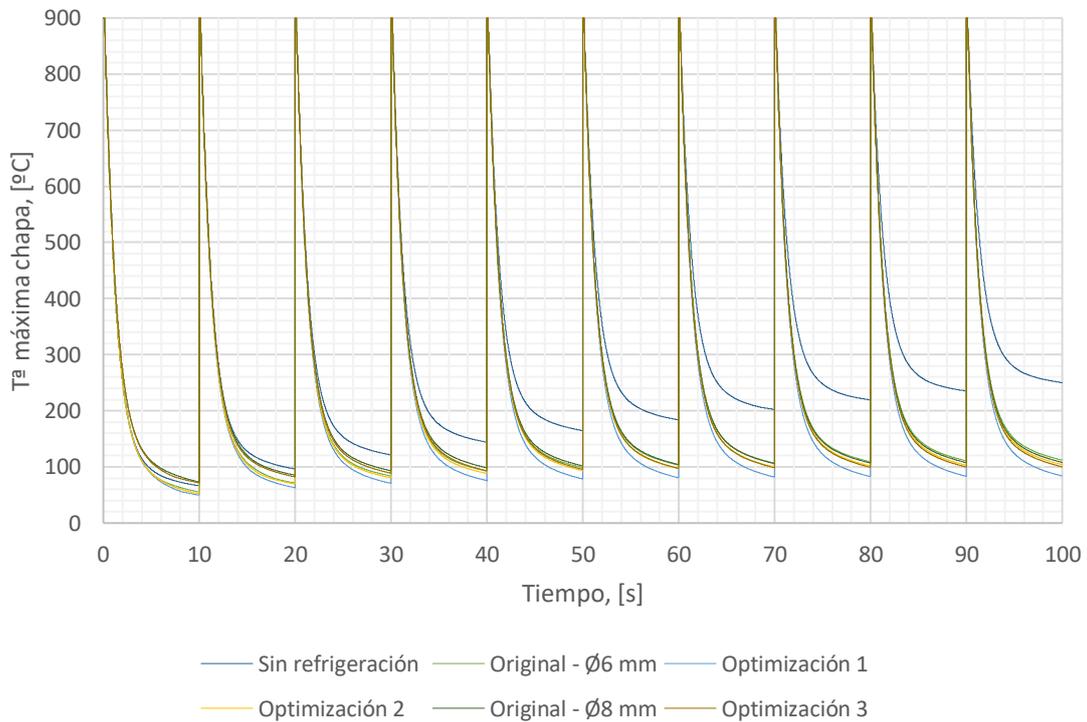


Gráfico 30. Optimizaciones 1, 2 y 3. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima de la chapa

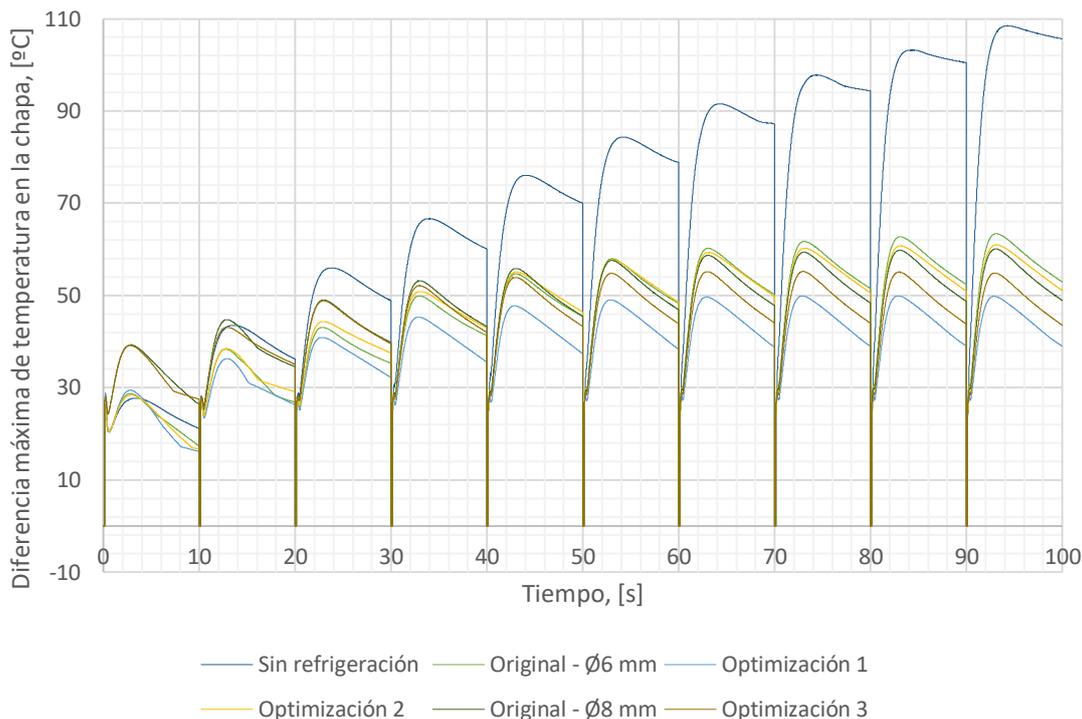


Gráfico 31. Optimizaciones 1, 2 y 3. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la diferencia de temperatura de la chapa

Del mismo modo, en la siguiente tabla se recoge la comparación de los resultados para los diferentes casos. Del mismo modo, se introduce el *porcentaje de mejora* como parámetro para cuantificar el beneficio de cada solución. Cabe destacar que para las optimizaciones 1 y 2, la solución inicial es la misma: se han empleado las mismas coordenadas de los conductos, siendo, a su vez, todos ellos de diámetro 6mm. Para la optimización 3, en cambio los conductos son de diámetro 8mm.

Tabla 33. Resumen de resultados en las optimizaciones 1, 2 y 3

Parámetro (Ver 0)	Inicial - Ø6mm	Optimización 1		Optimización 2		Inicial - Ø8mm	Optimización 3	
	Valor	Valor	% mejora	Valor	% mejora	Valor	Valor	% mejora
A	55,03	51,40	6,60	53,82	2,20	58,50	56,49	3,44
B	52,03	46,67	10,30	50,12	3,67	54,69	52,66	3,71
C	111,94	83,57	25,34	105,99	5,32	107,85	99,89	7,38
D	84,35	62,30	26,14	78,86	6,51	87,70	76,28	13,02
E	3,27	2,85	12,84	3,13	4,28	3,19	3,06	4,08
F	208,32	181,03	13,10	199,15	4,40	216,11	202,90	6,11
G	135,32	98,96	26,87	122,44	9,52	125,24	114,51	8,57
H	63,4	49,91	21,28	60,99	3,80	60,09	55,19	8,15

En primer lugar, en esta tabla se observa rápidamente que la optimización 1 es la mejor en todos los parámetros que se han empleado para caracterizar las soluciones; este era un resultado que se esperaba que ocurriese desde un principio. Es decir, debido a que en la optimización 1 se ajustan las tres variables de diseño, es la que menos restringida se encuentra.

Por ello, el dominio de optimización es mayor, lo que permite explorar soluciones inalcanzables para los otros dos casos.

En segundo lugar, se observa que para cuantificar correctamente los porcentajes de mejora resulta necesario estudiar el sistema en un estado estacionario. Por ejemplo, analizando la optimización 1, en los parámetros A y B, temperatura máxima y promedio de la chapa al cabo del primer ciclo, la mejora obtenida es del 6,60% y 10,30% respectivamente. Sin embargo, en los parámetros C y D, temperatura máxima y promedio de la chapa al final de un ciclo en estado estacionario, las mejoras son del 25,31% y 26,14% respectivamente. Por lo tanto, tal y como ya se ha indicado anteriormente, se concluye que, si bien simular solo un primer ciclo resulta útil de cara a ejecutar la optimización de forma eficiente, esta simplificación no resulta correcta para cuantificar la mejoría de los resultados.

Por otro lado, al comparar directamente las optimizaciones 1 y 2, que son las que parten de la misma solución inicial, se obtiene que la optimización 1 alcanza unos resultados entre un 3% y un 20% mejores a los de la optimización 2. La máxima diferencia ocurre para los parámetros C y D. Es decir, cuanto más eficiente es el sistema de enfriamiento, mayor será la velocidad de enfriamiento de la chapa, y, consecuentemente, menor será su temperatura al cabo de los 10 segundos simulados.

Esta mejora relativa en los resultados de la optimización 1 con respecto de la 2 se ve reflejado en el parámetro empleado para cuantificar el tiempo de proceso, el E; es decir, el tiempo que se tarda en disminuir la temperatura hasta un valor objetivo, en este caso 200°C. En la optimización 1, la mejora es en este punto es del 12,84%, frente al 4,28% de la optimización 2.

En lo referente a las optimizaciones 2 y 3, se observa que las conclusiones que se pueden extraer de la simulación de un solo ciclo son contrarias a las del estado estacionario. Es decir, al simular un solo ciclo, tanto la temperatura promedio como la máxima de la chapa en el instante final de la simulación, son menores para la optimización 2; sin embargo, en el caso de estado estacionario, la temperatura máxima de menor valor en la chapa ocurre para la optimización 3.

Esto podría deberse a las simplificaciones realizadas a la hora de establecer las condiciones iniciales del problema para el caso de un solo ciclo. En ella se ha supuesto que la temperatura inicial de los utillajes es de 22°C y homogénea, estando esta situación bastante alejada del campo térmico en un estado estacionario. Así mismo, como ya se ha visto, en la simulación de un solo ciclo, en la primera mitad del proceso, el efecto del sistema de enfriamiento es despreciable, debido a que el calor de la chapa no ha llegado todavía a los conductos. De este modo, en el caso de los conductos de $\varnothing 6\text{mm}$, estos se encuentran más cerca de la chapa, por lo que su efecto se hará evidente antes que el de los de $\varnothing 8\text{mm}$; esto resulta suficiente para que en la optimización 2 se obtengan mejores resultados que en la optimización 3 el caso de un solo ciclo.

Sin embargo, una vez se ha alcanzado el estado estacionario y las temperaturas en los utillajes se han estabilizado, el efecto ventajoso de tener los conductos unos milímetros más cerca de la superficie, se reduce. En esta situación, lo que resulta preferible es disponer de una capacidad de enfriamiento mayor para desalojar todo el calor posible, lo que permita tener unos utillajes con unas temperaturas promedio menores. Así mismo, este efecto se puede observar tanto en los resultados de las optimizaciones como en las soluciones iniciales.

En la siguiente gráfica se muestra la evolución de la temperatura promedio de los utillajes en las soluciones originales para $\varnothing 6\text{mm}$ y $\varnothing 8\text{mm}$. En ella se observa cómo en los primeros ciclos, durante el estado transitorio, la temperatura promedio de los utillajes es menor en la optimización 2, $\varnothing 6\text{mm}$. Esto debe a que la zona de mayor temperatura es la más cercana a la chapa; por lo tanto, cuanto más cerca estén los conductos del foco de calor menor será la temperatura en dicha región. Sin embargo, al alcanzar el estado estacionario y distribuirse las temperaturas, una mayor capacidad de enfriamiento gracias a un mayor coeficiente de convección en los conductos de $\varnothing 8\text{mm}$, permite mantener una temperatura promedio menor en los utillajes. Esto permite explicar el porqué de la diferencia de resultados al estudiar solamente el primer ciclo o el estado estacionario. Así pues, en este caso, se concluye que, a pesar de que los conductos de $\varnothing 6\text{mm}$ puedan posicionarse más cerca del foco de calor, su menor coeficiente de convección provoca que se encuentren en desventaja frente a los de $\varnothing 8\text{mm}$.

