



Universidad de Málaga
Escuela de Ingenierías Industriales
Departamentos
Máquinas y Motores Térmicos
Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

PROYECTO FIN DE CARRERA

Análisis numérico de un regenerador de porosidad variable y
su influencia en el rendimiento de un motor Stirling

Autora

D^a. Anhelina Stikhun

Directores

Dr. Juan Antonio Auñón Hidalgo

Dr. Felipe García Sánchez

Titulación a obtener: Ingeniero Industrial

Málaga, noviembre de 2017

RESUMEN

En este proyecto se ha realizado la comparación de la construcción actual de regeneradores, de porosidad constante, con una construcción de porosidad variable. El objetivo del mismo es mostrar si la porosidad variable es ventajosa o no de cara al funcionamiento del motor Stirling. El análisis se ha hecho mediante un software de uso comercial.

Para ello, tras un estudio del mismo y la búsqueda de herramienta para su análisis, el regenerador se ha caracterizado mediante su coeficiente de fricción y número de Nusselt. Posteriormente utilizando la caracterización realizada, se ha analizado la influencia de la diferencia de porosidades, así como su emplazamiento respecto de los focos frío y caliente del motor.

El análisis numérico se ha realizado mediante el software Ansys de cuya licencia dispone la Universidad de Málaga.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1: Introducción	15
1.1. Objetivos	15
1.2. Procedimientos	15
1.3. Estructura del proyecto	16
Capítulo 2: Estado del arte	17
2.1. Introducción	17
2.2. Motor Stirling	19
2.2.1. Campos de aplicación del motor Stirling	21
2.3. Análisis numérico	26
2.4. Conclusiones sobre el estado del arte	29
Capítulo 3: Regenerador	31
3.1. Introducción	31
3.2. Características generales	31
3.3. Clasificación	37
3.3.1. Dirección de entrada de flujo	37
3.3.2. Disposición de las capas consecutivas	38
3.4. Factores geométricos	39
3.5. Nomenclatura	41
3.6. Porosidad variable	41
Capítulo 4: Análisis numérico	43
4.1. Introducción	43
4.2. Diseño geométrico	45
4.2.1. Regenerador de porosidad uniforme	46
4.2.2. Regenerador de porosidad variable	54
4.3. Mallado del cuerpo regenerador	56
4.4. Análisis numérico	65
4.4.1. Modelado matemático	65
4.4.2. Análisis numérico con software Fluent	69
4.5. Análisis de los resultados	77
Capítulo 5: Resultados	79
5.1. Introducción	79
5.2. Caída de presión	79

5.2.1.	Introducción.....	79
5.2.2.	Principios computacionales	80
5.2.3.	Validación del modelo.....	80
5.2.4.	Resultados.....	81
5.3.	Transferencia térmica	89
5.3.1.	Introducción.....	89
5.3.2.	Principios computacionales	89
5.3.3.	Validación del modelo.....	89
5.3.4.	Resultados.....	90
5.4.	Modelado del medio poroso.....	102
5.4.1.	Introducción.....	102
5.4.2.	Caracterización del medio poroso	102
5.4.3.	Validación del medio poroso.....	104
5.4.4.	Modelado de flujo oscilante	105
Capítulo 6: Conclusiones y desarrollos futuros		113
6.1.	Conclusiones.....	113
6.2.	Desarrollos futuros	114
Bibliografía		117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Consumo de energías primarias	17
Figura 2.2: Esquema de uso de la micro-cogeneración en una vivienda	19
Figura 2.3: Motor Stirling	20
Figura 2.4: Motor Stirling tipo Alfa (b), Beta (b) y Gamma (c).....	21
Figura 2.5: Motor Stirling de pistón libre	21
Figura 2.6: Motor Stirling termo-acústico	22
Figura 2.7: Colector solar con motor Stirling	23
Figura 2.8: Colectores solares con motor Stirling del proyecto SOLARDIS	23
Figura 2.9: Instalación de micro-cogeneración en la edificación.....	24
Figura 2.10: Equipo de micro-cogeneración	25
Figura 2.11: Sistema Stirling Cryocooler.....	25
Figura 2.12: Motor Stirling combustible nuclear.....	26
Figura 2.13: Distintos niveles de discretización de un medio continuo.....	27
Figura 2.14: Análisis de fluidos dinámicos con software ANSYS CFX.....	28
Figura 3.1: Posición del regenerador en un motor Stirling.....	31
Figura 3.2: Ciclo motor Stirling (a) esquema del regenerador (b).....	32
Figura 3.3: Trayectoria de las partículas dentro de un motor Stirling.....	33
Figura 3.4: Cilindro Whispergen (a) y regenerador de un motor Stirling (b)	34
Figura 3.5: Malla regenerador Stirling.....	35
Figura 3.6: Configuraciones de regenerador de motor Stirling.....	35
Figura 3.7: Imagen del regenerador.....	36
Figura 3.8: Malla regenerador Stirling.....	36
Figura 3.9: Malla tejida de filamento metálico.....	37
Figura 3.10: Capas de mallas tejidas y apiladas	37
Figura 3.11: Stacked Wire Screen y Wound Wire Screen	38
Figura 3.12: Regenerador motor Stirling.....	38
Figura 3.13: Configuración colocación capas: paralela alineada aleatoriamente (a), alineada (b), alineada trasversal (c), desalineada y sin contacto (d)	39
Figura 3.14: Diámetro de filamento dw y la separación entre los filamentos l	40
Figura 4.1: Proyecto en el espacio de trabajo de Ansys.....	43
Figura 4.2: Proyecto en Design Modeler	44
Figura 4.3: Creación de proyecto para el mallado.....	44
Figura 4.4: Creación de proyecto para análisis numérico.....	45
Figura 4.5: Proyecto del Results	45
Figura 4.6: Representación de regenerador porosidad uniforme y porosidad variable.....	45
Figura 4.7: Creación de croquis paramétricos.....	46
Figura 4.8: Croquis de un regenerador de porosidad uniforme.....	47
Figura 4.9: Acotación de croquis de un regenerador de porosidad uniforme.....	47
Figura 4.10: Creación de filamentos	47
Figura 4.11: Creación de patrón de primera capa de filamentos.....	48
Figura 4.12: Dirección de creación del parón de la primera capa de filamentos	48
Figura 4.13: Patrón de la primera capa de los filamentos	49
Figura 4.14: Creación de una malla desalineada y sin contacto	49
Figura 4.15: Dos capas de filamentos formando una estructura desalineada y sin contacto	50

Figura 4.16: Dos capas de filamentos formando una estructura desalineada y sin contacto, vista isométrica.....	50
Figura 4.17: Dos capas de filamentos formando una estructura desalineada y sin contacto, vista de perfil.....	51
Figura 4.18: Creación de longitud deseada de regenerador a estudiar.....	51
Figura 4.19: Creación de la envolvente con la herramienta enclosure	52
Figura 4.20: Sección del regenerador para la creación de la geometría deseada.....	52
Figura 4.21: Sección del regenerador por cuatro planos para la creación de la geometría deseada	53
Figura 4.22: Selección de cuerpos a suprimir para la creación de geometría deseada	53
Figura 4.23: Regenerador de porosidad uniforme, vista isométrica.....	54
Figura 4.24: Regenerador de porosidad uniforme, visión lateral.....	54
Figura 4.25: Regenerador S80 – 68%/–NC de porosidad $\Pi v = 0.68$	55
Figura 4.26: Regenerador de porosidad variable vista isométrica.....	55
Figura 4.27: Regenerador de porosidad variable vista de perfil.....	56
Figura 4.28: Creación de proyecto de mallado	56
Figura 4.29: Importación de geometría en el programa Mesh	57
Figura 4.30: Superficie de contacto entre filamentos y fluido de trabajo	57
Figura 4.31: Nombramiento de zona Filamentos	58
Figura 4.32: Nombramiento de zona Fluido	58
Figura 4.33: Nombramiento de Entrada	59
Figura 4.34: Nombramiento de Salida	59
Figura 4.35: Creación de superficies simétricas	60
Figura 4.36: Características de la malla del regenerador uniforme	61
Figura 4.37: Malla del regenerador porosidad uniforme.....	62
Figura 4.38: Detalle de la malla del regenerador porosidad uniforme	62
Figura 4.39: Detalle del mallado de los filamentos	62
Figura 4.40: Mallado de la zona de Fluido.....	63
Figura 4.41: Características de la malla de porosidad variable.....	64
Figura 4.42: Mallado del regenerador de porosidad variable.....	64
Figura 4.43: Malla de los filamentos del regenerador de porosidad variable	65
Figura 4.44: Importación de la malla en el programa Fluent	69
Figura 4.45: Selección del método de resolución	70
Figura 4.46: Elección de tipo de simulación	70
Figura 4.47: Creación de propiedades en función de la temperatura.....	71
Figura 4.48: Selección de material para el regenerador.....	72
Figura 4.49: Selección de material para los filamentos	72
Figura 4.50: Código para la creación de velocidad senoidal.....	73
Figura 4.51: Definición de condiciones de contorno.....	74
Figura 4.52: Acoplamiento térmico de regiones de contacto	75
Figura 4.53: Método de inicialización	76
Figura 4.54: Ajustes de método de inicialización	76
Figura 4.55: Características temporales de simulación.....	77
Figura 4.56: Observación de la presión en un plano medio.....	78
Figura 4.57: Observación del campo vectorial de velocidad	78
Figura 5.1: Caída de presión del regenerador de porosidad uniforme	82
Figura 5.2: Detalle de la caída de presión en el regenerador de porosidad uniforme visión lateral.....	82
Figura 5.3: Detalle de la caída de presión en el regenerador de porosidad uniforme vista isométrica	83
Figura 5.4: Caída de presión en el regenerador de porosidad variable $\Pi v = 0.63$ y $\Pi v = 0.69$	83
Figura 5.5: Detalle de la caída de presión en el regenerador de porosidad variable $\Pi v = 0.63$ y $\Pi v = 0.69$ visión lateral.....	84

Figura 5.6: Detalle de la caída de presión en el regenerador de porosidad variable $\Pi v = 0.63$ y $\Pi v = 0.69$ vista isométrica.....	84
Figura 5.7: Campo vectorial de velocidad en el regenerador de porosidad uniforme.....	87
Figura 5.8: Campo vectorial de velocidades en el regenerador de porosidad variable.....	87
Figura 5.9: Campo de velocidades regenerador porosidad uniforme	88
Figura 5.10: Campo de velocidades regenerador porosidad variable	88
Figura 5.11: Gradiente de temperatura en regenerador de porosidad uniforme en $t=0.27(s)$	91
Figura 5.12: Gradiente de temperatura en regenerador de porosidad variable en $t=0.27(s)$	91
Figura 5.13: Gradiente de temperatura en regenerador de porosidad uniforme $\Pi v = 0.63$ en $t=0.27(s)$	93
Figura 5.14: Gradiente de temperatura vista isométrica en el fluido en el regenerador de porosidad uniforme $\Pi v = 0.63$ en $t=0.27(s)$	93
Figura 5.15: Gradiente de temperatura en plano medio en regenerador de porosidad uniforme $\Pi v = 0.63$ en $t=0.27(s)$	94
Figura 5.16: Gradiente de temperatura en el regenerador de porosidad variable $\Pi v = 0.63$ y $\Pi v = 0.69$ en $t=0.27(s)$	94
Figura 5.17: Gradiente de temperatura en un regenerador de porosidad variable, vista isométrica.	95
Figura 5.18: Gradiente de temperatura en un plano medio en el regenerador de porosidad variable $\Pi v = 0.63$ y $\Pi v = 0.69$ en $t=0.27(s)$	95
Figura 5.19: Caída de presión el regenerador de porosidad uniforme $\Pi v = 0.63$	96
Figura 5.20: Caída de presión en un plano ZY en el regenerador de porosidad uniforme $\Pi v = 0.63$	97
Figura 5.21: Caída de presión en un plano medio en el regenerador de porosidad uniforme $\Pi v = 0.63$	97
Figura 5.22: Caída de presión del regenerador de porosidad variable $\Pi v = 0.63$ y $\Pi v = 0.63$	98
Figura 5.23: Caída de presión en un regenerador de porosidad uniforme vista isométrica	99
Figura 5.24: Caída de presión en plano medio del regenerador de porosidad variable $\Pi v = 0.63$ y $\Pi v = 0.69$ en $t=0.27(s)$	99

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Grafica 2.1: Evolución de la potencia instalada (MW) en Cogeneración en España	18
Grafica 3.1: Ciclo Stirling presión vs volumen (a) temperatura vs entropía (b)	32
Grafica 3.2: Temperaturas de un regenerador de motor Stirling	34
Grafica 5.1: Validación del coeficiente de fricción.....	81
Grafica 5.2: Caída de presión en el regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable	85
Grafica 5.3: Velocidad media en regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable	86
Grafica 5.4: Validación del número de Nusselt.....	90
Grafica 5.5: Temperatura media de los filamentos del regenerador de porosidad variable $\Pi v = 0.63$ y $\Pi v = 0.69$ en $t=0.27(s)$	92
Grafica 5.6: Temperatura media de fluido en $t=0.27(s)$	96
Grafica 5.7 Presión de fluido en el regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable en el instante de tiempo $t=0.27(s)$	100
Grafica 5.8: Temperatura de los filamentos en el regenerador de porosidad uniforme y regenerador de porosidad variable, en función del tiempo.....	100
Grafica 5.9: Temperatura de fluido de los regeneradores de porosidad uniforme y de porosidad variable, en función del tiempo.....	101
Grafica 5.10: Flujo de calor en el regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable	101
Grafica 5.11: Coeficiente de fricción vs número de Reynolds	103
Grafica 5.12: Caída de presión del regenerador vs caída de presión del equivalente medio poroso.....	105
Grafica 5.13: Caída de presión en regeneradores con la misma porosidad media.....	106
Grafica 5.14: Diferencia de temperatura en regeneradores con la misma porosidad media	107
Grafica 5.15: Caída de presión en regeneradores de porosidad creciente	108
Grafica 5.16: Diferencia de temperatura en regeneradores de porosidad creciente	109
Grafica 5.17: Caída de presión en regeneradores de porosidad decreciente	109
Grafica 5.18: Diferencia de temperatura en regeneradores de porosidad decreciente	110
Grafica 5.19 Tendencia de la caída de presión en regeneradores de porosidad creciente y decreciente	111
Grafica 5.20 Tendencia de la diferencia de temperatura en regeneradores de porosidad creciente y decreciente.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Parámetros geométricos de Regenerador Stirling	41
Tabla 5.1: Resultado caída de presión.....	85
Tabla 5.2: Coeficientes característicos de mallas estudiadas	104

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetivos

El objetivo de este estudio es el análisis numérico de un regenerador de motor Stirling con porosidad variable usando un software comercial y con ello la búsqueda de una mejora en el rendimiento del motor.