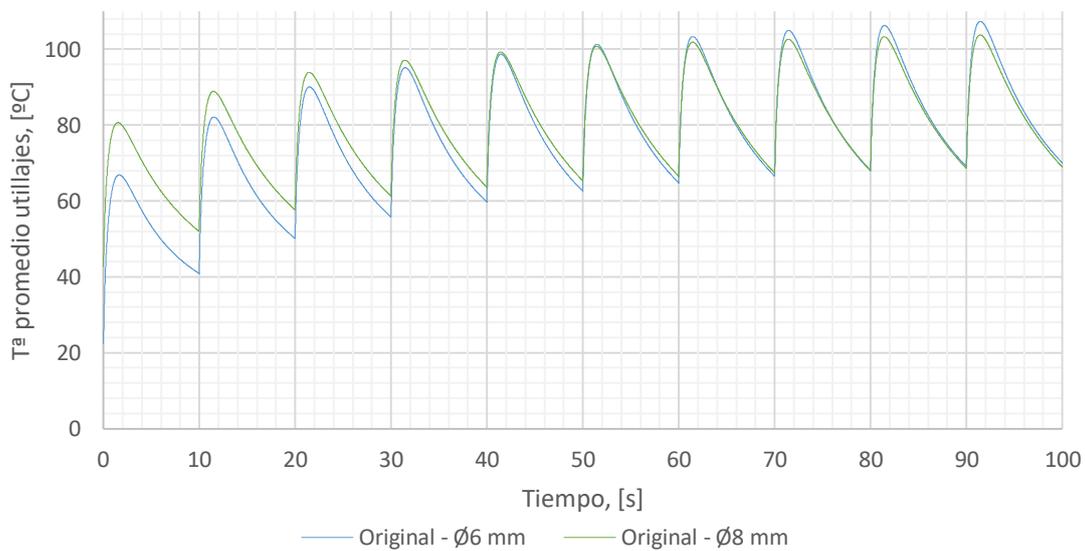


Gráfico 32. Evolución de la temperatura promedio de los utillajes

Finalmente, en las siguientes imágenes se puede observar la diferencia que existe, en el campo térmico de los utillajes, durante el primero ciclo y durante el estado estacionario. Así mismo, para ambos casos, el instante mostrado es cuando se alcanza la temperatura máxima.

B: Transient Thermal
 Temperature 2
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Maximum Over Time
 Max: 153,45
 Min: 22,011
 26/06/2022 12:22

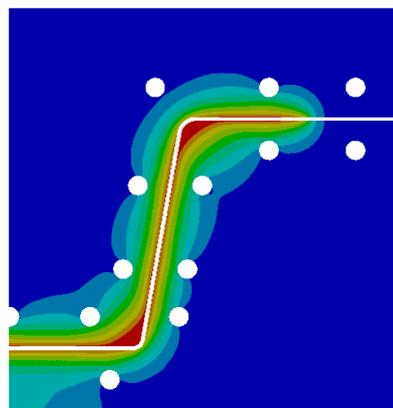


Imagen 76. Solución inicial $\varnothing 6\text{mm}$ - campo térmico de los utillajes durante el primer ciclo

D: Transient Thermal
 Utililajes
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Maximum Over Time
 Custom Obsolete
 Max: 209,19
 Min: 36,461
 26/06/2022 12:27

208,32
150
100
90
80
70
60
50
40
36,461

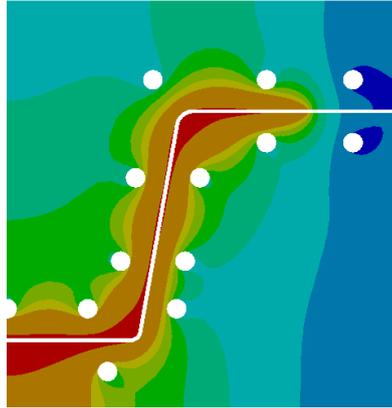


Imagen 77. Solución inicial Ø6mm - campo térmico de los utililajes en estado estacionario

Por último, en lo que respecta a la diferencia máxima de temperaturas de la chapa, el objetivo de 50°C de diferencia, solo se alcanza en la optimización 1. Sin embargo, esto permite concluir que un buen diseño del sistema de enfriamiento, no solo mejora la productividad, sino que también permite tener un mayor control en la calidad del proceso; en este caso, por medio de la disminución de las tensiones internas en la chapa.

En lo que respecta al posicionamiento, analizando la distribución de los conductos de la optimización 1, se observan diferentes patrones. En primer lugar, la tendencia es a posicionar los conductos en aquellas zonas donde se dan las concentraciones de calor. Esto suele ocurrir en las zonas donde la chapa se curva, ya que, dicha regiones, reciben calor desde varios puntos a la vez.

Por otro lado, en líneas generales, los conductos se posicionan tan cerca de la superficie como sea posible; lo mismo ocurre con el diámetro de estos, donde también se busca que sean tan grandes como lo permitan las ecuaciones de restricción. Esto era algo que podría deducirse fácilmente de cara a minimizar la temperatura de la chapa; sin embargo, esta conclusión no resultaba tan evidente de cara a homogeneizar la temperatura de la misma. Así pues, a partir de este estudio, puede concluirse que el proceso de optimización resulta beneficioso de cara a establecer una correcta separación entre conductos. Pueden excluirse de un análisis de optimización tanto el diámetro como la profundidad de los conductos; en líneas generales, la mejor solución será la de mayor diámetro de conductos y lo más cerca posible de la chapa.

D: Transient Thermal
 Temperature
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Maximum Over Time
 Max: 183,58
 Min: 40,96
 26/06/2022 15:18

181,03
145
132
118,99
105,99
92,99
79,975
66,97
53,965
40,96

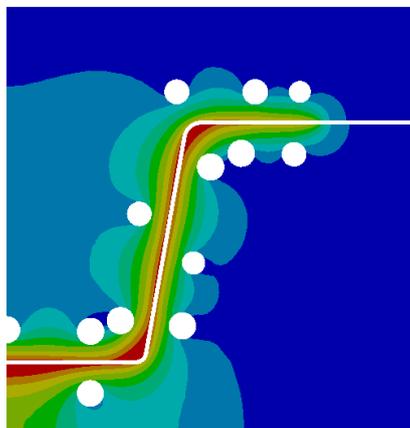


Imagen 78. Posicionamiento de conductos en las zonas de concentración de temperatura

13.7.2 Optimizaciones 1 y 4

En estos dos casos se ajustan las tres variables de diseño, D, H y L, para buscar la configuración óptima de los conductos. No obstante, mientras que para la optimización 1 solamente se considera el campo térmico en la función objetivo, en la optimización 4 también se incluyen las tensiones en el contorno de los conductos. De este modo, mediante la comparación de estas dos optimizaciones, se pretende estudiar cuales son los efectos que pudieran tener, en la capacidad de enfriamiento, el considerar parámetros que no dependen directamente de la temperatura.

Con objeto de poder plantear la comparación entre los casos de estudio, a continuación, se recogen los parámetros empleados para caracterizar ambas optimizaciones.

Tabla 34. Resumen de resultados en las optimizaciones 1 y 4

Parámetro (Ver 0)	Inicial	Optimización 1		Optimización 4	
	Valor	Valor	% mejora	Valor	% mejora
A	55,03	51,40	6,60	51,15	7,05
B	52,03	46,67	10,30	46,76	10,13
C	111,94	83,57	25,34	76,76	31,43
D	84,35	62,30	26,14	65,32	22,56
E	3,27	2,85	12,84	2,88	11,93
F	208,32	181,03	13,10	183,76	11,79
G	135,32	98,96	26,87	84,35	37,67
H	63,4	49,91	21,28	44,01	30,58
I	293,08	275,79	5,90	253,64	13,46

Al analizar estos datos, resulta destacable el hecho de que, si bien la optimización 1 obtiene mejores resultados en algunos de los parámetros empleados para caracterizar la capacidad de enfriamiento, en otros, resulta peor que la optimización 4. Es decir, en la optimización 1 solamente se han considerado objetivos térmicos, por lo que cabría esperar que fuese la mejor solución en todos los parámetros de estudio; sin embargo, se observa que esto no es así.

Desglosando estos datos, los parámetros A, B, C y D son los que permiten analizar el comportamiento de la chapa. En lo que respecta a la optimización 1, esta obtiene mejores resultados en la temperatura promedio; la optimización 4, en cambio, en la temperatura máxima. Así pues, el parámetro E, tiempo que tarda en bajar la temperatura hasta los 200°C, ambas soluciones presentan prácticamente el mismo resultado, con una pequeña diferencia del 0,91%, a favor de la optimización 1. Es decir, a partir de estos resultados, se puede afirmar que el considerar las tensiones principales en los conductos ha tenido un efecto despreciable en el detrimento de la capacidad de enfriamiento de los conductos.

Sin embargo, en lo que respecta a las tensiones en los utillajes, existen importantes diferencias. En el caso de la optimización 4 se considera el objetivo de minimizar dichas tensiones; estas se logran reducir en un 13,46%. En cambio, en la optimización 1, este objetivo no se ha contemplado, por lo que no existe control alguno en dicho parámetro. En este caso, se ha obtenido una reducción en las tensiones principales del 5,90%, pero también podría haberse dado el caso en el que pudieran haber aumentado. Con todo ello, se tiene que añadir el objetivo de minimizar las tensiones principales ha permitido reducir dichas tensiones, a la vez que se ha mantenido prácticamente intacta la capacidad de enfriamiento de los conductos.

C: Static Structural
 Maximum Principal Stress
 Type: Maximum Principal Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 Max: 275,79
 Min: 0
 26/06/2022 21:36

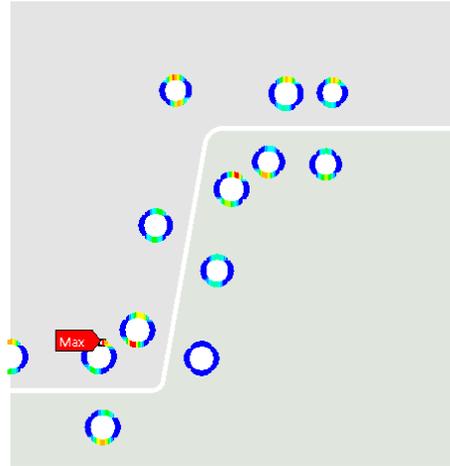
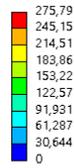


Imagen 79. Optimización 1 – Distribución de tensiones principales máximas en los conductos

C: Static Structural
 Maximum Principal Stress
 Type: Maximum Principal Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 Max: 253,64
 Min: 0
 26/06/2022 21:14

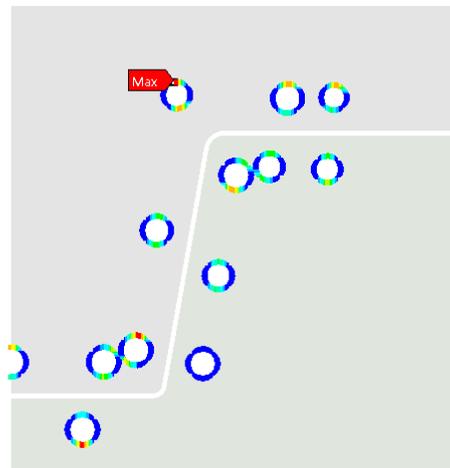
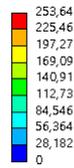


Imagen 80. Optimización 4 – Distribución de tensiones principales máximas en los conductos

Adicionalmente, para este caso resulta interesante comparar las diferencias obtenidas en la distribución de los conductos; concretamente, la distancia entre estos. En las siguientes gráficas se muestra la distribución de la distancia entre conductos contiguos; la primera recoge la distancia entre centros, y la segunda, la distancia entre la superficie de los conductos. Adicionalmente, se incluye, mediante una recta horizontal, el valor promedio de la distancia para cada caso.

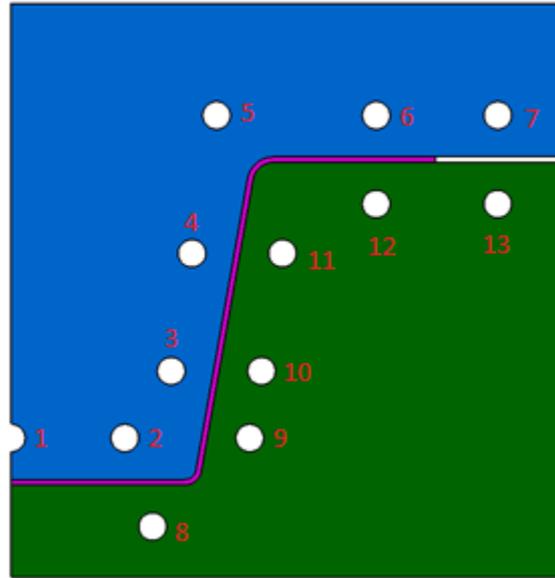


Imagen 81. Numeración de los conductos

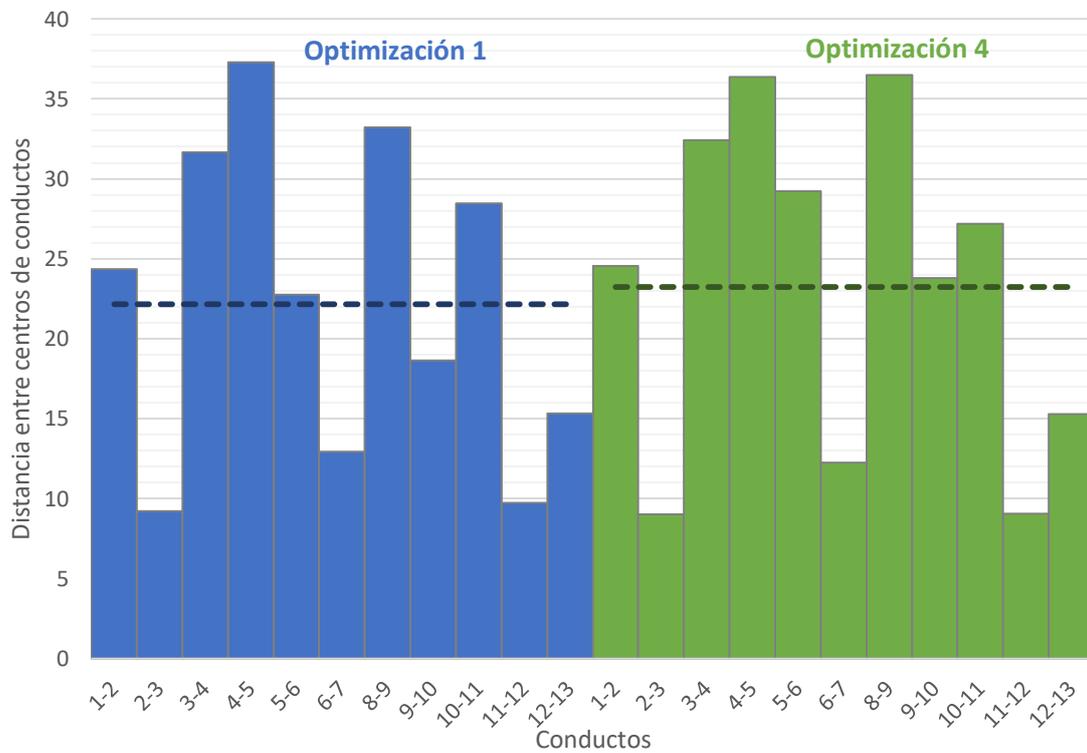


Gráfico 33. Optimizaciones 1 y 4 – Distancia entre centros de los conductos

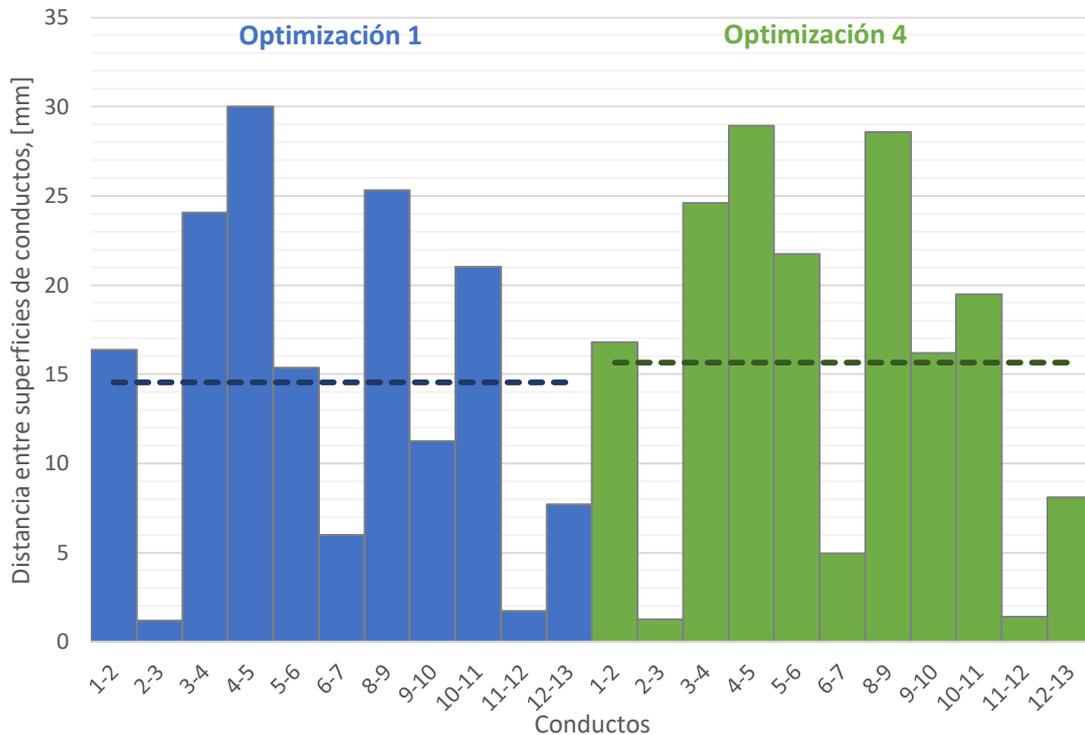


Gráfico 34. Optimizaciones 1 y 4 – Distancia entre superficies de los conductos

En estas gráficas, se observa que, en líneas generales, en la optimización 1, en la que no se consideran las tensiones, la separación entre conductos es menor. Esto es debido a que, en dicho caso, la optimización tiende a posicionar los conductos en aquellas localizaciones donde las temperaturas son mayores. Por el contrario, en la optimización 4, debido a que también se considera la minimización de las tensiones, acercar excesivamente los conductos tiene un efecto perjudicial de cara a cumplir con los objetivos impuestos.

Sin embargo, a pesar que considerar las tensiones permite aumentar la separación entre conductos, se observa que en algunos casos esta distancia es excesivamente pequeña. Por ejemplo, entre los conductos 2 y 3, la separación es menor a 2mm. Si bien este valor puede ser suficiente para cumplir con los objetivos de diseño, resulta inviable en cuanto a fabricación; es decir, si a la hora de mecanizar el agujero existe un pequeño error en el posicionamiento de la herramienta, o si se generan problemas de vibraciones, esta pequeña pared podría llegar a dañarse, provocando que ambos conductos quedasen unidos. Por lo tanto, a partir de este análisis, se concluye que considerar las tensiones en el contorno de los conductos, no garantiza que la separación entre ellos sea suficiente de cara a su posterior fabricación.

Así pues, para evitar este problema, podría considerarse en imponer unas nuevas ecuaciones de restricción, por medio de las cuales se garantice el distanciamiento mínimo entre conductos. Sin embargo, esto presenta la desventaja de que una optimización con demasiadas restricciones, puede conducir a resultados de menor calidad, tal y como se ha visto en el punto 13.7.1. Por ello, la solución que resulta más conveniente es, una vez realizada la optimización, llevar a cabo un tratamiento posterior de datos, en el que se corrija el distanciamiento mínimo entre los conductos.

13.7.3 Optimización 5

En lo que respecta a la optimización 5, resulta necesario comparar entre sí las dos configuraciones propuestas de los conductos: conductos rectos y conductos tipo spline. Para ello, se ha modelado el problema de transferencia de calor empleando las geometrías tridimensionales completas mostradas en los puntos 13.6.6 y 13.6.7, obteniéndose así los siguientes resultados.

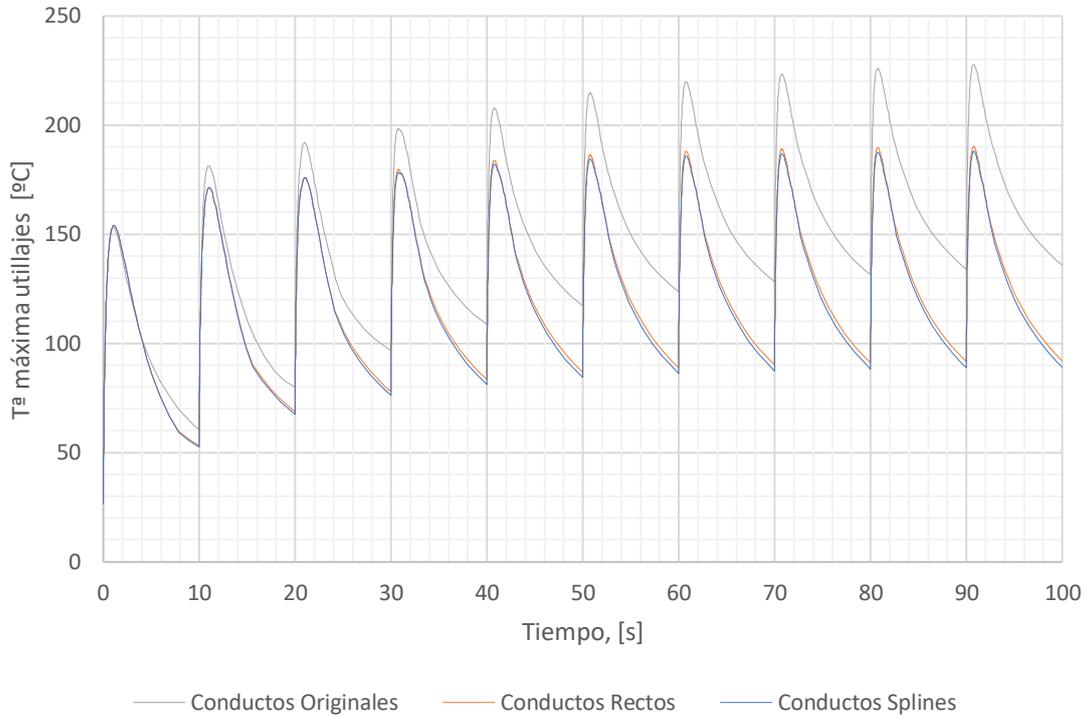


Gráfico 35. Conductos tridimensionales. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima en los utillajes