Para ello se estudiarán las características de un regenerador de motor Stirling. En que consiste, que parámetros definen la porosidad y de qué forma modelar una porosidad variable. Posteriormente se estudiarán qué fenómenos físicos intervienen durante el funcionamiento del regenerador. El objetivo es comprender la influencia de cada uno de ellos y de que forma una variación de los mismos mejoraría el rendimiento del motor Stirling.

Una vez comprendido su funcionamiento, será necesaria la búsqueda de un software numérico capaz de modelar el regenerador y los fenómenos físicos producidos en su interior. Dicho software deberá reunir tales características como herramientas para definición de una porosidad determinada y su variación en el regenerador, herramientas para un análisis de los fenómenos físicos y una herramienta para el procesamiento de los resultados.

Un primer objetivo es conseguir modelar y analizar un regenerador con dos porosidades diferentes, y variando la ubicación de cada una respecto de los focos frío y caliente, observar su influencia en el rendimiento del regenerador de motor Stirling.

Un objetivo secundario de este proyecto será la elaboración de una guía para el modelado y análisis de porosidad variable en un regenerador Stirling y un estudio paramétrico de la misma.

1.2. Procedimientos

El procedimiento para la realización de este proyecto comienza con la comprensión del funcionamiento de motor Stirling y el papel que desempeña en ello el regenerador. Se estudiarán las características que determinan la porosidad y los procesos físicos en los que influye.

Una vez comprendido esto y seleccionado el software numérico, el siguiente paso será el modelado de una malla del regenerador en tres dimensiones. Posteriormente se creará una malla de mismo tamaño cuya porosidad será variable. El siguiente paso será validar el modelo creado con estudios previos [1] [2]. Para ello se calcula la caída de presión y se determina el coeficiente de fricción característico de la malla. La primera comparación a estudiar será la caída de presión a través de una malla de porosidad variable y porosidad

uniforme. Se observarán las diferencias y la variación de velocidad entre distintas mallas. El siguiente paso será la validación del modelo de transferencia térmica con los estudios previos mediante el cálculo de número de Nusselt. Se observará la caída de presión y la evolución de la temperatura tanto en la malla como en el fluido.

Una vez realizados los pasos previos, una malla del motor Stirling en tres dimensiones quedará caracterizada para la simulación del medio poroso. En este caso se simularán mallas de distintas porosidades y se observarán resultados de las mismas.

1.3. Estructura del proyecto

La memoria se divide en seis capítulos que se agrupan en el orden necesario y desarrollan las tareas necesarias para la realización de presente estudio.

Los dos primeros son introductorios del proyecto. El primer capítulo expone los objetivos, procedimientos y a estructura del proyecto. El capítulo dos se dedica al estado del arte, es decir, la descripción de las tecnologías desarrolladas alrededor del motor Stirling, y la creciente capacidad de los programas ingenieriles para el modelado de sistemas físicos.

El capítulo tres se dedica a la descripción del regenerador del motor Stirling. Se estudia su funcionamiento e influencia en el rendimiento del motor, tales como la caída de presión y la transferencia térmica. Se describen características como materiales de los que se construye, los elementos que lo componen y cómo la disposición de los mismos deriva en distintos tipos de regeneradores.

El capítulo cuatro describe el proceso de realización de un estudio del regenerador con un software ingenieril que consta de cuatro pasos principales. Comienza con la creación de la geometría del regenerador previamente estudiado. Se crea un modelo con la porosidad uniforme y otro con la porosidad variable. Posteriormente se describe el segundo de los pasos fundamentales que es el mallado de la geometría creada. El paso tres es el propio análisis numérico donde se describen las particularidades de la simulación. Y por último se describe el análisis de los resultados de las simulaciones.

El capítulo cinco se dedica a describir el resultado de distintos estudios realizados. Como primer paso, se describe la caída de presión de un flujo unidireccional a través de los modelos creados y se comparan entre ellos. Posteriormente, se estudia la transferencia térmica dentro de los dos modelos y se comparan. Al observar la diferencia de los fenómenos descritos entre mallas de distintas porosidades se decide proseguir con el estudio aumentando el tamaño del modelo y estudiar los efectos de un flujo pulsante. Para ello se caracteriza la malla como un medio poroso con lo que se trabaja de ahí en adelante. Se describen las diferentes porosidades estudiadas y la diferencia entre las mismas.

Finalmente, el capítulo seis se reserva para las conclusiones y las líneas futuras.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Introducción

El cambio climático influye tanto en los países desarrollados, cuyo desarrollo se debe a los combustibles fósiles, como en los países menos desarrollados, que no se han beneficiado del uso de los mismos, pero sufren más al tener menos recursos para hacer frente al calentamiento global. Después de siglos de influencia y presencia del petróleo, el gas y el carbón, en todos los ámbitos de la producción de la energía, se abre paso a una nueva transición.

En la Figura 2.1 se representa el consumo de fuentes de energía de los años 1800 – 2015

Consumo de energías primarias , 1800-2015

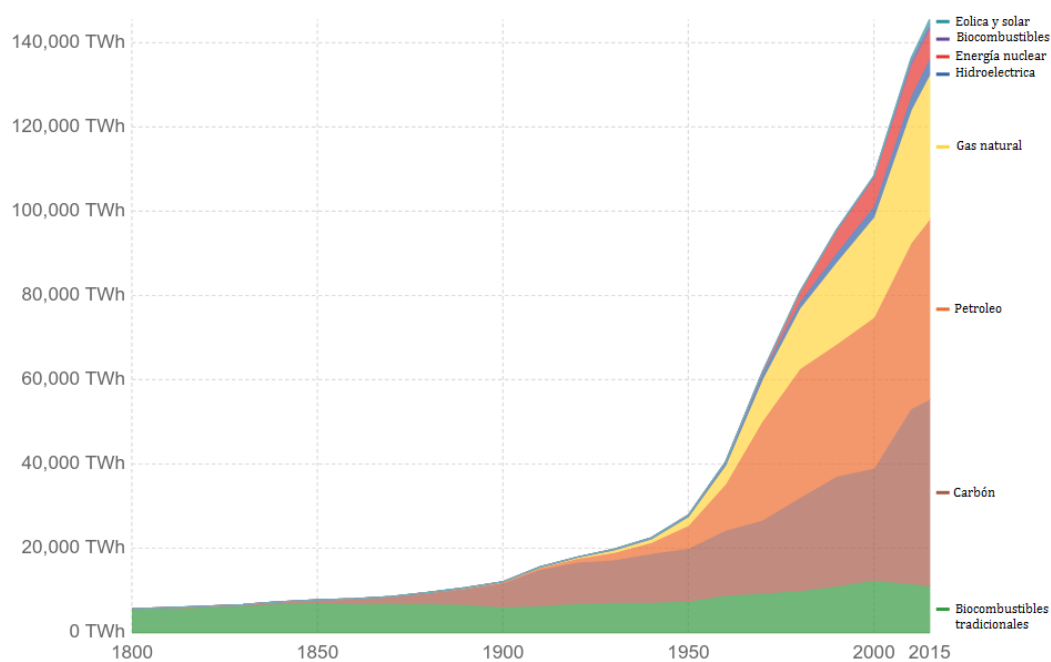


Figura 2.1: Consumo de energías primarias

(Fuente: OurWorldInData.org)

Aunque los combustibles fósiles se usan desde hace 200 años, el punto de inflexión se produce en los años cincuenta del siglo pasado, cuando se dispara el uso del petróleo para

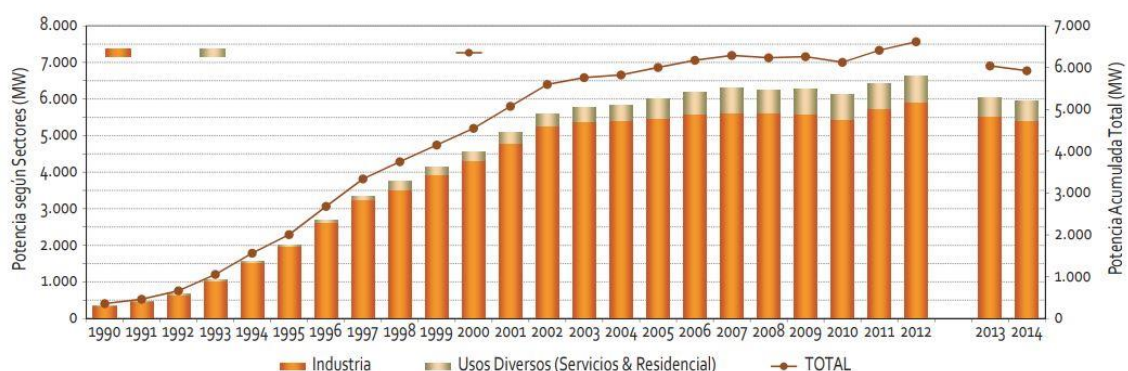
el transporte. El aumento del consumo de combustibles fósiles supuso el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero [3].

Estos hechos inician un cambio en la manera de producir la energía. El carbón ha reducido su participación en el uso mundial energético [4]. Para 2050 Europa se ha comprometido a reducir entre un 80% y un 95% sus emisiones de gases de efecto invernadero [5] que en su mayoría proceden de la quema de los combustibles fósiles. La última central de carbón en Reino Unido echará el cierre en 2025 [6]. Alrededor de 170 países tienen establecidos objetivos de implantación de energías renovables [7]. Paralelamente, la implantación de las nuevas energías renovables (solar y eólica), gracias en gran medida a los avances tecnológicos que han abaratado los costes, se está disparando. Como ejemplo de ello, Escocia pone en marcha el primer parque eólico flotante del mundo [8], Tesla presenta su nueva propuesta de paneles solares insertados en las tejas de los tejados de las casas [9].

A pesar de ello, ciertos hechos impiden el desarrollo de las energías renovables, tales como la prohibición del autoconsumo de energía solar, a pesar de que otros países demuestren sus beneficios [9]. La crisis económica redujo el consumo de electricidad en España, y con la recuperación la proporción de electricidad procedente de fuentes de energías limpias está cayendo [10]. Sin embargo, infinidad de estudios plantean un horizonte 100% renovable [11]. El cambio depende del desarrollo de nuevas tecnologías para almacenamiento de electricidad. El equipo de Mark Z. Jacobson, de la Universidad de Stanford, estima que 139 países del mundo, entre ellos España, podrían depender solo de las energías renovables en 2050. Se puede deducir entonces la transición energética en la que se encuentra la economía mundial.

El consumo de energía en España ha descendido en el sector de la industria debido a la reducción de su actividad durante la crisis. Mientras tanto, en los sectores residencial y terciario, la demanda se ha incrementado por la mayor actividad en servicios. También ha aumentado la demanda en el transporte. En relación con los combustibles se produce una disminución en consumo de gas y un aumento de consumo de productos petrolíferos. El consumo de energías renovables se mantiene [12].

La cogeneración de la energía eléctrica tiene una estrecha dependencia con la industrial, y se encuentra presente en una amplia diversidad de ramas. En la Grafica 2.1 se representa la potencia instalada en cogeneración en España.



Grafica 2.1: Evolución de la potencia instalada (MW) en Cogeneración en España

(Fuente: MINETUR/IDAE)

Más de la mitad de estas instalaciones corresponden a cogeneración de pequeña escala (1 MW), ubicadas en su mayoría en los sectores servicios y residencial.