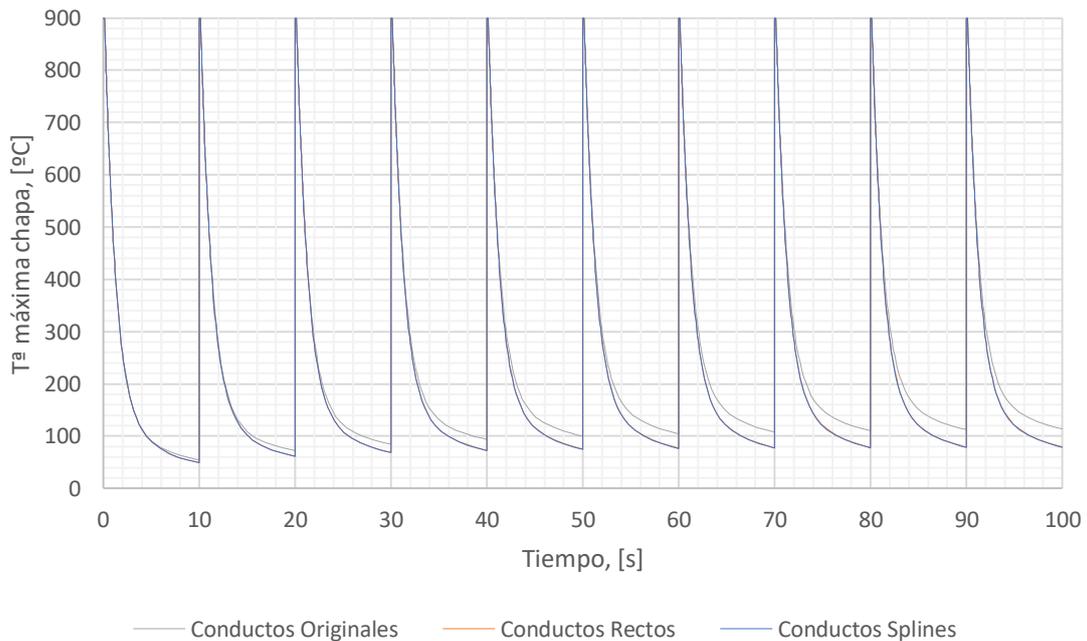


Gráfico 36. Conductos tridimensionales. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la temperatura máxima de la chapa

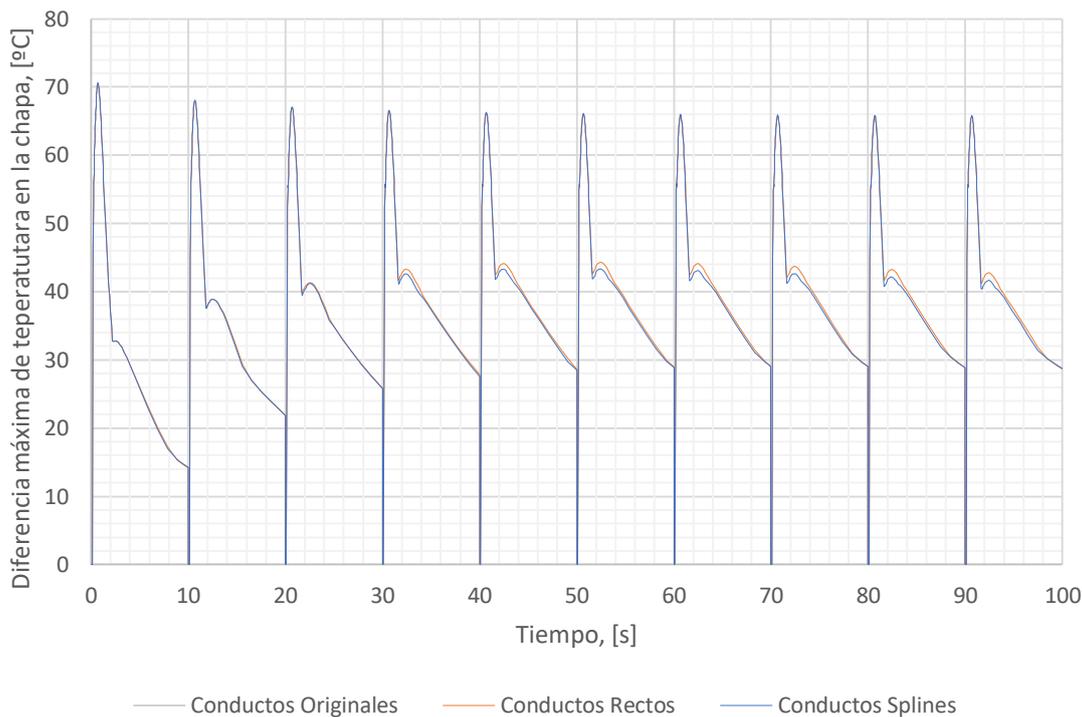


Gráfico 37. Optimización tridimensional. Evolución, a lo largo de varios ciclos, de la diferencia de temperatura de la chapa

Finalmente, en la siguiente tabla se resumen los resultados de estas gráficas.

Tabla 35. Resumen de resultados en la Optimización 5

Parámetro (Ver 0)	Inicial	Conductos rectos		Conductos splines	
	Valor	Valor	% mejora	Valor	% mejora
A	54,70	49,59	9,34	49,67	9,20
B	50,88	45,51	10,55	45,44	10,69
C	113,55	79,45	30,03	78,73	30,66
D	85,21	63,63	25,33	63,25	25,77
E	3,28	2,72	17,07	2,71	17,38
F	227,78	190,10	16,54	187,87	17,52
G	135,72	92,00	32,21	89,11	34,34
H	70,31	70,27	0,06	70,61	0,43

Analizando los resultados de esta tabla, en un primer vistazo, se observa que el diseño empleando conductos de tipo spline es mejor que el de conductos rectos en la mayoría de parámetros estudiados. Esto se debe a que, en el caso de las curvas tridimensionales, el diseño de los conductos es el que se ha calculado directamente de la optimización. Sin embargo, en el caso de los conductos rectos, las coordenadas de dichos conductos se han obtenido como ponderación de los resultados de las diferentes secciones; es decir, para conseguir que los conductos sean rectos, se ha tenido que sacrificar la idoneidad del diseño en cuanto a su capacidad de enfriamiento.

Sin embargo, al comprobar punto a punto los porcentajes de mejora, se observa que, en ambas soluciones, estos son muy similares. Es decir, si bien en línea general los conductos de tipo spline son mejores que los rectos, la diferencia entre estas dos soluciones no supera el 1%

en la mayoría de casos. Por ello, puede concluirse que la complejidad de fabricación de los conductos curvos no compensa los beneficios de refrigeración que aporta frente a los conductos rectos. Es decir, los conductos rectos presentan una mejora similar a los de tipo spline, pero con la ventaja adicional de ser fácilmente fabricados. Por lo tanto, salvo en casos particulares, la mejor alternativa son los conductos rectos.

En lo que respecta al análisis de los diferentes parámetros estudiados, por un lado, resulta destacable el parámetro C, la temperatura máxima de la chapa al finalizar un ciclo de estampación en estado estacionario. En este caso, la mejora resulta ser superior al 30%; es decir, la chapa se ha enfriado un 30% más con respecto a la solución de partida. Esto es debido a un aumento en la velocidad de enfriamiento, lo cual resulta beneficioso de cara a reducir el tiempo de proceso.

Así pues, en lo que respecta al tiempo de proceso, al analizar la curva de enfriamiento a lo largo de los ciclos, se observa que esta no es lineal, si no que presenta un comportamiento exponencial negativo. Por este motivo, aunque en un modelo de 10 segundos de simulación, en el instante final la diferencia de temperaturas sea del 30%, la mejora real será menor; la diferencia se hace mayor cuanto más tiempo de la simulación transcurre. Para cuantificar la mejora en la velocidad de enfriamiento o en el tiempo de proceso, se ha empleado el parámetro E; tiempo requerido para bajar hasta los 200°C en la chapa en el último ciclo simulado. En este parámetro, la mejora es del 16,54% en el caso de los conductos rectos, y del 17,52% en los conductos de tipo spline. Es decir, en el caso de que la temperatura objetivo a la que se tiene que enfriar la chapa sea de 200°C, el tiempo de proceso se reduce en más de un 16,5%; o, dicho de otro modo, aumenta la eficiencia de la máquina en más de un 16,5%. Para cuantificar esta mejora no se han tenido en cuenta tiempos muertos de mantenimiento de utillajes o el tiempo de cambio de la chapa, pero se puede concluir que existe una clara mejoría con respecto a la solución inicial.

Sin embargo, en lo que respecta al parámetro H, la diferencia máxima de temperaturas en la chapa, se observa que, en este caso, la mejora obtenida es despreciable, siendo del 0,06% en el mejor de los casos. Para entender este resultado, resulta conveniente analizar directamente el campo de térmico de la chapa en el instante en el que ocurre dicha diferencia máxima de temperaturas; en la siguiente imagen se muestra este resultado para el caso de conductos curvos. En ella se observa que, mientras que la chapa aún permanece caliente en el interior del espesor de la chapa, la superficie se ha enfriado rápidamente, y especialmente en una zona muy localizada, como se observa en la siguiente imagen. Del mismo modo, resulta destacable el hecho de que en la zona donde ocurre el enfriamiento más rápido, esta se encuentra relativamente alejada de un conducto de enfriamiento. Adicionalmente, el gradiente máximo ocurre en los instantes iniciales del proceso de enfriamiento, donde la presencia de los conductos es despreciable y predominan los efectos de conducción y disipación de calor en los utillajes. Por todo ello, se concluye que la velocidad de enfriamiento del punto más frío apenas se ve afectado por la presencia de algún conducto.

A: Transient Thermal - 1 ciclo

Temperature 3
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 0,71195
Max: 592,34
Min: 521,74
24/06/2022 18:29

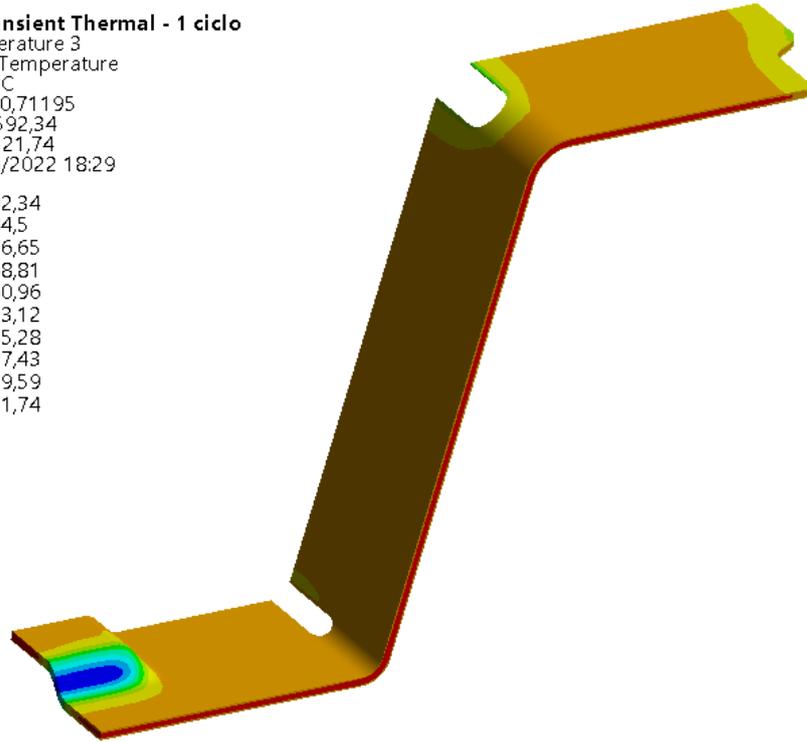
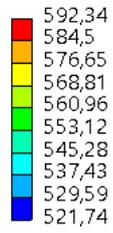


Imagen 82. Optimización 5 – Distribución de temperatura en la chapa en el instante de máximo gradiente térmico

14 Planificación

14.1 Metodología del desarrollo

La fase inicial de un proyecto de investigación, consiste en realizar una recopilación y análisis del estado del arte del campo de estudio. En este caso, por un lado, se ha analizado cual es la actualidad en los procesos de estampación. Del mismo modo, se ha recogido bibliografía acerca otros estudios llevados a cabo en lo que respecta a la optimización de los conductos de enfriamiento de los utillajes

Por otro lado, una parte importante del proyecto son los métodos computacionales. En este caso, en una primera instancia, ha resultado importante indagar en qué algoritmos existen, así como cuales son los que mejor se adaptan a las necesidades del proyecto. Si bien no se ha llegado a profundizar en ellos hasta el nivel de programarlos, para poder implementarlos resulta imprescindible comprender cómo funcionan. Por dicho motivo, esta fase ha ocupado la mayor parte del tiempo de la fase de investigación.

Así pues, la principal fuente de información consultada proviene de artículos de revistas científicas. Sin embargo, para profundizar en algunos campos, como la transmisión de calor y su modelización matemática, también se ha recurrido a libros especializados.

Concluida la fase de investigación, se ha procedido con el desarrollo de la solución, donde, esta, a su vez, podría dividirse en dos fases claramente diferenciadas. En primer lugar, trabajando sobre una geometría sencilla, se ha podido aproxima el problema a uno de transferencia de calor bidimensional. De este modo, al reducir de forma significativa el coste computacional del modelo, ha permitido realizar diferentes análisis de sensibilidad de cara a establecer la metodología de diseño.

Posteriormente, se ha generaliza la metodología a geometrías de utillajes complejas, introduciendo así el proceso de diseño para situaciones que no se puedan aproximar a bidimensionales. Esto ha permitido cumplir con el importante objetivo de diseño, en el que la metodología de cálculo debe ser independiente de la forma de los utillajes.

Finalmente, una vez se han llevado a cabo todas las optimizaciones propuestas, se ha recogido la información necesaria y se ha realizado el correspondiente análisis de los datos. Esto ha permitido, por ejemplo, comparar entre sí las diferentes soluciones o descartar propuestas que en un principio aparentaban ser razonablemente buenas, como el diseño de los conductos mediante splines.

14.2 Planificación Gantt

Al comienzo del proyecto se realizó una planificación para la gestión de los recursos disponibles, donde se establecieron las tareas principales, así como sus derivadas. Para ello, se llevó a cabo un análisis mediante un diagrama de Gantt; este se explica a continuación:

- **Tarea 1: Investigación**
 - Duración: 11 semanas
 - Objetivo: adquirir los conocimientos y la información para tener un punto de partida sobre el que desarrollar el proyecto.
 - Subtareas: 3
 - **Tarea 1.1:** Estudio del estado del arte – Estampación en caliente; hace referencia al proceso de búsqueda de información acerca del proceso de estampación en caliente. Del mismo modo, esta consistió en leer y resumir los contenidos de mayor valor para el proyecto.
 - **Tarea 1.2:** Estudio del estado del arte – Fundamentos matemáticos; con esta etapa se pretendía adquirir los conceptos básicos acerca de los diferentes algoritmos matemáticos a emplear.
 - **Tarea 1.3:** Planteamiento de la metodología; una vez se han estudiado las herramientas matemáticas necesarias, se plantea el procedimiento o ruta de cálculo a seguir.
- **Tarea 2: Desarrollo**
 - Duración: 15 semanas
 - Objetivo: definir la metodología a desarrollar, así como la implementación del método propuesto a una geometría de utillajes.
 - Subtareas: 5
 - **Tarea 2.1:** Implementación de la metodología en Ansys; se estudia cómo poder llevar a cabo el procedimiento propuesto mediante el software de elementos finitos.
 - **Tarea 2.2:** Definición completa de la metodología; a partir de la ruta de cálculo planteada en la tarea 1.3, en esta tarea se termina por definir los detalles y parámetros concretos. Para ello, se lleva a cabo la optimización de la primera geometría propuesta.
 - **Tarea 2.3:** Desarrollo del código de programación; se desarrolla el código mediante Matlab. Este permite realizar el cálculo del Frente de Pareto a partir de los puntos de la optimización; dicho código facilita la tarea del filtrado de datos y selección de las configuraciones óptimas.
 - **Tarea 2.4:** Implementación de la metodología completa; una vez desarrollada la metodología de optimización completa, se propone una aplicación de esta a una geometría general de los utillajes.
 - **Tarea 2.5:** Análisis de resultados; la última etapa del estudio consiste en analizar la ventaja que aporta la implementación de la metodología propuesta frente a las soluciones iniciales.
- **Tarea 3: Documentación**
 - Duración: 2 semanas
 - Objetivo: Redactar y recoger el trabajo realizado. Así mismo, se deberán realizar las imágenes, resumen de resultados y de más tareas ligadas realizar el documento.

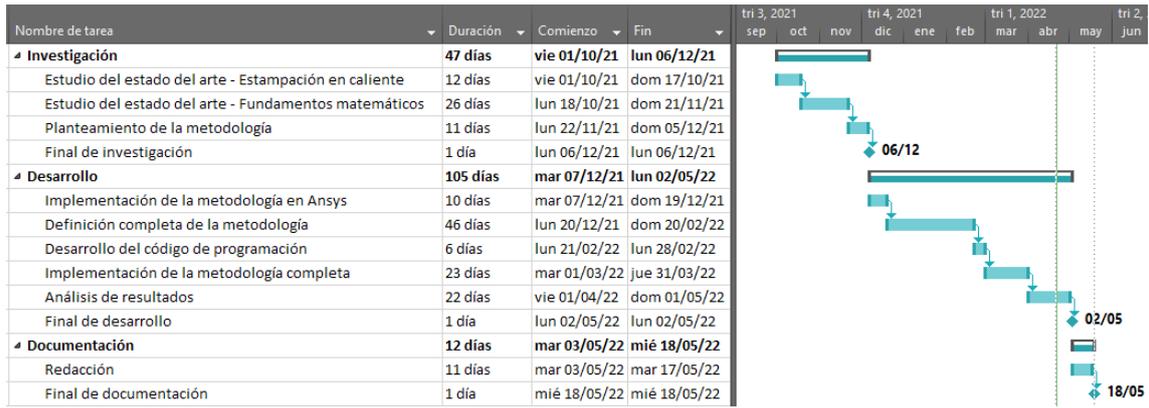


Diagrama 1. Diagrama de Gantt

15 Aspectos económicos

En lo que respecta a los aspectos económicos del proyecto, se recogen a continuación las cinco partes principales que lo componen:

- Recursos humanos
- Recursos materiales
- Amortizaciones
- Costes indirectos
- Imprevistos

Del mismo modo, no se han considerado aquellos gastos que no estén directamente relacionados en el desarrollo del proyecto. Esto aplica, por ejemplo, a ensayos experimentales que pudieran llegar a ser necesarios para la validación de resultados parciales, como el cálculo del coeficiente de transferencia de calor en la interfase. Adicionalmente, cabe destacar que, si bien el tiempo de trabajo personal se estima en unas 600h, el tiempo de cálculo requerido por el ordenador excede ampliamente esta cifra.

En los siguientes apartados se recoge el desglose de los gastos previstos para cada una de los aspectos económicos del proyecto; así mismo, en la siguiente tabla se resumen los presupuestos. En lo que respecta a los costes indirectos, en ellos se incluyen gastos que, si bien resultan necesarios para llevar a cabo el proyecto, no están directamente relacionados con este. Ejemplo de estos gastos son el mantenimiento de equipos, luz, agua o servicio de limpieza. Así pues, se ha supuesto que este aspecto puede llegar a implicar el 5% de la partida de presupuestos total. Finalmente, en lo que respecta a los imprevistos, también se ha supuesto que estos pueden llegar a suponer el 5% del total.

Tabla 36. Resumen de la partida de presupuestos

Apartado	Coste
Recursos humanos	16.200,00 €
Recursos materiales	653,59 €
Amortizaciones	864,45 €
Subtotal	17.718,04 €
Costes indirectos	885,90 €
Imprevistos	885,90 €
Total	19.489,84 €

15.1 Recursos humanos

En este apartado se recogen los recursos humanos necesarios para llevar a cabo el proyecto. En él se pueden distinguir dos figuras principales. Por una parte, está el director del proyecto, cuya función es la de supervisar y guiar correctamente la investigación. Por otra parte, se consideran las horas que han sido necesarias por parte del ingeniero mecánico, dedicadas tanto a la fase de investigación como a la del desarrollo del propio proyecto.

Tabla 37. Presupuesto de los recursos humanos

Recursos humanos	Horas requeridas	Coste unitario	Total
Director del proyecto	60 h	70,00 €/h	4.200,00 €
Ingeniero mecánico	600 h	20,00 €/h	12.000,00 €
Subtotal			16.200,00 €

15.2 Recursos materiales

En lo que respecta a los recursos materiales, en él se recogen los recursos físicos que han sido necesarios para el desarrollo del proyecto. Así pues, resulta importante destacar que, al realizar el presupuesto de este apartado, debido a que se trata de productos comerciales, el I.V.A. ya se ha considerado incluido en el precio, por lo que no resulta necesario considerar una contribución adicional debida a este impuesto; es decir, el subtotal indicado en la siguiente tabla lleva implícito el I.V.A.