La micro-cogeneración en sector residencial consiste, al igual que en la cogeneración, en la generación de la electricidad y energía térmica a la vez en el lugar de producción, mediante el uso de un combustible que suele ser gas natural. Se denomina micro-cogeneración

porque se realiza en equipos de potencia menor a 50 kW. Tiene un alto rendimiento y permite tener un ahorro económico en el consumo de energía primaria. Además, permite la generación de electricidad distribuida, pudiendo verter la electricidad generada a la red.

En la Figura 2.2 se representa un esquema del funcionamiento de la micro-cogeneración en el hogar. Entre sus distintos tipos existen equipos de micro-cogeneración con motor Stirling, cuyo uso es muy extendido.

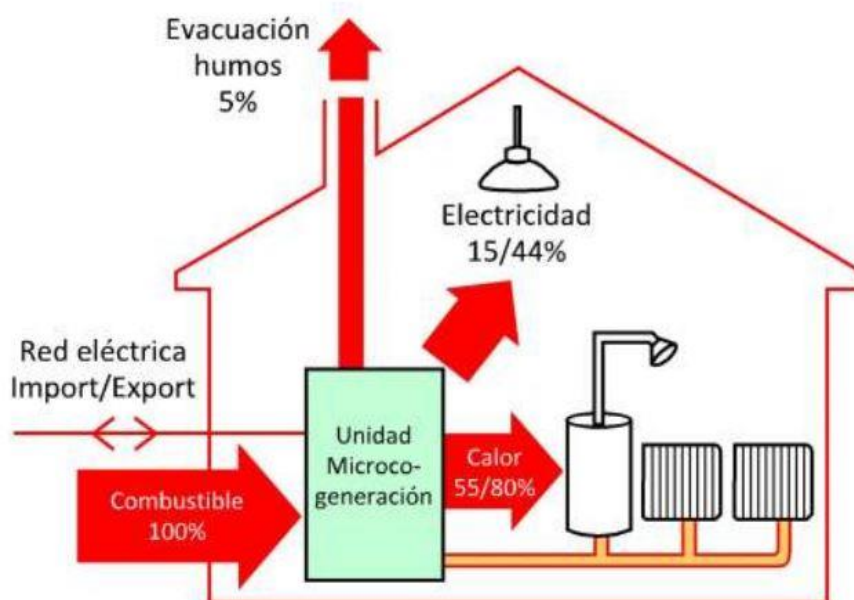


Figura 2.2: Esquema de uso de la micro-cogeneración en una vivienda

(Fuente: certificadosenergeticos.com)

Hoy en día existe una gran inquietud respecto al desarrollo económico mundial y su dependencia de la energía. Las predicciones sobre el agotamiento de combustibles fósiles en los próximos 50 años y el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero incrementaron la búsqueda de energías más eficientes. Se ha potenciado la búsqueda y adaptación de las nuevas tecnologías que usan energías más eficientes, y la mejora de las tecnologías ya existentes, implantando su uso en numerosos sectores.

Uno de ellos es el motor de tipo Stirling y su amplio abanico de usos.

2.2. Motor Stirling

El motor Stirling representado en la Figura 2.3, fue creado por Robert Stirling en 1816, quien lo concibió como un primer motor diseñado para rivalizar con el motor de vapor, y en la práctica su uso se redujo a aplicaciones domésticas por casi un siglo. Es un motor de ciclo cerrado en cuyo interior se encuentra un pistón que separa dos cámaras, una de expansión y otra de compresión.

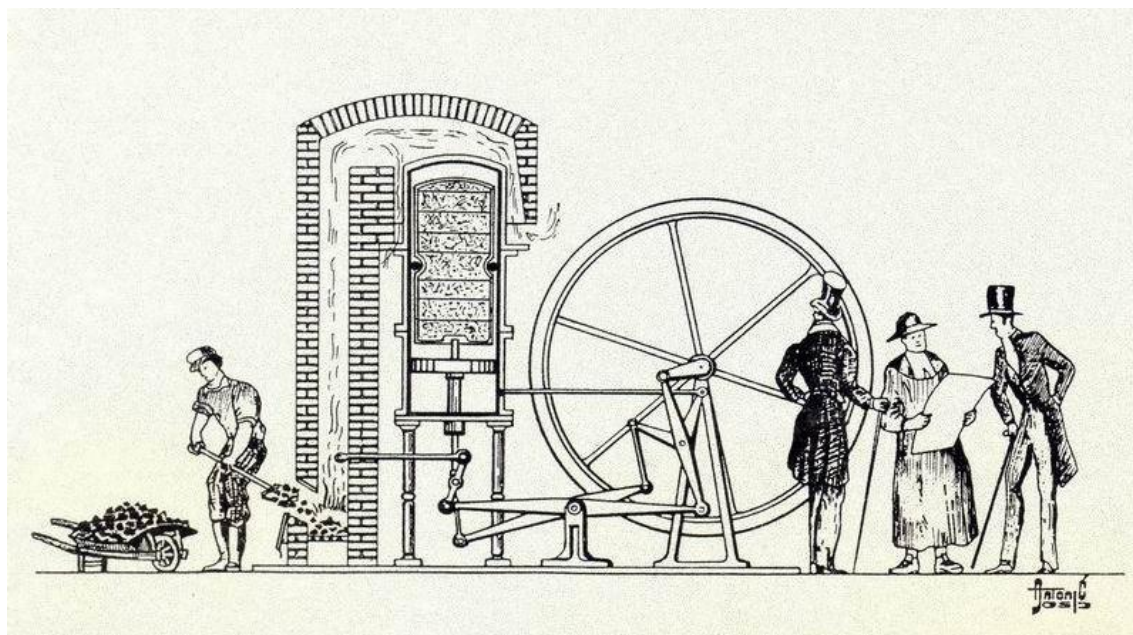


Figura 2.3: Motor Stirling

(Fuente: egergialternativa.info)

La cámara de expansión se calienta mediante un foco de combustión externa llegando a alcanzar la temperatura superior a 500 °C en la misma. En el interior se encuentra un fluido de trabajo cuya expansión provoca el movimiento alternativo del pistón. Posteriormente el fluido de trabajo pasa a través de un regenerador a la cámara de compresión donde se enfría para luego volver a la cámara de expansión y con ello volver a repetir el ciclo. Dicho regenerador es la parte crucial del motor cuya presencia genera el mayor impacto en su rendimiento [13]. Según [14] el regenerador contribuye a un aumento del 1.5% en la eficiencia térmica del motor y en un 11% al aumento de caída de presión. Por ello es importante encontrar un equilibrio entre las dos particularidades nombradas.

La eficiencia teórica del motor Stirling junto con una regeneración ideal lo iguala al rendimiento de Carnot. La mayor aplicación al desarrollo de este invento, ha sido el regenerador. Los actuales motores Stirling alcanzan un rendimiento entre el 20% y el 60% del rendimiento de Carnot [15].

La ya explicada compresión-expansión del fluido del trabajo genera el movimiento alternativo del pistón interior el cual se usa para la propulsión de vehículos [16], generación de energía eléctrica [17], y otros que se explican a continuación.

Las características que hacen de un motor Stirling un sistema de gran interés son su alto rendimiento térmico y mecánico, bajo índice de emisiones, flexibilidad respecto al combustible utilizado y baja contaminación acústica. La creación de nuevos materiales [14] y técnicas de fabricación abrieron las puertas a nuevas investigaciones y uso del motor Stirling. Uno de los estudios perteneciente a la NASA investiga las aplicaciones del motor Stirling utilizando el combustible nuclear.

A pesar de haber sido creado en el siglo 19, no fue hasta la mitad del siglo 20 cuando surgió el auge de investigación y desarrollo de distintos modelos, configuraciones y aplicaciones del motor Stirling [18] [19].

2.2.1. Campos de aplicación del motor Stirling

Propulsión de los vehículos

Es la aplicación más extendida del motor Stirling [20]. Existen tres configuraciones más popularmente desarrolladas: tipos alfa, tipo beta más desarrollada y la más ampliamente investigada gamma, cuyos esquemas se pueden observar en la Figura 2.4.

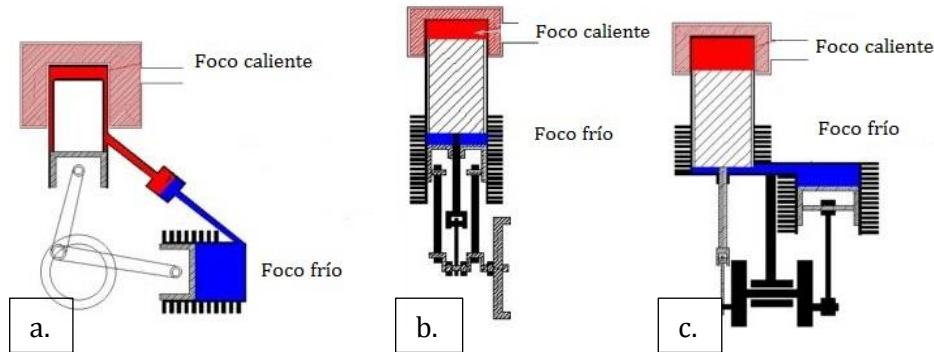


Figura 2.4: Motor Stirling tipo Alfa (a), Beta (b) y Gamma (c)

(Fuente: seas.es)

El motor de tipo alfa se caracteriza por la falta del desplazador. Los cilindros independientes están interconectados por un tubo donde se ubica el regenerador, y en cada uno de los cilindros se encuentra un pistón, que se mueve 90 grados desfasado respecto al otro. El motor de tipo beta aloja en el cilindro un desplazador concéntrico al pistón de potencia. Gracias a un cigüeñal especial el movimiento de ambos está desfasado 90 grados. Y finalmente en motor de tipo gamma es una variante de un motor Stirling tipo beta. Consta de dos cilindros separados. En uno se sitúa el desplazador y en otro el pistón de potencia. Ambos se mueven desfasados 90 grados gracias a un cigüeñal adecuado.

Hoy en día los estudios de estos motores se centran en parámetros que afectan el rendimiento térmico y mecánico y en posibles formas de mejorarlos [21].

Además de las configuraciones previamente mencionadas existen otras configuraciones tales como Stirling de pistón libre [22] de la Figura 2.5. Este tipo de motor es adecuado en aplicaciones donde no se necesita transmitir potencia a un eje giratorio, como en caso de un compresor, bomba de agua o generador eléctrico. Esto permite un funcionamiento de varios años sin ningún tipo de mantenimiento [23].

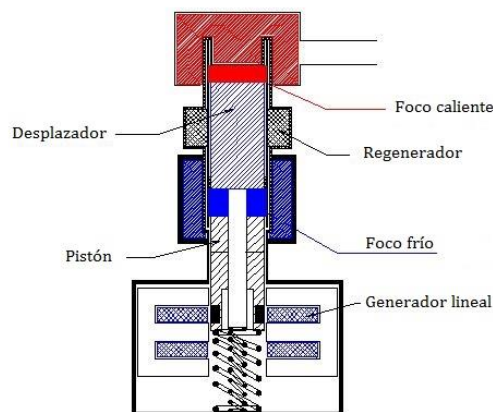


Figura 2.5: Motor Stirling de pistón libre

(Fuente: tecmotor.wordpress.com)

Como ejemplo de aplicación del motor Stirling en la propulsión de vehículos son vehículos híbridos cuyas bajas emisiones contaminantes y el elevado rendimiento obtenido a partir del combustible los hace atractivos para la fabricación y uso. Este tipo de vehículos están provistos de un motor de combustión y otro eléctrico. Los mismos se pueden clasificar en dos tipos:

Vehículo híbrido eléctrico en serie: donde el motor de combustión actúa como generador de electricidad, y el motor eléctrico se encarga de la propulsión del vehículo. Entre el motor de combustión y el motor eléctrico se sitúan las baterías para el almacenamiento de la energía eléctrica y su posterior uso.

Vehículo híbrido eléctrico en paralelo: en este tipo de vehículos tanto el motor de combustión como el motor eléctrico generan el movimiento alternativo para la propulsión del vehículo. De esta forma, un vehículo circulando por la ciudad puede utilizar para la propulsión el motor eléctrico, utilizando como apoyo el motor de combustión cuando se requiere una potencia elevada.

Stirling termo-acústico [24] de la Figura 2.6. Este motor carece de pistón desplazador y por tanto, carece del sistema de acoplamiento entre los dos pistones del motor original. Funciona gracias a ondas de presión que se generan en el cilindro de fluido de trabajo, la construcción del cual está al alcance de todos.