Tabla 38. Presupuesto de los recursos materiales

Recursos materiales	Unidades	Coste unitario	Total
Libro: Transferencia de calor y masa	1 unidad	48,4€/unidad	48,43 €
Libro: Neural Network and Deep Learning	1 unidad	53,62 €/unidad	53,62 €
Libro: An introduction to Machine Learning	1 unidad	89,54 €/unidad	89,54 €
Revistas científicas	8 unidades	39,00 €/unidad	312,00 €
Material de oficina	1 unidad	150,00 €/unidad	150,00 €
Subtotal			653,59 €

15.3 Amortizaciones

Finalmente, se recoge el desglose de las amortizaciones referentes tanto del *software*, como del *hardware* informático. Igual que ocurre en el punto anterior, debido a que se trata de productos comerciales, el I.V.A. se incluye de forma implícita en el subtotal. Cabe destacar que, al tratarse de un proyecto docente, el coste de las licencias considerado es el *precio Universitario*, el cual inferior al de las para empresa. Del mismo modo, debido a que la universidad dispone de licencia de Matlab para los alumnos, el coste de dicha licencia se asume que es de cero euros

Tabla 39. Presupuesto de las amortizaciones

Amortizaciones	Horas requeridas	Coste inicial	Vida útil	Total
Ordenador	920 h	1.500,00 €	25.000 h	55,20 €
Catia V5 R19	10 h	1.000,00 €	2.000 h	5,00 €
Ansys 2020 R2	800 h	2.000,00 €	2.000 h	800,00 €
Matlab R2021a	60 h	0,00 €	2.000 h	0,00 €
Microsoft Office 2016	50 h	170,00 €	2.000 h	4,25 €
Subtotal				864,45 €

16 Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo era desarrollar una metodología de cálculo que permitiese optimizar la distribución de los conductos de enfriamiento de los troqueles de estampación en caliente. Así mismo, para garantizar la utilidad del método, se ha trabajado en cumplir los requerimientos y objetivos del proyecto.

De este modo, por un lado, el exhaustivo análisis llevado a cabo en el modelo de elementos finitos, ha permitido reducir en varios ordenes de magnitud el coste computacional del cálculo. Este es, de hecho, un factor determinante a la hora de decantar que un método sea aplicable en la industria.

Por otro lado, el segundo aspecto crítico para evaluar la metodología de diseño propuesta, es la calidad de los resultados que se pueden obtener. Para ello, se han analizado cinco situaciones completamente diferentes entre sí, que han permitido extraer conclusiones de gran interés técnico.

En primer lugar, se ha visto que cuantas menos restricciones se impongan en el dominio de optimización, mejores serán los resultados obtenidos; un modelo poco restringido permitirá explorar soluciones más diversas, aumentando las probabilidades de obtener resultados de mayor calidad.

En segundo lugar, se ha concluido que resulta preferible emplear conductos de mayor diámetro. Estos, a pesar de que, por motivos de fabricación, deban posicionarse más alejados del foco de calor, su mayor coeficiente de convección y mayor perímetro, posibilita que la capacidad de enfriamiento global del sistema aumente.

En tercer lugar, en lo que respecta a las tensiones en el contorno de los conductos, se ha observado que, a pesar de considerarlas en la función objetivo de la optimización, esto no ha afectado de forma significativa a la capacidad de enfriamiento de los resultados. En cambio, sí que se ha obtenido una importante disminución en las tensiones de los utillajes, lo que resulta beneficioso de cara a prolongar su vida útil frente al fallo a fatiga. Adicionalmente, en este estudio también se ha visto que, considerar los esfuerzos generados, no garantiza un distanciamiento mínimo entre conductos; por este motivo, de cara a la fabricación de los utillajes, resultaría necesario efectuar un tratamiento posterior de los datos.

Por último, también se ha estudiado la aplicabilidad del método a una geometría más compleja de los utillajes, donde estos no se pueden aproximar a un problema bidimensional. Para la resolución del problema, se han propuesto dos geometrías de los conductos: conductos de tipo spline y rectos. Con los primeros se obtienen mejores resultados en lo que respecta a la capacidad de enfriamiento, ya que su geometría permite emplear directamente los resultados de la optimización. Sin embargo, dada la complejidad en su fabricación, y la poca mejoría que aportan con respecto a los conductos rectos, hacen que estos últimos resulten la solución ideal a problemas de tipo tridimensional

17 Líneas futuras

En este documento, se ha recogido una metodología para el diseño de los conductos de enfriamiento de troqueles de estampación en caliente. Así pues, si bien los resultados obtenidos han sido favorables y se han alcanzado los objetivos establecidos, aún existen diferentes aspectos que permitirían ampliar la aplicabilidad y utilidad de este método:

- Optimización del circuito de enfriamiento completo
 - Considerar aspectos que han quedado fuera del alcance de este proyecto, como, por ejemplo, el sistema de bombeo o el número de conductos.
- Metodologías de diseño avanzadas
 - Tal y como se ha introducido en el apartado 11.6 existen métodos de optimización basados en la fiabilidad del sistema. Estos permitirían, por ejemplo, realizar la optimización de los conductos considerando posibles errores de fabricación o sobrecargas durante la ida útil de los utillajes.
- Investigación en nuevos métodos computacionales
 - En este trabajo, si bien se han hecho diferentes estudios de sensibilidad para seleccionar los algoritmos de optimización y metamodelos, el análisis se ha centrado en las herramientas previamente incorporadas en Ansys. Sin embargo, dado el rápido crecimiento que están experimentando estas herramientas en la actualidad, es altamente probable que se desarrollen nuevos algoritmos más rápidos y eficientes a los estudiados.
- Determinación de los parámetros de modelización
 - En el desarrollo de este trabajo, todos los parámetros que se han empleado se han obtenido a partir de fuentes bibliográficas o han sido calculados por medio de desarrollos teóricos; los dos ejemplos más claros en este aspecto son el coeficiente de transferencia de calor en la interfase o los coeficientes de convección. Sin embargo, la incertidumbre que existe en los valores empleados es elevada, y requerirían de una validación experimental. Por lo tanto, en este paso se abren dos posibles líneas de futuras a este trabajo:
 - Determinación experimental de los parámetros
 - Desarrollo de modelos matemáticos para el cálculo teórico de los parámetros

18 Bibliografía

- [1] I. Iglesias Valle, A. Lamikiz Mentxaka, A. Gorriño Vicandi, S. Martínez Rodríguez, J. Izaga Maguregi y A. E. Garitaonandia, «Simulación de los ciclos de temperatura en el proceso de estampación en caliente».
- [2] H. Karbasian y A. E. Tekkaya, «A review on hot stamping,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 2103-2118, 2010.
- [3] A. Zakaria, M. N Ibrahim y M. Dezfouli, «CFD Evaluation of Hot Stamping Die Cooling System,» *International Journal of Engineering & Technology*, pp. 68-71, 2018.
- [4] Y. A. Çengel, *Transferencia de Calor y Masa*, McGraw Hill.
- [5] H.-K. Kim, S. Hyeon Lee y H. Choi, «Evaluation of Contact Heat Transfer Coefficient and Phase Transformation during Hot Stamping of a Hat-Type Part,» *Materials*, vol. 8, pp. 2030-2042, 2015.
- [6] P. Salomonsson, M. Oldenburg, P. Akerström y G. Bergman, «Experimental and Numerical Evaluation of the Heat Transfer Coefficient in Press Hardening,» *Steel Research International*, vol. 80, nº 11, pp. 841-845, 2009.
- [7] E. Caron, K. J. Daun y M. A. Wells, «Experimental Characterization of Heat Transfer Coefficients During Hot Forming,» *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 44B, pp. 332-343, 2013.
- [8] X. Ying y S. Zhong-de, «Design parameter investigation of cooling systems for UHSS hot stamping dies,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 70, pp. 257-262, 2013.
- [9] C. C. Aggarwal, *Neural Network and Deep Learning*, Springer, 2018.
- [10] M. Kubat, *An Introduction To Machine Learning*, Springer, 2017.
- [11] H. Xie, W. Cheng, H. Wang, S. Fu, W. Li y W. Xiong, «Multi-objective Reliability-based optimization for cooling channel of UHSS hot-stamping die,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, pp. 3237-3249, 2018.
- [12] J. I. Arrizubieta, M. Cortina, A. Mendioroz, A. Salazar y A. Lamikiz, «Thermal Diffusivity Measurement of Laser-Deposited AISI H13 Tool Steel and Impact on Cooling Performance of Hot Stamping Tools,» *Metals*, vol. 10, pp. 1-13, 2020.
- [13] Z. Zhang, P. Gao, C. Liu y X. Li, «Experimental and Simulation Study for Heat Transfer Coefficient in Hot Stamping of High-Strength Boron Steel,» *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 46B, pp. 2419-2422, 2015.
- [14] Ansys, «ANSYS help,» 2022. [En línea]. Available: <https://ansyshelp.com>.

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE
ENFRIAMIENTO DE UN TROQUEL PARA
ESTAMPACIÓN EN CALIENTE***

ANEXO I – CÓDIGO

Estudiante
Director/Directora
Departamento
Curso académico

Feijóo, Luquin, Álvaro
Angulo, Duque, Carlos
Ingeniería Mecánica
2021-2022

Bilbao, 19, Junio, 2022

1 Introducción

En este anexo se recoge el código desarrollado mediante Matlab, tanto para el cálculo del frente de Pareto, como para la selección de los puntos óptimos en este. Con objeto de facilitar su comprensión e implementación en posibles futuros trabajos, este se ha escrito en un solo script. Del mismo modo, también se incluyen múltiples comentarios que permiten un seguimiento ameno del código.

Cabe destacar que, para introducir los datos de los puntos, estos deben leerse de un documento Excel. Para ello, la primera fila se emplea para establecer las cabeceras o títulos de los datos; el resto de filas se emplean para introducir los datos a analizar. Así pues, en la primera columna se indican las etiquetas de los datos que permiten su identificación, y en el resto de columnas se introducen los valores obtenidos para las diferentes funciones objetivo

A continuación, se muestran dos imágenes a modo de ejemplo, acerca de cómo deben disponerse estos datos en la hoja Excel, para que puedan ser correctamente interpretados.

Design Point	Temperatura maxima, [°C]	Temperatura promedio, [°C]
Ø6-DOE-246	56,0825	51,6139
Ø6-DOE-166	56,2642	51,1654
Ø6-DOE-30	56,1167	51,6845
Ø6-DOE-253	56,3093	51,7308
Ø6-DOE-237	55,9130	50,7767
Ø6-DOE-268	56,5710	50,8240
Ø6-DOE-99	58,0310	51,7306
Ø6-DOE-11	56,7943	51,7104
Ø6-DOE-185	56,9182	51,7363
Ø6-DOE-189	56,6703	51,6703
Ø6-DOE-171	54,5481	51,3304
Ø6-DOE-234	56,7531	51,8172
Ø6-DOE-287	55,4905	51,4541
Ø6-DOE-82	58,0924	51,4105
Ø6-DOE-96	56,4520	51,1160
Ø6-DOE-248	55,6902	51,8538
Ø6-DOE-85	56,0010	51,9362

Imagen 83. Introducción de datos en Excel, ejemplo 1

Design point	A	B	C	D	F	G	H	I
Solución 1	50,75	47,9	80,67	69,32	186,81	85,25	46,11	265,11
Solución 2	50,95	47,9	83,36	69,98	187,77	91,15	49,75	271,83
Solución 3	50,41	47,41	81,54	67,8	185,79	91,07	47,5	262,09
Solución 4	50,27	47,32	80,69	67,55	186,18	88,95	47,21	262,42
Solución 5	51,11	47,81	82,9	68,84	186,37	90,03	47,97	270,76
Solución 6	49,94	47,18	78,21	66,95	185,23	85,96	44,57	261,08
Solución 7	50,25	47,42	79,71	67,74	185,83	86,78	45,76	261,25
Solución 8	50,39	47,67	80,53	68,66	186,27	86,93	46,66	257,84
Solución 9	50,52	47,43	81,16	67,91	185,62	88,05	47,61	264,47
Solución 10	51,37	47,3	78,07	67,29	184,37	82,63	44,27	267,33