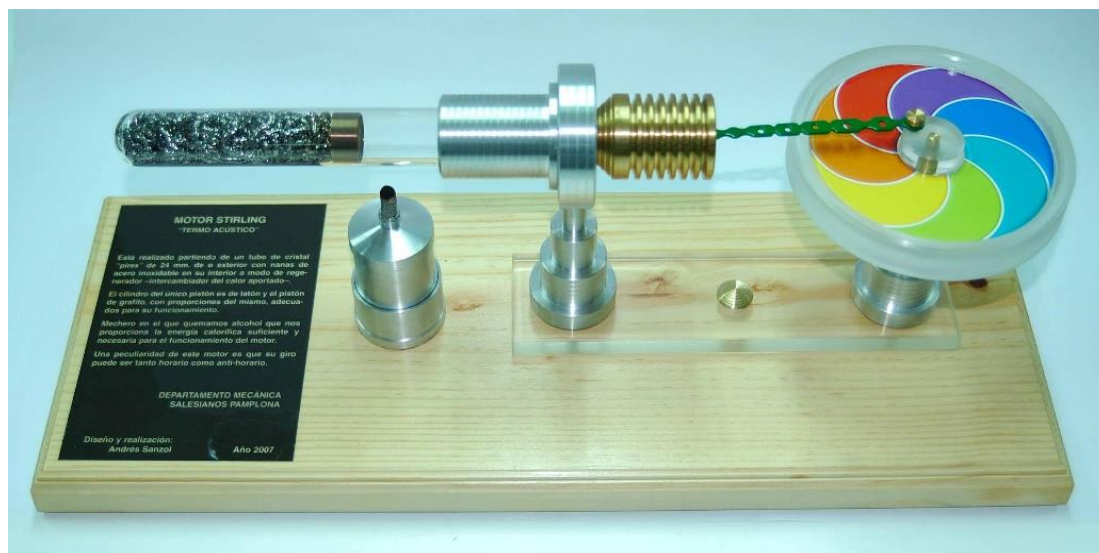


Figura 2.6: Motor Stirling termo-acústico

(Fuente: salesianospamplona.info)

Generación de energía eléctrica.

El movimiento alternativo del Stirling no solo se usa para la propulsión de vehículos si no también para la generación de energía eléctrica. El método más extendido es usando un conector solar como la fuente de calor, véase Figura 2.7.



Figura 2.7: Colector solar con motor Stirling

(Fuente: maqtermiques.wordpress.com)

En el foco del colector está situado el motor Stirling. El foco externo de calor es la energía solar recolectada por el sistema de placas reflectantes. El movimiento del pistón se usa como el movimiento del núcleo de un solenoide. De esta forma se genera la energía eléctrica.

Existen muchos proyectos estudiando la generación de energía utilizando motor Stirling. Uno de ellos es SOLARDIS cuyo fin es la validación de la tecnología de paraboloides con motor Stirling para la generación de Energía Eléctrica. En este proyecto colabora con el Centro Tecnológico Avanzado de Energías Renovables (CTAER). En la Figura 2.8 se representa los desarrollos del mencionado estudio.



Figura 2.8: Colectores solares con motor Stirling del proyecto SOLARDIS

Este uso de motor Stirling es muy importante para la obtención de energía eléctrica en el tipo de poblaciones dispersas donde es difícil el transporte de energía eléctrica desde una central. Sus características más importantes son su alto rendimiento y modularidad.

También cabe destacar el uso de la tecnología llamada micro-cogeneración que permite generar electricidad y energía térmica a la vez [25]. Si bien la cogeneración ha estado siempre ligada al sector industrial, su instalación a menor escala, como es el caso de micro-cogeneración, ha permitido también su uso, en edificios residenciales, bloques de viviendas o grandes viviendas unifamiliares, o bien terciarios o públicos, como polideportivos, piscinas climatizadas, hospitales, hoteles, balnearios, representado en la Figura 2.9. No obstante, todos ellos tienen algo en común y es la existencia de una demanda alta de energía térmica.



Figura 2.9: Instalación de micro-cogeneración en la edificación

(Fuente: certificadosenergeticos.com)

Se trata de equipos de potencia inferior a 50 kW cuyo coste no es elevado, y su instalación es sencilla [25]. Los equipos de micro-cogeneración incluyen un sistema de control y regulación automático. Suelen ser equipos compactos listos para ser conectados y poner en marcha. En la Figura 2.10 se puede observar el equipo que se compone de un sistema de generación de electricidad usando motor Stirling y alrededor de cámara de compresión se encuentra un serpentín que absorbe el calor del fluido de trabajo para posteriormente ser usados en la calefacción de la vivienda familiar.



Figura 2.10: Equipo de micro-cogeneración

(Fuente: ovacen.com)

Otra de las muchas aplicaciones del motor Stirling son los criogeneradores. Desde hace más de 50 años, las industrias y su predecesora Philips Process cooler, han diseñado y creado criogeneradores de alta eficiencia llegando a generar temperaturas muy bajas. Existen máquinas compuestas de uno o cuatro cilindros, que en una etapa enfrían hasta 40 K, o llegando hasta 15 K en dos etapas de compresión [26]. Son equipos que trabajan tanto como equipos independientes como formando parte de un sistema más amplio. Consiguen licuar tales gases como nitrógeno, oxígeno, metano, argón, neón, biogás, etcétera. En la Figura 2.11 se representa un equipo Cryocooler.

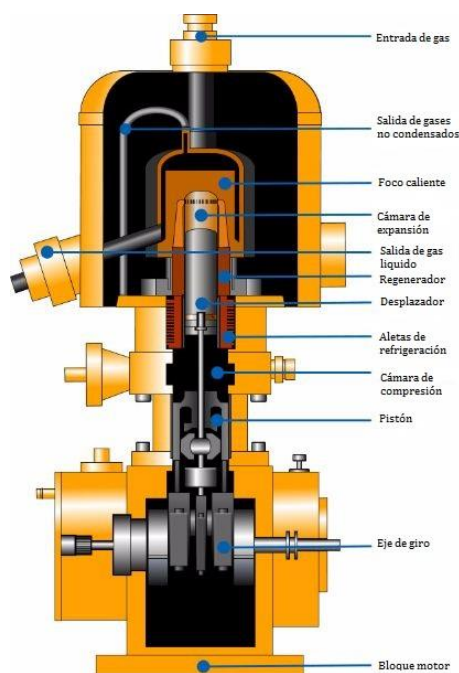


Figura 2.11: Sistema Stirling Cryocooler

(Fuente: stirlingcryogenics.com)

Combustibles

Otro de los campos de investigación del motor Stirling es el uso de los distintos tipos de combustibles. Combustibles regeneradores como leña y carbón. La biomasa. Gaseosos y por supuesto los combustibles líquidos. Cabe destacar el uso de combustible nuclear. Se han diseñado, fabricado y testado motores para uso submarino y también espacial. En la Figura 2.12 se representa un esquema de motor Stirling usando como foco de calor la energía del combustible nuclear.



Figura 2.12: Motor Stirling combustible nuclear

(Fuente: researchgate.net)

Como podemos observar el desarrollo del motor Stirling es un tema muy actual. Las últimas investigaciones se centran en mejora de eficiencia térmica, disminución de pérdidas de calor y el aumento del rendimiento del motor [27] [28].

2.3. Análisis numérico

El análisis numérico es una rama de las matemáticas encargada de diseñar algoritmos, para simular sistemas físicos. Gracias al desarrollo tecnológico de los ordenadores, ha sido posible el análisis de cálculos matemáticos extremadamente complejos. El método numérico más extendido en los programas comerciales dedicados a la aplicación de herramientas numéricas de cálculo es el método de los elementos finitos. Este método permite la resolución de ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. El método de elementos finitos se usa en diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos.

El método de elementos finitos permite obtener una solución sobre un cuerpo o dominio sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales que caracterizan el problema. Este método se aplica sobre una discretización del dominio dentro del cual se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. Un ejemplo de la discretización de un medio continuo se representa en la Figura 2.13.

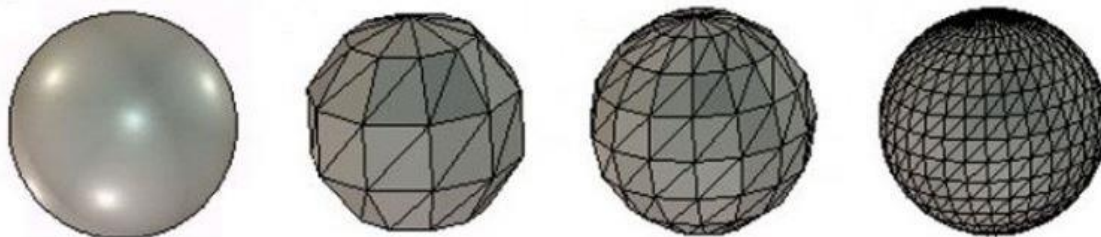


Figura 2.13: Distintos niveles de discretización de un medio continuo

El conjunto de nodos considerando sus relaciones adyacentes se llama malla. La generación de la malla se realiza con programas especiales o de forma manual, en una etapa previa

El método de elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos. Además, el método de elementos finitos es un método para resolver ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, con independencia del campo de la física en el que se den. Es de aplicación, por tanto, a cualquier fenómeno físico gobernado por ese tipo de ecuaciones. Fue creado en el año 1943 por Richard Courant y a partir de la década de los 80 con la generalización de los ordenadores personales, se extendió el uso de programas que lo usaban.

Algunos de los programas basados en el método de elementos finitos son:

SC/Tetra

Este programa es ampliamente usado como pre y post procesamiento de programas para análisis de elementos finitos, proporcionando modelos de regeneradores y mallado.

Comsol Multiphysics

Es un paquete de modelización para la simulación de cualquier proceso físico que se pueda describir mediante ecuaciones en derivadas parciales. Está provisto de algoritmos que pueden resolver problemas complejos de forma rápida y precisa, mientras que su estructura está diseñada para proporcionar facilidad de uso y flexibilidad.

MSC Marc

Es un programa de análisis de elementos finitos no lineal usado para analizar el comportamiento de materiales complejos bajo la acción de grandes fuerzas y deformaciones. También puede analizar problemas de carácter estructural, térmico, piezoeléctrico, electrostático, magnético y electromagnético.

Abaqus

Es un conjunto de programas informáticos de simulación que aplica el método de elementos finitos para realizar cálculos estructurales estáticos, lineales y no lineales, dinámicos incluyendo simulación de impactos, problemas de contacto de regeneradores, térmicos, acoplamiento acústico-estructurales, mecánica de fluidos, piezoeléctricos y otros.

LS-Dyna

Es un paquete de programas de simulación multifísica de propósito general avanzado. Tiene sus orígenes en un análisis altamente no lineal de método de los elementos finitos mediante la integración de tiempo explícito. Este programa está siendo utilizado por las industrias del automóvil, aeroespacial, la construcción, la militar, la manufactura y la ingeniería biológica.

Ansys

Es un sistema de programas para diseño, análisis y simulación mediante elementos finitos. Incluye las fases de preparación de Meshing o mallado, ejecución y post proceso. Este programa ejecuta análisis de piezas sometidas a fenómenos físicos usadas en ingeniería y diseño mecánico, puede resolver problemas físicos y sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibración y aplicaciones específicas.

También llamado Ansys Workbench, es una plataforma de software desde donde se crean proyectos de análisis en distintas disciplinas. Sus módulos principales son ANSYS CAD connections, DesignModeler, Meshing, DesingXplorer y FE Modeler. Con las aplicaciones ANSYS CFX, Fluent, Icepak, Polyflow se pueden realizar análisis de fluidos dinámicos. Una representación de cálculo realizado con ANSYS CFX se puede observar en la Figura 2.14

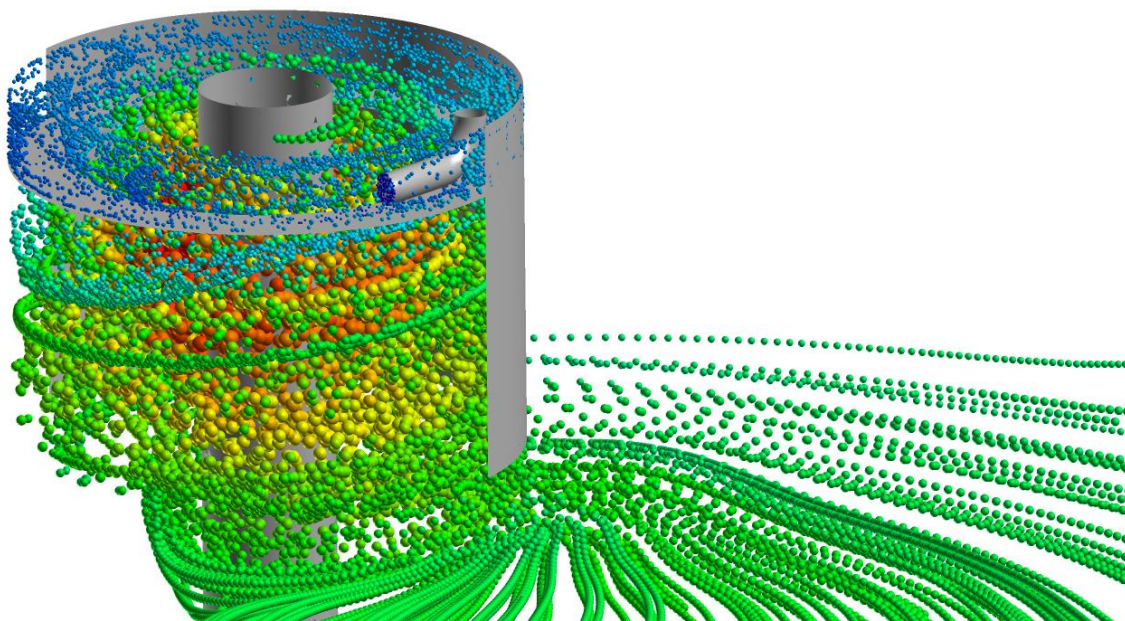


Figura 2.14: Análisis de fluidos dinámicos con software ANSYS CFX

(Fuente: cpdlr.com)

Fluent que está incluido en el espacio Workbench es un programa CFD (Computational Fluid Dynamics) de análisis de fluidos para una gama de aplicaciones en el modelado y simulación de flujos que incluye turbulencia, reacciones o efectos térmicos.

Ansys Multiphysics es una herramienta que evalúa problemas en varias disciplinas como análisis estructura, térmico, fluidos, acústicos y de electromagnetismo.

Con los programas ANSYS Mechanical, Structural, Professional se resuelven problemas particulares en diseño mecánico como elementos estructurales lineales, no lineales y análisis dinámico.

También incluye las posibilidades de cálculos de dinámica explícita con ANSYS Explicit STR, AUTODYN, problemas de ingeniería electromagnética con ANSYS Emag, turbo sistemas con los módulos ANSYS BladeModeler, TurboGrid.

Las últimas investigaciones sobre el funcionamiento y mejoras del motor Stirling se centran más en desarrollo de simulaciones y modelos numéricos más que en las características físicas del mismo regenerador [27]. Las configuraciones de regenerador Stirling han sido estudiadas por [29], usando el software MatLab. Otros estudios han realizado análisis sobre eficiencia térmica, calor perdido, caída de presión usando software como CFD del y CFX. Los últimos trabajos en el campo de investigación de porosidades en las mallas en motores

Stirling se han realizado con CFD (Fluent) incluido en la plataforma Workbench en Ansys [1].

2.4. Conclusiones sobre el estado del arte

En los últimos años, debido al impacto de energías fósiles en el cambio climático, ha surgido el auge de búsqueda y desarrollo de energías renovables. Por otro lado, muchos de los estudios se han centrado en el desarrollo y mejora de las tecnologías ya existentes. Una de estas tecnologías es el motor Stirling. Es el único capaz de aproximarse (teóricamente lo alcanza) al rendimiento máximo teórico conocido como el rendimiento de Carnot, por lo que, en lo que a rendimiento de motores térmicos se refiere, es la mejor opción.

Tiene un amplio uso en diversos campos de aplicación, tales como la cogeneración, generación de energía eléctrica, transporte de vehículos, etcétera. Debido a las nuevas técnicas de fabricación, hoy en día es posible el desarrollo de componentes de altas prestaciones del motor Stirling tales como el regenerador. Las investigaciones del mismo y sus futuras mejoras permitirán incrementar el rendimiento del motor Stirling.

Debido al amplio uso y las investigaciones sobre el motor Stirling este proyecto se ha centrado en el estudio de un regenerador de porosidad variable y su impacto en el rendimiento del motor.

Para ello se hará uso del programa ANSYS, que dispone de los componentes necesarios para presente estudio, las características del cual han sido explicadas en el apartado 2.3.

Capítulo 3

Regenerador

3.1. Introducción

En este capítulo se describe el regenerador de motor Stirling. Tipos, características y clasificación. También se define en qué consiste una porosidad determinada y un regenerador de porosidad variable.

3.2. Características generales

Un motor de tipo Stirling opera con un ciclo termodinámico cerrado, con una compresión seguida de una expansión cíclica. Una de las partes que lo componen es el regenerador. Está situado entre el foco caliente y el foco frío, en el camino del paso de fluido de trabajo. En la Figura 3.1 se representa la posición del regenerador dentro de un motor Stirling.

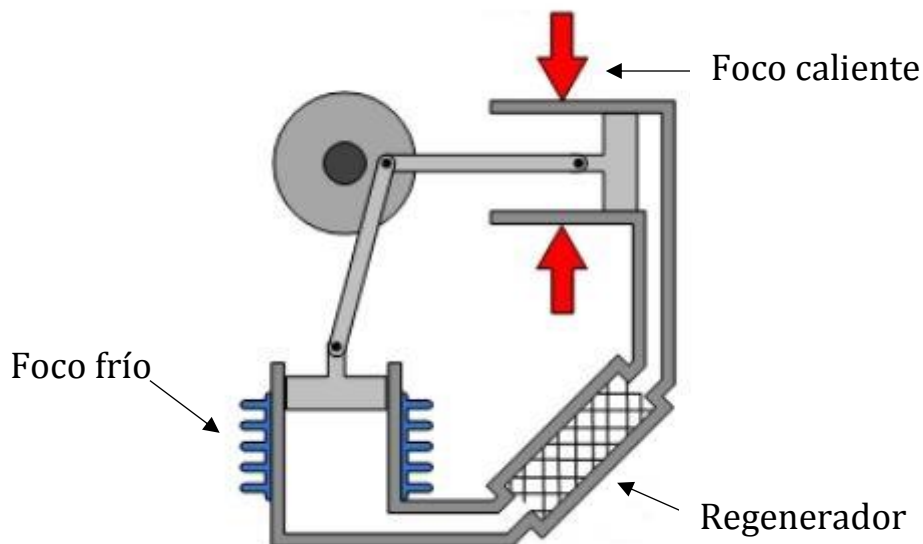


Figura 3.1: Posición del regenerador en un motor Stirling

(Fuente: magicalmachines.weebly.com)

Un motor Stirling funciona con un ciclo termodinámico cerrado con una compresión y expansión de fluido de trabajo a diferentes temperaturas, convirtiendo la energía térmica en mecánica y viceversa. En la Figura 3.2 se representa un ciclo ideal del motor Stirling, junto con un esquema del motor simplificado. En este esquema el funcionamiento del motor se puede considerar como un cilindro con dos pistones opuestos, entre los cuales se coloca el regenerador.

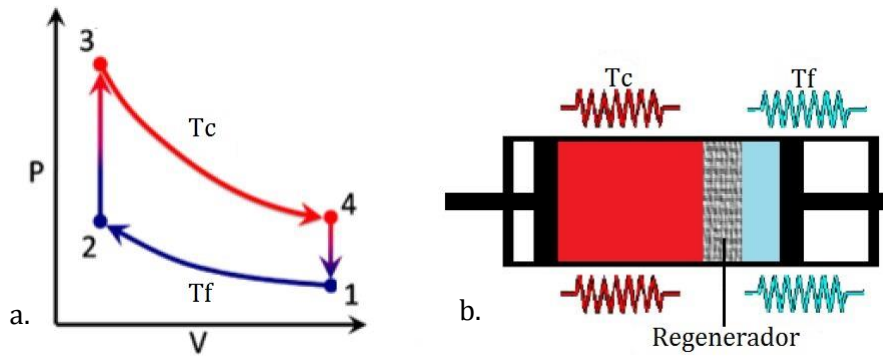


Figura 3.2: Ciclo motor Stirling (a) esquema del regenerador (b)

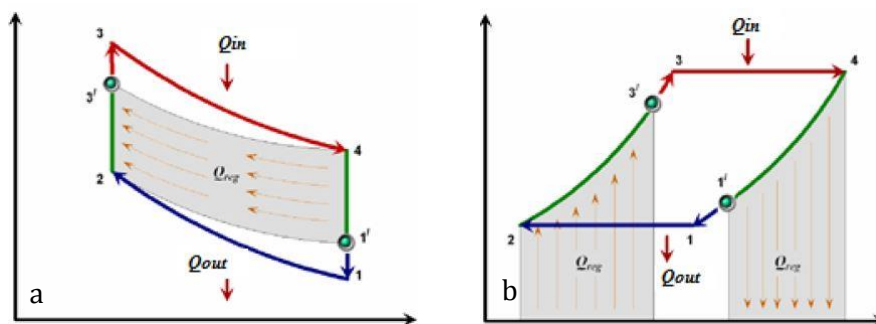
(Fuente: [1])

Las cuatro etapas de ciclo del motor Stirling son:

- 1-2 Compresión isoterma del fluido de trabajo a temperatura constante T_f .
- 2-3 Calentamiento isócoro en el cual se transfiere el calor al fluido de trabajo desde el foco caliente.
- 3-4 Expansión isoterma del fluido de trabajo a temperatura constante T_c .
- 4-1 Enfriamiento isócoro en el cual el calor desde el fluido de trabajo se transfiere al foco frío.

En un ciclo ideal del motor Stirling, todo el calor transferido en la etapa 4-1 se almacena en el regenerador, y en la etapa 2-3 todo el calor almacenado por el regenerador se transfiere al fluido de trabajo. En el caso ideal la capacidad de absorción de calor del regenerador es infinita.

Pero en el caso de un regenerador real el esquema varía. En la Grafica 3.1 se representa las etapas de un ciclo de un motor Stirling real.



Grafica 3.1: Ciclo Stirling presión vs volumen (a) temperatura vs entropía (b)

Se puede observar que durante el calentamiento isócoro la temperatura del gas alcanza el punto $T_{3'}$ en vez del punto óptimo T_3 . Y en el enfriamiento isócoro alcanza el punto $T_{1'}$ en vez del punto óptimo T_1 . Esto se debe a las limitaciones que existen en un regenerador real. Se puede deducir que el rendimiento de un motor Stirling está ligado al rendimiento del regenerador. Según [30] los factores que influyen en el rendimiento de un motor Stirling son:

- La presión media del fluido de trabajo.
- La temperatura de los focos frío y caliente.
- Las características geométricas del motor, tales como: la holgura y desplazamiento del pistón, mecanismos, etcétera.
- Propiedades físicas del fluido de trabajo.
- Frecuencia de operación.
- Características geométricas del regenerador como volumen vacío, área de transferencia térmica, porosidad.

Según [31], el regenerador, probablemente es el componente vital de un motor Stirling. En el caso ideal de su funcionamiento, la temperatura de salida desde el regenerador en la fase 4-1, del fluido de trabajo, sería igual a la temperatura del foco frío. Mientras que en la fase 2-3 del ciclo, la temperatura de salida de fluido desde el regenerador sería igual que la temperatura del foco caliente. En el caso de funcionamiento ideal, tampoco existiría una caída de presión a través del regenerador, ya que no habría rozamiento entre el regenerador y el fluido de trabajo.

En el caso real de funcionamiento del motor, en el regenerador existen pérdidas por disipación térmica y el rozamiento. También existe una variación de las temperaturas que dependen de la onda de presión y la posición en el regenerador.

Así, cabe destacar a trayectoria de partículas fluidas dentro del motor Stirling, representada en la Figura 3.3 determinada por [32].

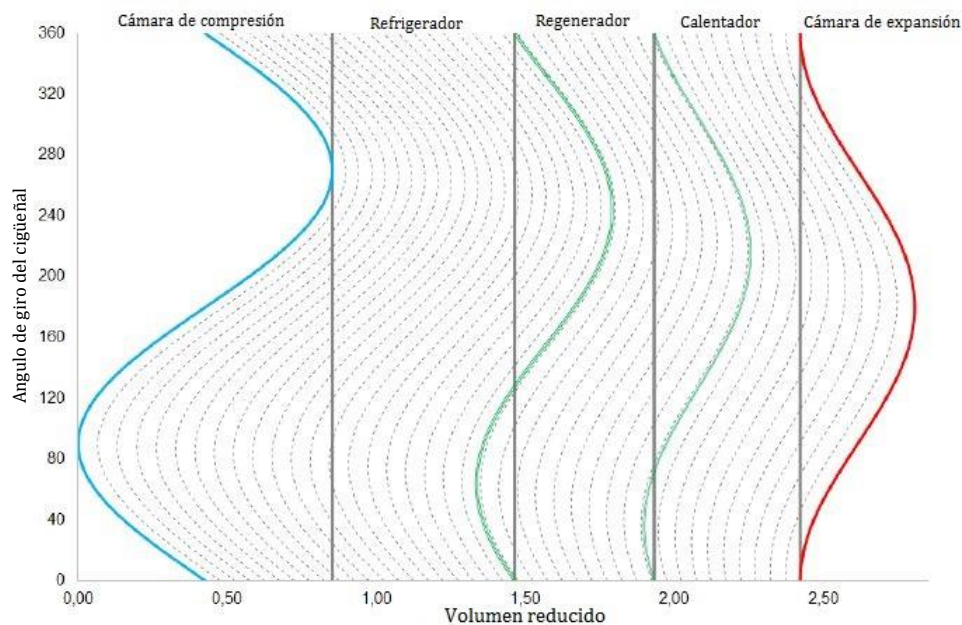


Figura 3.3: Trayectoria de las partículas dentro de un motor Stirling

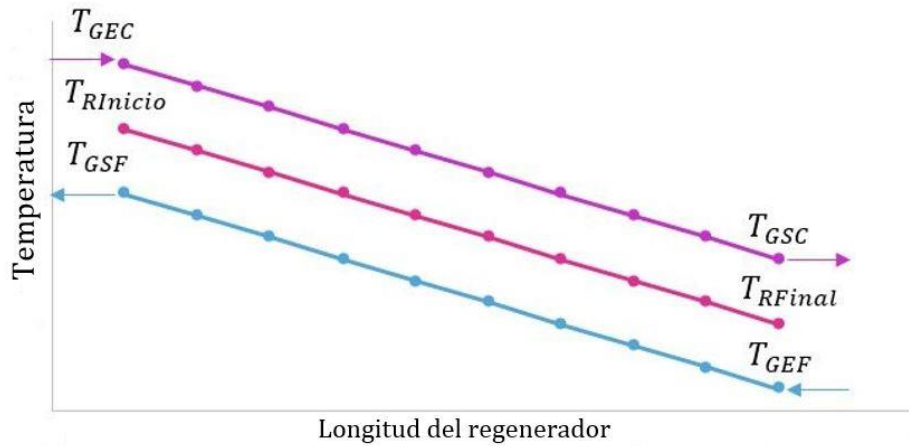
(Fuente: [1])

En esta figura se representan cinco volúmenes principales del motor Stirling. La curva azul representa la trayectoria de las partículas en la cámara de compresión, así representando las trayectorias en todas las partes del motor Stirling, hasta la curva roja que representa la trayectoria de las partículas en la cámara de expansión.