Imagen 84. Introducción de datos en Excel, ejemplo 2

2 Código

```
%% Pareto Front
% Author: Álvaro Feijóo Luquin
% Created: 03/04/2022
% Last update: 18/06/2022
%
% Functions:
% - Calculates the Pareto Front of an N-dimensional optimization
  problem
% - Each variable can be maximized or minimized independently
% - Withstands heathers as well as alphanumeric names to identify
  each row (each point). However, they are not compulsory
% - Capable to delete repeated points if required
% - Calculates as many Pareto-isolines as possible
% - Calculates an optimal value on each Pareto isoline according to
  minimum norm criterion. Weight factors can be set to weight the
  relative importance of each parameter
% - Displays the summary of the data
% - Stores the data to a .txt file
% - Plots the results. 2D or 3D plots can be done
% - Different configurations can be chosen with the user-defined
  variables. Some functionalities may be disabled if required
%
% Working mode:
% - Fill the variables in the "Set initial parameters by user"
  section. Anything else should be done out of this section
% - The range of the data must be MxN, where M is the number of
  points, and N is the number of different parameters of the
  optimization
% - Requirement: N>=3 -> The first column has to be for points
  identifying names or numbers. The remaining columns will be used to
  set the Pareto front
% - The first row may be used to set heathers
% - The data will be read form an Excel sheet

%% Reset the workspace
clc; close all; clear;

%% Set initial parameters by the user (User-defined variables)
% Data to read
folder = pwd; -> this combination gets the current folder address
File='Calculos y Resultados.xlsx'; %Excel file name
Sheet='Frente de Pareto'; %Excel sheet name
Range='FX100:GF145'; %At least 3 columns required: 1- Row
  Identification; [2:end]- Data. The first row may be used for
  heathers names

% Optimization parameters
Parameter=["Minimize","Minimize"]; %Maximize / Minimize. A value has
  to be set for each parameter. Otherwise, "Minimize" will be set for
  the missing ones
Weights=[1,1]; %Relative weight / importance of each parameter. The
  larger the weight, the more important the parameter. It is used to
  choose the optimal point of the Pareto front. Weights must be larger
  than 0; otherwise, will be automatically set to 1
Tolerance=0; %Pair of points closer to this distance will be
  deleted. Must be positive, or will be ignored. Equal to cero, only
```

```

repeated points will be deleted. If equal to -1, no points will be
deleted
MaxFronts=1; %"All"; %Maximum number of Pareto-Front Isolines to
calculate. If set to "All", it will calculate as many isolines as
possible

% Plot
DataX='Temperatura máxima, [°C]'; %X label of the plot. Only will be
used in case the Data does not have heathers
DataY='Temperatura promedio, [°C]'; %Y label of the plot. Only will
be used in case the Data does not have heathers
DataZ='Tensión principal máxima, [MPa]'; %Y label of the plot. Only
will be used in case the Data does not have heathers
PlotTitle='Frente de Pareto'; %Plot title name
ColumnsToPlot=[1,2,3]; %First value -> X axis; Second value -> Y
axis; Third value -> Z axis. The Row identificator column does not
count (if you want to plot the second column read on excel, then the
column identificator is 1)
PlotDimension=3; %2 -> 2D plot; 3 -> 3D plot; Plot in 2D or 3D (3D
is only available if the optimization requires 3 or more
parameters). Its value should be equal to the size of ColumnsToPlot
variable
MarkOptimal=true; %Draws, in a different color, the optimal point in
each Pareto Front
SketchType=0; %Sets different geometry to the Pareto Front lines to
make them easier to distinguish. 0-> All lines are identical in
sketch; 1-> Lines with different sketch geometry (alternating - and
--)
NormalizedPlot=false; %If set to true, plots Normalized data;
Normalized data is used to set the optimal point in each Pareto
Front

% Storage of the data
ExportData=false; %Export data to a .txt file
FileName='Results';

%% Automatically set initial parameters
[Data,RowNames,row]=xlsread([folder '\\' File],Sheet,Range);
nPoints=size(Data,1);
nParameters=size(row,2)-1;

if size(Data,2)>nParameters
    NeedCorrect=true;
else
    NeedCorrect=false;
end

Heathers=strings(1,size(row,2));
if size(RowNames,2)==size(row,2)
    HasHeathers=1;
    for i=1:size(Heathers,2)
        Heathers(i)=RowNames(1,i);
    end
else
    HasHeathers=0;
    for i=1:nParameters
        Heathers(i)=num2str(i);
    end
end
end
  
```

```

if isempty(RowNames)==false
    auxRowNames=RowNames(:,1); %Assure data is properly arranged
end
RowNames=strings(nPoints,1);
j=HasHeathers;
for i=1:nPoints
    if isnan(Data(i,1))==false && NeedCorrect==true
        RowNames(i)=num2str(Data(i,1));
    else
        if HasHeathers==1
            RowNames(i)=auxRowNames(i+HasHeathers);
        else
            j=j+1;
            RowNames(i)=auxRowNames(j);
        end
    end
end
end

if NeedCorrect==true
    auxData=Data;
    Data=auxData(:,2:end);
end

for i=1:size(Parameter,2)
    if strcmp(Parameter(i),"Minimize")==false &&
strcmp(Parameter(i),"Maximize")==false
        Parameter(i)="Minimize";
        disp(['Maximize / Minimize wrong written in Parameter '
num2str(i) '. Value set to "Minimize" as default'])
    end
end

if size(Parameter,2)~=nParameters
    auxParameters=Parameter;
    Parameter=strings(1,nParameters);
    for i=1:nParameters
        if i>size(auxParameters,2)
            Parameter(i)="Minimize";
        else
            Parameter(i)=auxParameters(i);
        end
    end

    if nParameters>size(auxParameters,2)
        disp('Missing Maximie / Minimize parameters. Value set to
"Minimize" as default')
    else
        disp('Excesive Maximize / Minimize parameters. Extra values
have been ignored')
    end
end

mult=zeros(size(Parameter,1),1); %Multipliers to modify the sign of
the inequations
for i=1:length(Parameter)
    if strcmp(Parameter(i),"Minimize")
        mult(i)=1;
    elseif strcmp(Parameter(i),"Maximize")
        mult(i)=-1;
    else

```

```

        mult(i)=1;
        disp(['Error with the variable: Parameter(' num2str(i)
    ')]')
    end
end

if Tolerance<0 && Tolerance~=-1
    Tolerance=0;
end

if isstring(MaxFronts)==true
    if strcmp(MaxFronts,'All')==true
        clear MaxFronts
        MaxFronts=nPoints;
    else
        clear MaxFronts
        MaxFronts=1;
        disp('MaxFronts not assigned properly. Value set to 1')
    end
end

if MaxFronts>nPoints
    MaxFronts=nPoints;
end

if SketchType~=0 && SketchType~=1
    disp('SketcType set incorrectly. Only 0 or 1 values are allowed.
    Value set to 0')
    SketchType=0;
end

if length(ColumnsToPlot)~=PlotDimension || PlotDimension==1 ||
PlotDimension>3
    if PlotDimension~=2 || PlotDimension~=3
        disp('PlotDimension should be equal to 2 or 3. Value set to
    2')
    else
        disp('ColumnsToPlot size does not match with PlotDimension.
    Values set to default')
    end
    PlotDimension=2;
    ColumnsToPlot=[1,2];
end

if length(Weights)~=nParameters
    disp('Number of Weight factors does not match with the number of
    parameter. Values set to 1')
    Weights=ones(1,nParameters);
end

if size(Weights,2)==1
    Weights=Weights';
end

for i=1:length(ColumnsToPlot)
    ColumnsToPlot(i)=floor(ColumnsToPlot(i));
    if ColumnsToPlot(i)>nParameters
        disp(['ColumnsToPlot parameter number ' num2str(i) ' exceeds
    Data bounds. Values set to default'])
        ColumnsToPlot=[1 2];
    end
end

```

```

    break
  end

  if Weights(i)<=0
    Weights(i)=1;
    disp(['Weight of parameter ' num2str(i) 'is not properly
defined. Value set to 1'])
  end
end

%% Clear repeated rows
DeleteRow=zeros(nPoints,1); %Remove double points
if Tolerance~-=-1
  EqualCount=0;
  for i=1:nPoints-1
    EuclDist=0;
    for m=1:nParameters
      EuclDist=EuclDist+(Data(i-EqualCount,m)-Data(i+1,m))^2;
    end
    EuclDist=sqrt(EuclDist);
    if EuclDist<=Tolerance %Sometimes, in the limit, it fails
due to numerical errors
      DeleteRow(i)=1;
      EqualCount=EqualCount+1; %The comparison is done with
the first matched point, until a different one y found
    else
      EqualCount=0;
    end
  end

  if sum(DeleteRow)>0
    ClearedData=zeros(nPoints-sum(DeleteRow),nParameters);
    ClearedRows=strings(nPoints-sum(DeleteRow),1);
    DeletedRow=strings(sum(DeleteRow),1); %Stores the names of
the deleted Row, so, afterwards, these names can be exported
    Pos=0;
    DelPos=0;
    EqualCount=0;
    for i=1:nPoints
      if DeleteRow(i)==0
        Pos=Pos+1;
        ClearedData(Pos,:)=Data(i,:);
        ClearedRows(Pos)=RowNames(i);
      else
        DelPos=DelPos+1;
        DeletedRow(DelPos)=RowNames(i);
      end
    end
    RowNames=ClearedRows;
    Data=ClearedData;
    nPoints=size(Data,1);
  end
end

%% Normalize the data
% Prepares the data to get the best point of each Pareto Front
% Best Point Criteria: minimum norm (the closer to the origin, the
better)
NormalizedData=zeros(size(Data));

```

```

for i=1:nParameters
    if abs(min(Data(:,i)))<abs(max(Data(:,i)))
        Min=min(Data(:,i));
        Max=max(Data(:,i));
    else
        Min=max(Data(:,i));
        Max=min(Data(:,i));
    end
    NormalizedData(:,i)=(Data(:,i)-Min)/(Max-Min);
    if mult(i)==-1 %If a value has to be Maximized, maximum values
are brought closer to the origin and minimum ones are moved away. If
a value has to be Minimized, no modifications are required
        NormalizedData(:,i)=1-NormalizedData(:,i);
    end
end
end

Distance=zeros(nPoints,1);
for i=1:nPoints
    Distance(i)=sqrt(sum((NormalizedData(i,:)./Weights(1,:)).^2));
end

% Find the Pareto Front points
TotalPoints=nPoints;
nParetos=0; %Counts the total number of Pareto Fronts
ParetoFrontCoords=zeros(TotalPoints); %Coordinates of the pareto
front points
nParetoFrontPoints=zeros(TotalPoints,1); %Counts how many points
there are on each Front
FilteredData=Data;
Coords=(1:TotalPoints)';

while size(FilteredData,1)>=1 && nParetos<TotalPoints
    nParetos=nParetos+1;
    isPareto=ones(nPoints,1);
    for i=1:nPoints
        for j=1:nPoints
            isBetter=zeros(nParameters,1);
            if i~=j
                for m=1:nParameters
                    if
mult(m)*FilteredData(i,m)<=mult(m)*FilteredData(j,m) %Compares the
same parameter of the two points
                        isBetter(m)=1;
                    end
                end
            end

            if sum(isBetter)==nParameters
                isPareto(j)=0;
            end
        end
    end
end

j=0;
for i=1:nPoints
    if isPareto(i)==1
        j=j+1;
        ParetoFrontCoords(j,nParetos)=Coords(i);
    end
end
end
  