Es importante destacar la presencia de las partículas que nunca abandonan ni atraviesan el volumen ocupado por el regenerador.

Las pérdidas en un regenerador se pueden clasificar en pérdidas de potencia y pérdidas por transferencia térmica. Las mayores pérdidas se deben a una ineficiente transferencia térmica entre fluido de trabajo y el regenerador.

En la Grafica 3.2 se representa un esquema de temperaturas de rendimiento térmico del regenerador.



Grafica 3.2: Temperaturas de un regenerador de motor Stirling

De la Grafica 3.1 se puede determinar la eficiencia, en términos térmicos, del regenerador durante el calentamiento del fluido de trabajo de la ecuación (3.1), y durante el enfriamiento del mismo, en la ecuación (3.2). Donde T_{GEC} es la temperatura de los gases calientes de entrada, procedentes de la cámara de expansión, T_{GSC} es la temperatura de los gases de salida del regenerador, y procedentes de la cámara de expansión. T_{GEF} es la temperatura de entrada de los gases fríos procedente de la cámara de compresión, T_{GSF} es la temperatura de los gases de salida del regenerador y procedentes previamente de la cámara de compresión. La temperatura $T_{RInicio}$ es la temperatura del regenerador en el punto inicial y la T_{RFinal} es la temperatura del regenerador el punto final.

$$e_{calentamiento} = \frac{T_{GEC} - T_{GSC}}{T_{GEC} - T_{RFinal}} \quad (3.1)$$

$$e_{enfriamiento} = \frac{T_{GSF} - T_{GEF}}{T_{RInicio} - T_{GEF}} \quad (3.2)$$

La optimización del regenerador del motor Stirling pasa por maximizar la transferencia térmica y minimizar las pérdidas de carga que se pueden producir en él. La Figura 3.4 representa la sección de un cilindro Whispergen y la malla que se encuentra en su interior.

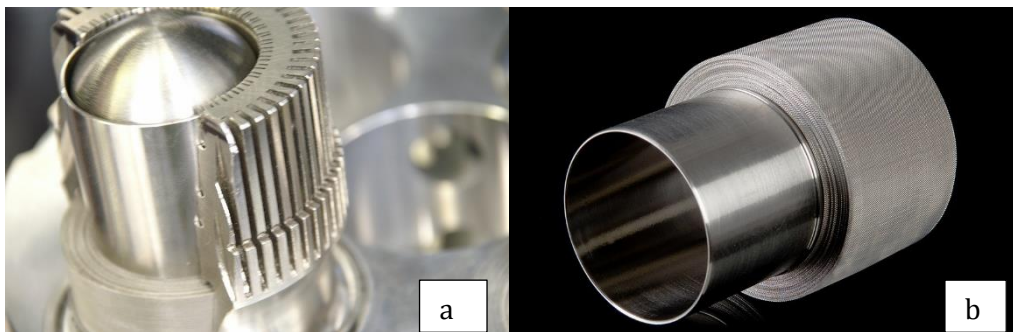


Figura 3.4: Cilindro Whispergen (a) y regenerador de un motor Stirling (b)

(Fuente: publik.fotki.com)

Se investigan materiales constructivos tales como el acero, cobre, cerámicos e incluso plásticos [14]. En la Figura 3.5 se muestran algunas de las imágenes de las distintas construcciones de las mallas.

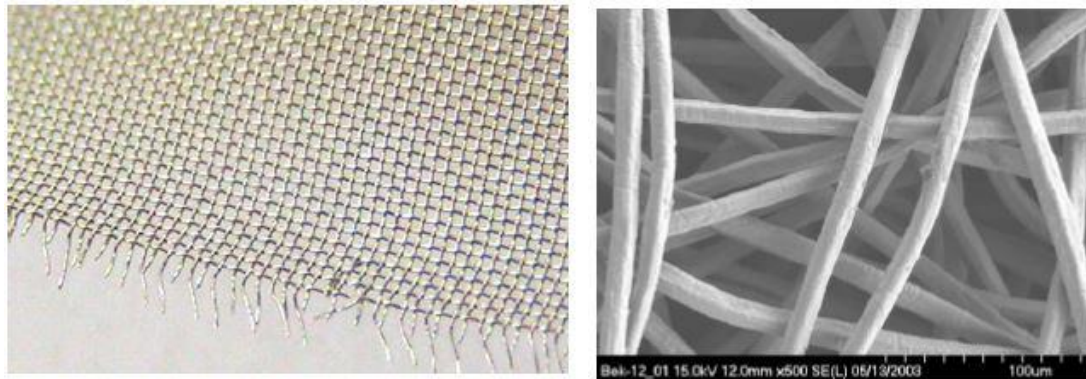


Figura 3.5: Malla regenerador Stirling

(Fuente: [1])

Una construcción ordenada y una geometría del regenerador bien definida es un factor determinante en la optimización del rendimiento del motor. Los regeneradores suelen estar formados por mallas tejidas, fibras metálicas dispuestas de formas aleatorias u ordenadas, esponjas metálicas, hojas finas y hojas perforadas. En la Figura 3.6 se muestran algunas configuraciones del regenerador de motor Stirling.

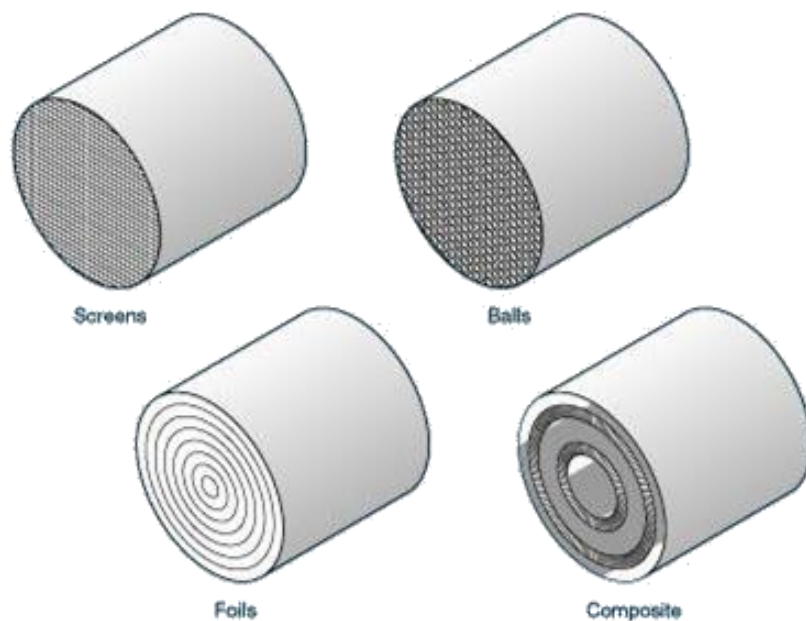


Figura 3.6: Configuraciones de regenerador de motor Stirling

(Fuente: techbriefs.com)

En la Figura 3.7 se puede observar las imágenes de las configuraciones de fibras en el interior de un regenerador. Si el regenerador se construye en capas sucesivas, su consecutiva colocación puede ser un factor determinante en su rendimiento y puede aportar una variable a su estudio, a pesar de añadir dificultad a su construcción. Mientras que un regenerador compuesto de fibras colocadas de forma aleatoria, es fácil de construir en comparación con una colocación de capas ordenadas, a pesar de no aportar variables a su análisis.

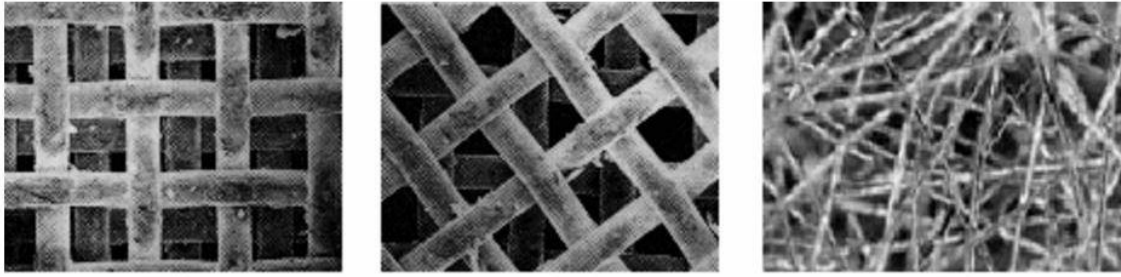


Figura 3.7: Imagen del regenerador

Se estudian y desarrollan nuevos procesos de fabricación [14] con el objetivo de crear regeneradores de menor tamaño y novedosas características geométricas. En la Figura 3.8 se representa una malla metálica y hojas finas con perforaciones milimétricas.

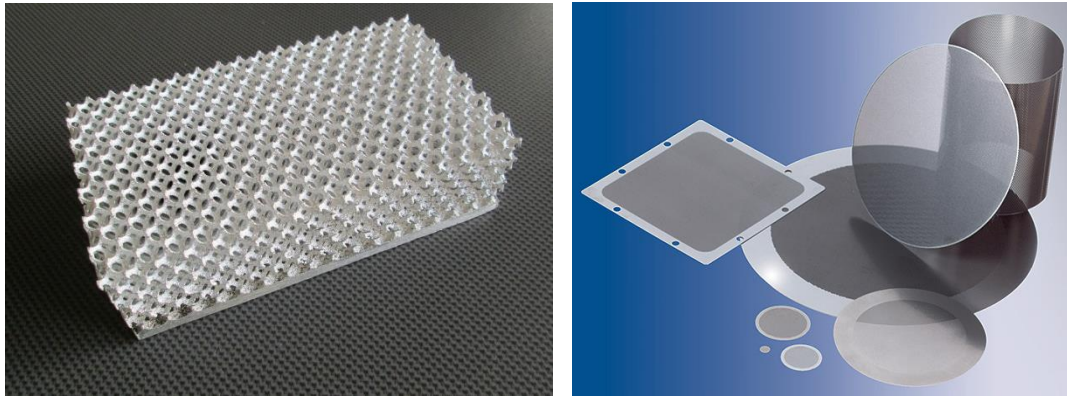


Figura 3.8: Malla regenerador Stirling

(Fuente: mfgtalkradio.com)

Aunque algunas líneas de investigación han desarrollado nuevas y variables configuraciones [14], el resultado de las mismas es o poco rendimiento o un elevado coste según la tecnología existente ahora mismo.

3.3. Clasificación

Una de las configuraciones más usadas es la malla tejida en dos direcciones de forma cuadriculada, hecha de filamentos metálicos. En la Figura 3.9 se representa una malla de filamentos metálicos tejida en dos direcciones.

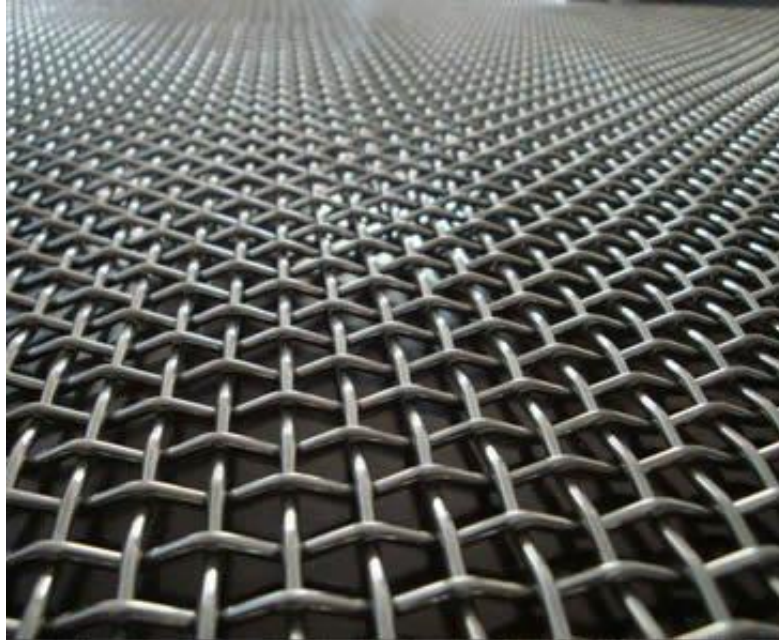


Figura 3.9: Malla tejida de filamento metálico

(Fuente: wovenwirecloth.org)

Se colocan distintas mallas una detrás de otra creando de esta forma un volumen tejido representado en la Figura 3.10

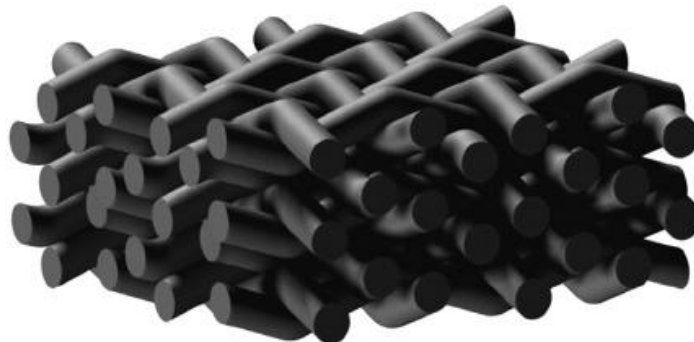


Figura 3.10: Capas de mallas tejidas y apiladas

Aunque comercialmente existan muchos tipos de malla disponibles la mayoría de estudios [1] [2] [33] sobre el motor Stirling se centran en la malla tejida en forma rectangular, cuyos filamentos tiene el mismo diámetro. Al ser este tipo de malla el más usado, el estudio sobre la porosidad variable se realizará con este tipo de mallas.

Las mallas tejidas de forma rectangular se clasifican en función de dirección de entrada de flujo y colocación de mallas consecutivas.

3.3.1. Dirección de entrada de flujo

Existen dos tipos de malla en función de dirección de entrada de flujo: perpendicular y paralela a la malla tejida.

Staked Wire Screen es la denominación de la malla caracterizada por la dirección de entrada de flujo perpendicular al tejido. En este tipo de configuración, la porosidad volumétrica depende de la presión aplicada durante el proceso de fabricación.

Wound Wire Screen es la denominación de la malla cuya característica de flujo es paralela al tejido. La Figura 3.11 representa la dirección de entrada de flujo y la denominación de tipos de malla. En este tipo de configuración la porosidad se controla durante la fabricación de los filamentos.

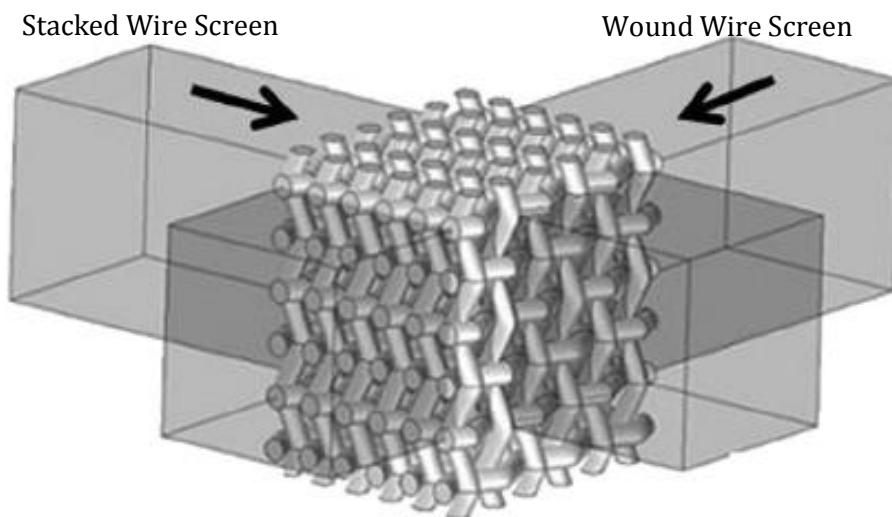


Figura 3.11: Staked Wire Screen y Wound Wire Screen

3.3.2. Disposición de las capas consecutivas

La colocación ordenada y precisa de las capas consecutivas en un regenerador es un factor de gran influencia en el rendimiento del motor. En la Figura 3.12 se representa una imagen microscópica de un regenerador con una disposición aleatoria de las capas consecutivas.

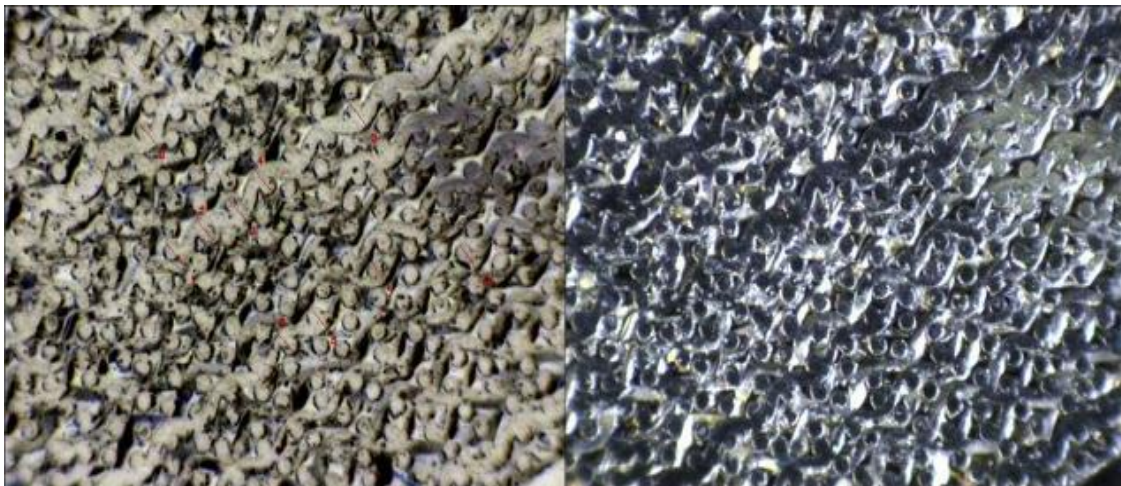


Figura 3.12: Regenerador motor Stirling

(Fuente: sciencedirect.com)

A pesar de las dificultades de construcción de una malla de unas características geométricas determinadas y un orden preciso, se definen cuatro tipos en función de posición de las capas consecutivas tales como:

- Paralela desalineada aleatoriamente
- Alineada
- Desalineada transversal
- Desalineada y sin contacto

Las características de la cuales también se pueden observar en la Figura 3.13.

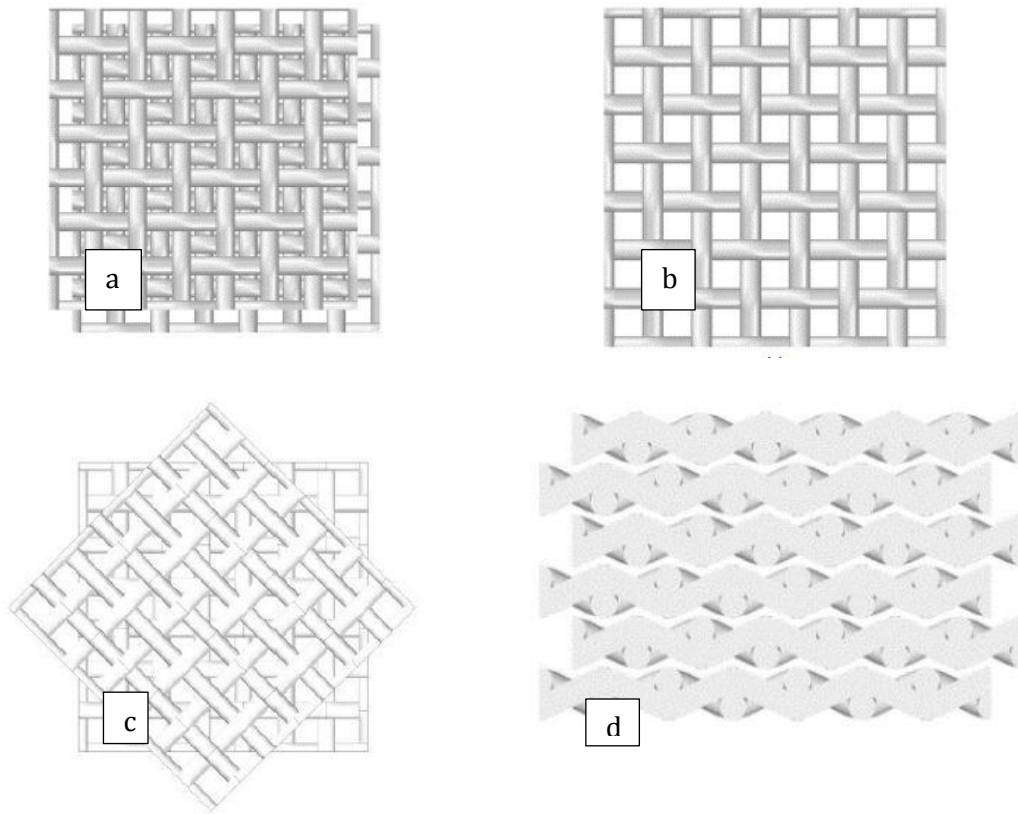


Figura 3.13: Configuración colocación capas: paralela alineada aleatoriamente (a), alineada (b), alineada transversal (c), desalineada y sin contacto (d)

(Fuente: [1])

Cabe destacar que una configuración desalineada y sin contacto favorece la transferencia térmica de la malla con el fluido de trabajo, ya que maximiza el área de transferencia térmica. Pero tal característica sería perjudicial para otro de los factores determinantes en el rendimiento del motor Stirling, y esa es la caída de presión. A pesar de aumento de la transferencia térmica, una configuración desalineada impediría el paso del fluido de trabajo, generando con ello una caída de presión. Se debe buscar un término medio para garantizar un rendimiento óptimo del motor.

3.4. Factores geométricos

Los dos únicos factores responsables de la porosidad y posteriormente todos los resultados derivados de ella, son: el diámetro del filamento d_w , del que se construye la malla, y la separación entre dos filamentos consecutivos l , que se representan en la Figura 3.14.

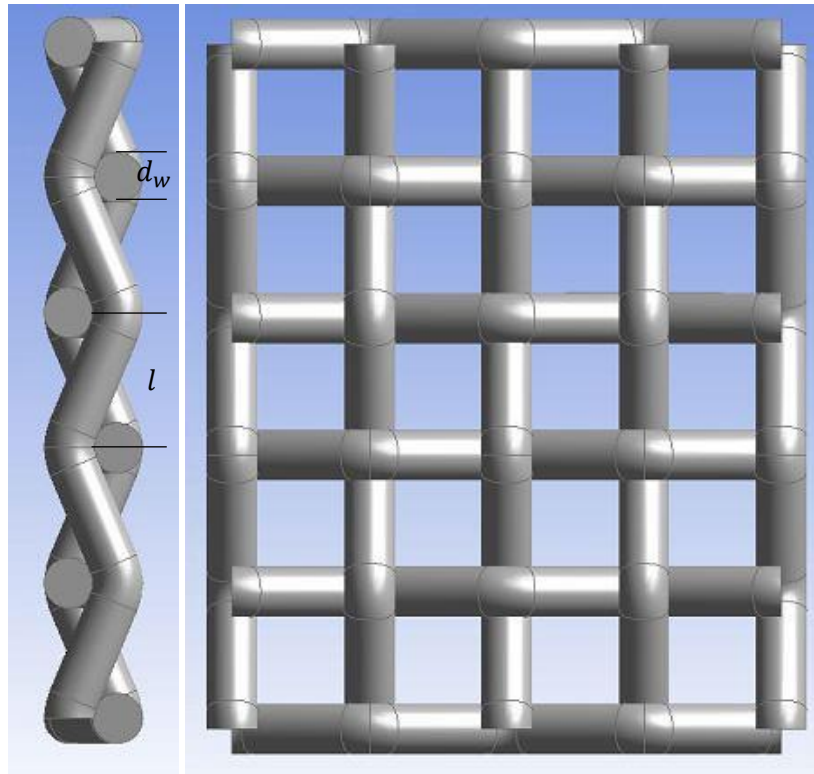


Figura 3.14: Diámetro de filamento d_w y la separación entre los filamentos l

En función de los parámetros l y d_w , se definen los siguientes factores geométricos:

$$\text{Porosidad: } \Pi_v = 1 - \frac{\pi \cdot d_w}{4 \cdot (d_w + l)} \quad (3.3)$$

$$\text{Diámetro hidráulico: } d_h = \frac{d_w \cdot \Pi_v}{(1 - \Pi_v)} \quad (3.4)$$

Volumen total del regenerador: V_r

Volumen intersticial: V_{dr}

$$\text{Porosidad volumétrica del regenerador: } \Pi_v = \frac{V_{dr}}{V_r} \quad (3.5)$$

$$\text{Área específica de transferencia de calor: } \varphi = \frac{4 \cdot (1 - \Pi_v)}{d_w} \quad (3.6)$$

$$\text{Velocidad máxima de flujo a través del regenerador: } u_{max} = \frac{u}{\Pi_v} \quad (3.7)$$

$$\text{Número de Reynolds: } Re = \frac{\rho_g u_{max} d_h}{\mu} \quad (3.8)$$

Donde ρ_g es la densidad de fluido de trabajo, la u_{max} es la velocidad máxima definida según la ecuación (3.7), d_h es el diámetro hidráulico definido según (3.4), y μ es la viscosidad del fluido.