```

```

nParetoFrontPoints(nParetos)=j;

if nParetoFrontPoints(nParetos)==0
    nParetos=nParetos-1;
    break
end

% Sequence to delete the points of the Pareto and start to
calculate a the next Pareto Front
if size(FilteredData,1)-nParetoFrontPoints(nParetos)<=0 %If
there are no more available points, the proces ends
    break
end

auxData=FilteredData;
auxCoords=Coords;
FilteredData=zeros(size(auxData,1)-
nParetoFrontPoints(nParetos),size(auxData,2));
Coords=zeros(size(auxData,1)-nParetoFrontPoints(nParetos),1);
nPoints=size(FilteredData,1);
auxpos=0;
j=0;
for i=1:size(auxCoords,1)
    isCoord=0;
    for r=1:nParetoFrontPoints(nParetos)
        if auxCoords(i)==ParetoFrontCoords(r,nParetos)
            isCoord=1;
            break
        end
    end
    end

    if isCoord==0
        j=j+1;
        FilteredData(j,:)=Data(auxCoords(i),:);
        Coords(j)=auxCoords(i);
    end
end

end

end

%% Gather the Data
ParetoRowNames=strings(TotalPoints,nParetos);
ParetoFronts=zeros(TotalPoints,size(Data,2),nParetos);
ParetoFrontsNormalized=zeros(TotalPoints,size(Data,2),nParetos);
ParetoOptimals=strings(nParetos,1);
OptimalPoints=zeros(nParetos,1);
for j=1:nParetos
    for i=1:nParetoFrontPoints(j)
        ParetoRowNames(i,j)=RowNames(ParetoFrontCoords(i,j));
        ParetoFronts(i,:,j)=Data(ParetoFrontCoords(i,j),:);

ParetoFrontsNormalized(i,:,j)=NormalizedData(ParetoFrontCoords(i,j),
:);

        if i==1 %Get the Pareto Optimal Value on each Pareto Front
            Optimal=Distance(ParetoFrontCoords(i,j));
            ParetoOptimals(j)=RowNames(ParetoFrontCoords(i,j));
            OptimalPoints(j)=ParetoFrontCoords(i,j);
        else

```



```

        'VariableNames', [Heathers(1), TableHeathers]); %Returns
the Pareto Front Points sorted Heathers(2:end)
    disp(Summary)

    if j==min(MaxFronts,nParetos) && sum(DeleteRow)>0
        disp('List of deleted points: ')
        disp(DeletedRow)
    end

    if ExportData==true
        if j==1
            writecell({'Number of initial points: '
num2str(TotalPoints)}],[FileName '.txt'],'WriteMode','append')
            writecell({'Number of deleted points: '
num2str(sum(DeleteRow))}],[FileName '.txt'],'WriteMode','append')
            writecell({'Total Pareto Front isolines: '
num2str(min(MaxFronts,nParetos)) newline
'_____'},[FileName
'.txt'],'WriteMode','append')
        end
        writematrix(['Pareto Front ' num2str(j) '. Number of
points: ' num2str(nParetoFrontPoints(j))],[FileName
'.txt'],'WriteMode','append')
        writematrix([strcat('Pareto Optimal:
',ParetoOptimals(j)) newline],[FileName
'.txt'],'WriteMode','append')
        writematrix(StoreHeathers,[FileName
'.txt'],'WriteMode','append')

        writematrix([ParetoRowNames(1:nParetoFrontPoints(j),j),ParetoFronts(
1:nParetoFrontPoints(j),:,j)],[FileName
'.txt'],'WriteMode','append','Delimiter','tab')

        writematrix('_____',[FileName
'.txt'],'WriteMode','append')
        if j==min(MaxFronts,nParetos) && sum(DeleteRow)>0
            writematrix('List of deleted points: ', [FileName
'.txt'],'WriteMode','append')
            writematrix(DeletedRow,[FileName
'.txt'],'WriteMode','append','Delimiter','tab')
        end
    end
end

DoPlot=true;
end

%% Plot of the results
if DoPlot==true
    ColorStep=255/nParetos;
    ColorArray=zeros(nParetos,3);
    figure(1)
    hold on
    if MarkOptimal==true
        Legend=strings(3*nParetos,1);
    else
        Legend=strings(2*nParetos,1);
    end
    j=0;
    for i=1:nParetos
        ColorArray(i,:)=[1-((i-1)*ColorStep)/255 ((i-
1)*ColorStep)/255 ((i-1)*ColorStep)/255];
    end
end

```

```

    if PlotDimension==3 && nParameters>=3

scatter3(ParetoFronts(1:nParetoFrontPoints(i),ColumnsToPlot(1),i),ParetoFronts(1:nParetoFrontPoints(i),ColumnsToPlot(2),i),ParetoFronts(1:nParetoFrontPoints(i),ColumnsToPlot(3),i),'MarkerEdgeColor',ColorArray(i,:),'Marker','*')
    else

scatter(ParetoFronts(1:nParetoFrontPoints(i),ColumnsToPlot(1),i),ParetoFronts(1:nParetoFrontPoints(i),ColumnsToPlot(2),i),'MarkerEdgeColor',ColorArray(i,:),'Marker','*')
    end
    j=j+1;
    Legend(j)='';
    if MarkOptimal==true
        if PlotDimension==3 && nParameters>=3

plot3(Data(OptimalPoints(i),ColumnsToPlot(1)),Data(OptimalPoints(i),ColumnsToPlot(2)),Data(OptimalPoints(i),ColumnsToPlot(3)),'MarkerEdgeColor',[1-ColorArray(i,1), 1, 0],'Marker','*')
        else

plot(Data(OptimalPoints(i),ColumnsToPlot(1)),Data(OptimalPoints(i),ColumnsToPlot(2)),'MarkerEdgeColor',[1-ColorArray(i,1), 1, 0],'Marker','*')
        end
        j=j+1;
        Legend(j)='';
    end
    if i<=MaxFronts
        if PlotDimension==3 && nParameters>=3
            DataToPlot=zeros(nParetoFrontPoints(i),3);
        else
            DataToPlot=zeros(nParetoFrontPoints(i),2);
        end

[~,Order]=sort(ParetoFronts(1:nParetoFrontPoints(i),ColumnsToPlot(1),i));

        for r=1:nParetoFrontPoints(i)
            if PlotDimension==3 && nParameters>=3

DataToPlot(r,:)=[ParetoFronts(Order(r),ColumnsToPlot(1),i)
ParetoFronts(Order(r),ColumnsToPlot(2),i)
ParetoFronts(Order(r),ColumnsToPlot(3),i)];
            else

DataToPlot(r,:)=[ParetoFronts(Order(r),ColumnsToPlot(1),i)
ParetoFronts(Order(r),ColumnsToPlot(2),i)];
            end
        end
        if SketchType==0
            LineType='-';
        else
            if (-1)^i==-1
                LineType='-';
            else
                LineType='--';
            end
        end
    end
end

```

```

        if PlotDimension==3 && nParameters>=3

plot3(DataToPlot(:,1),DataToPlot(:,2),DataToPlot(:,3),LineType,'Color
r',ColorArray(i,:))
        else

plot(DataToPlot(:,1),DataToPlot(:,2),LineType,'Color',ColorArray(i,:
))
        end
        j=j+1;
        Legend(j)=(['Pareto Front ' num2str(i)]);
    end
end
title(PlotTitle)
if HasHeathers==1
    xlabel(Heathers(ColumnsToPlot(1)+1))
    ylabel(Heathers(ColumnsToPlot(2)+1))
    if PlotDimension==3 && nParameters>=3
        zlabel(Heathers(ColumnsToPlot(3)+1))
    end
else
    xlabel(DataX)
    ylabel(DataY)
    if PlotDimension==3 && nParameters>=3
        zlabel(DataZ)
    end
end

Xlims=[min(Data(:,ColumnsToPlot(1)))
max(Data(:,ColumnsToPlot(1)))];
Ylims=[min(Data(:,ColumnsToPlot(2)))
max(Data(:,ColumnsToPlot(2)))];

if Xlims(1)==Xlims(2)
    if Xlims(1)<0
        Xlims(1)=1.1*Xlims(1);
    elseif Xlims(1)>0
        Xlims(2)=1.1*Xlims(2);
    else
        Xlims(2)=0.1;
    end
end

if Ylims(1)==Ylims(2)
    if Ylims(1)<0
        Ylims(1)=1.1*Ylims(1);
    elseif Ylims(1)>0
        Ylims(2)=1.1*Ylims(2);
    else
        Ylims(2)=0.1;
    end
end

if PlotDimension==3 && nParameters>=3
    Zlims=[min(Data(:,ColumnsToPlot(3)))
max(Data(:,ColumnsToPlot(3)))];
    if Zlims(1)==Zlims(2)
        if Zlims(1)<0
            Zlims(1)=1.1*Zlims(1);
        elseif Zlims(1)>0

```

```

        Zlims(2)=1.1*Zlims(2);
    else
        Zlims(2)=0.1;
    end
end
end

xlim(Xlims)
ylim(Ylims)
if PlotDimension==3 && nParameters>=3
    zlim(Zlims)
end
grid on

if min(nParetos,MaxFronts)>1
    LegendElement=legend(Legend(1:j),'Location','eastoutside');
    title(LegendElement,['Pareto Front Isolines: '
num2str(min(nParetos,MaxFronts))])
    legend('boxoff')
else
    if MarkOptimal==true
        LegendElement=legend({'','','Pareto
Front'},'Location','best');
    else
        LegendElement=legend({'','Pareto
Front'},'Location','best');
    end
    legend('boxoff')
end

if NormalizedPlot==true
    figure(2)
    grid on
    hold on
    for i=1:nParetos
        if PlotDimension==3 && nParameters>=3

scatter3(ParetoFrontsNormalized(1:nParetoFrontPoints(i),ColumnsToPlot
(1),i),ParetoFrontsNormalized(1:nParetoFrontPoints(i),ColumnsToPlot
(2),i),ParetoFrontsNormalized(1:nParetoFrontPoints(i),ColumnsToPlot(
3),i),'MarkerEdgeColor',ColorArray(i,:),'Marker','*')
        if MarkOptimal==true

scatter3(NormalizedData(OptimalPoints(i),ColumnsToPlot(1)),Normalize
dData(OptimalPoints(i),ColumnsToPlot(2)),NormalizedData(OptimalPoint
s(i),ColumnsToPlot(3)),'MarkerEdgeColor',[1-ColorArray(i,1), 1,
0],'Marker','*')
        end
    else

scatter(ParetoFrontsNormalized(1:nParetoFrontPoints(i),ColumnsToPlot
(1),i),ParetoFrontsNormalized(1:nParetoFrontPoints(i),ColumnsToPlot(
2),i),'MarkerEdgeColor',ColorArray(i,:),'Marker','*')
        if MarkOptimal==true

scatter(NormalizedData(OptimalPoints(i),ColumnsToPlot(1)),Normalized
Data(OptimalPoints(i),ColumnsToPlot(2)),'MarkerEdgeColor',[1-
ColorArray(i,1), 1, 0],'Marker','*')
        end
    end
end
if i<=MaxFronts

```