3.5. Nomenclatura

Un ejemplo de la nomenclatura es el siguiente:

$$S80 - 63\% / -NC$$

Donde la primera letra corresponde a la dirección de entrada del flujo, S o W. Posteriormente el número de porcentaje describe la porosidad de la malla y a continuación las letras corresponden con las distintas configuraciones de las capas consecutivas:

NC – non contact

A – aligned

X – cross misaligned

En la tabla se presentan ejemplos de distintas configuraciones y la descripción de su configuración:

Tabla 3.1: Parámetros geométricos de Regenerador Stirling

Nomenclatura	Π_v	φ (1/mm)	d_h (μm)
S80 – 49%	0.49	25.5	77
S80 – 57%	0.567	21.7	105
S80 – 61%/–A	0.616	19.2	128
S80 – 64% – A/ W80 – 64%	0.638	18.1	141
S80 – 66%/ –X/ W80 – 66%	0.666	16.7	160
S80 – 68%/ –X/ W80 – 68%	0.685	15.8	174
S110 – 39%	0.387	22.3	69
S110 – 45%	0.452	19.9	91
W110 – 47%	0.472	19.2	9.8
W110 – 53%	0.533	17.0	126
W10 – 59%	0.588	15.0	157
S110 – 60%/ –X/ W110 – 60%	0.603	14.4	167
S110 – 63%/ –X/ –A/ –NC/ W110 – 63%	0.632	13.4	189
S110 – 71% – NC	0.718	10.3	280

Para realizar presente estudio y en un futuro validarlo, se seleccionan las mallas y sus características de la Tabla 3.1.

3.6. Porosidad variable

Según [1], [33]y [2], la configuración más eficiente del regenerador es la de Woven Wire Matrix. A partir de este punto, el estudio presente se centra en la porosidad del regenerador. Reciente estudio [34], han probado distintas porosidades en las mismas condiciones de contorno, y su conclusión ha sido que la porosidad del regenerador es un factor determinante en el rendimiento del motor Stirling. Otro de los estudios ha sido el [1], centrado en análisis de la caída de presión y transferencia de calor para distintas porosidades del regenerador en un motor Stirling.

Para analizar un regenerador de porosidad variable se propone diseñar un regenerador de un tamaño estándar. Según el apartado 3.4, la porosidad de un regenerador compuesto de filamentos tejidos, depende del diámetro de filamento d_w , y la separación entre los mismos l . Primero se construye una malla de porosidad uniforme basada en los parámetros d_w , l , y de una longitud determinada. La malla construida se guarda en un archivo. Posteriormente, utilizando el diseño anterior, existen dos posibilidades para cambiar la porosidad de dicha malla. Uno de ellos es variando el diámetro d_w de los filamentos, y la otra es variando la

separación entre ellos. Para aumentar la porosidad se debe disminuir el diámetro de los filamentos o aumentar su separación. Para disminuir la porosidad se aumenta el diámetro de los filamentos o se disminuye la separación entre ellos. Cabe destacar que es posible la combinación de ambas acciones. De esta forma se obtiene una malla de la misma longitud que la malla anterior, pero de una porosidad distinta.

Colocando la primera malla seguida de la segunda, se crea una malla de una longitud deseada, y con dos porosidades diferentes. De esta forma se crea una malla de porosidad variable.

Las posibilidades de combinación de factores previamente mencionados, son muy grandes, y dependen de las características que se desean estudiar.

Capítulo 4

Análisis numérico

4.1. Introducción

Para la realización del proyecto se ha seleccionado el programa llamado Ansys. Dicho software es una composición de numerosas aplicaciones dedicadas a los estudios y cálculos numéricos para todas las ramas de ingeniería. Permite la asociación de distintas tecnologías para el desarrollo de un producto sin abandonar una única plataforma. En la Figura 4.1 se puede observar un ejemplo de utilización del espacio de trabajo de Ansys donde una misma geometría se puede utilizar tanto para un análisis de mecánica de fluidos como para un análisis térmico y eléctrico.

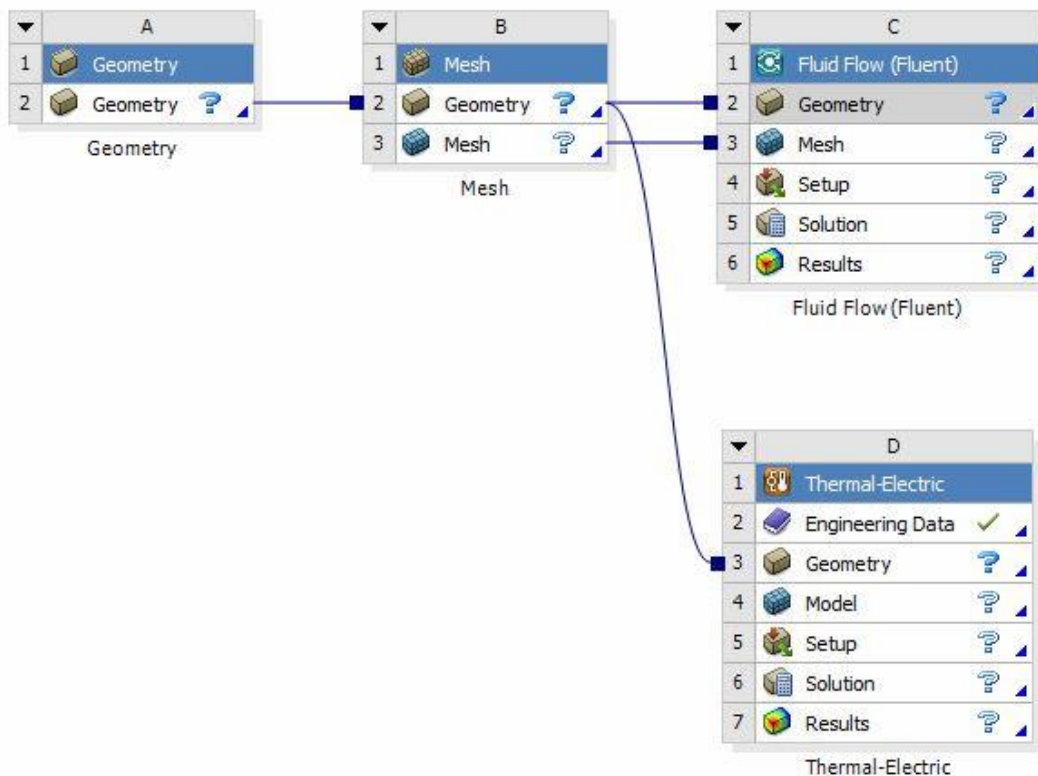


Figura 4.1: Proyecto en el espacio de trabajo de Ansys

La realización de presente estudio se compone de cuatro apartados:

Diseño geométrico de la malla

Para la creación de la malla del regenerador se usa el software incluido en Ansys llamado Design Modeler. Dicho software crea a partir de bocetos una representación geométrica de cuerpos en dos y tres dimensiones. La Figura 4.2 representa un proyecto de geometría.

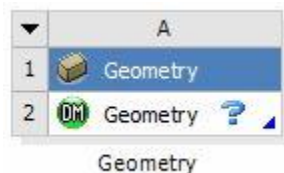


Figura 4.2: Proyecto en Design Modeler

Mallado de cuerpo regenerador

Para un análisis numérico de la malla del regenerador a estudiar, es necesaria una previa discretización de del cuerpo solido creado en Design Modeler. Dicho proceso consiste en división de un cuerpo en otros más pequeños, intersectados por medio de puntos comunes o nodos, los cuales forman superficies y se comportan como volúmenes de control independientes. La creación de la malla, se realizará con la aplicación llamada Meshing. En la Figura 4.3 se representa la creación del proyecto para el mallado en el espacio de trabajo de Ansys.

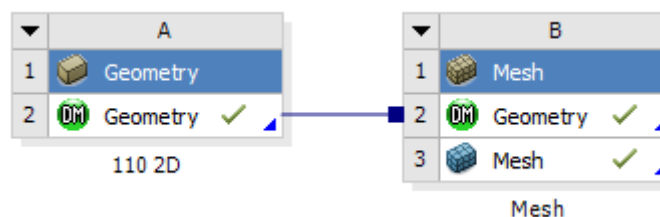


Figura 4.3: Creación de proyecto para el mallado

Análisis numérico

La previa realización del mallado del regenerador, permite durante la aplicación del método de elementos finitos, en lugar de intentar resolver el problema como un todo en una sola operación, resolver el método en cada uno de los cuerpos en los que se ha dividido el regenerador previamente. El análisis se realizará con la aplicación llamada Fluent. Dicho programa dispone de la herramienta para la simulación del medio poroso. Consiste en una homogeneización del medio simplificando con ello los cálculos y el tiempo de los mismos. Dicha herramienta es aplicable a un análisis en tres y dos dimensiones, siendo equivalente el análisis entre ambos. La creación de un proyecto para el análisis numérico del problema se representa en la Figura 4.4.

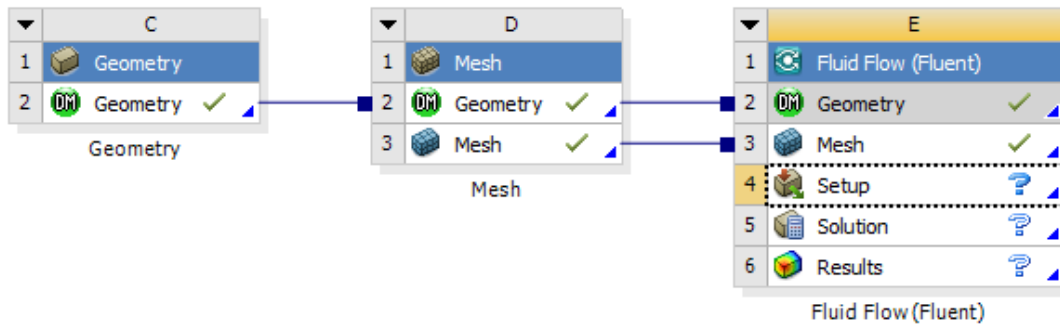


Figura 4.4: Creación de proyecto para análisis numérico

Análisis de los resultados

El estudio de los resultados se realizará mediante la aplicación del Results. El mismo permite la visualización temporal y espacial de todas las variables calculadas en todos los elementos en los que se ha subdividido el regenerador a estudiar. En la Figura 4.5 se representa la herramienta de Results creada en el espacio de trabajo de Ansys.

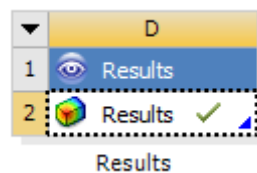


Figura 4.5: Proyecto del Results

4.2. Diseño geométrico

Como se ha mencionado en el apartado 4.1 para la creación de la geometría se utiliza la aplicación Design Modeler.

Para realizar este estudio se creará un regenerador en 3D, de porosidad uniforme y otro regenerador de porosidad variable para poder realizar una comparación. Ambos sólidos son del mismo tamaño. La longitud a estudiar será de 1.7 (mm). Mientras que el regenerador de porosidad uniforme no tiene cambios en su geometría, el regenerador de porosidad variable se compone de dos geometrías diferentes. Dicho cambio se realiza en la parte central del regenerador, creando de esta forma una primera mitad de primera porosidad a estudiar y otra mitad caracterizada por la segunda porosidad a estudiar. En la Figura 4.6 se puede observar un esquema representativo de ambos regeneradores, en visión lateral.



Figura 4.6: Representación de regenerador porosidad uniforme y porosidad variable

Para realizar una primera aproximación con dos porosidades distintas se seleccionan mallas ampliamente estudiadas en trabajos previos [33] [1] y de porosidades consecutivas. Las mallas seleccionadas para este estudio son las siguientes:

$$S110 - 63\% - NC$$

$$S80 - 68\% - NC$$

Las características de los factores geométricos de estas porosidades son las siguientes:

Nomenclatura	$d_w (\mu m)$	$l (\mu m)$	$d_h (\mu m)$	Π_v
S110 – 63% – NC	110	114	183.30417	0.63
S80 – 68% – NC	80	114	180.5926927	0.68

4.2.1. Regenerador de porosidad uniforme

Los regeneradores se crean a partir de croquis basados en dos características principales del regenerador, el diámetro de filamentos d_w y la separación entre los filamentos consecutivos l . Dichos valores son característicos para cada tipo de malla. Utilizando la herramienta *Parameters* se crean croquis paramétricos. De esta forma para crear otro tipo de malla solo será necesario el cambio de dichos valores apropiados para el nuevo regenerador. En la figura se representa la creación de los mismos con la herramienta indicada.

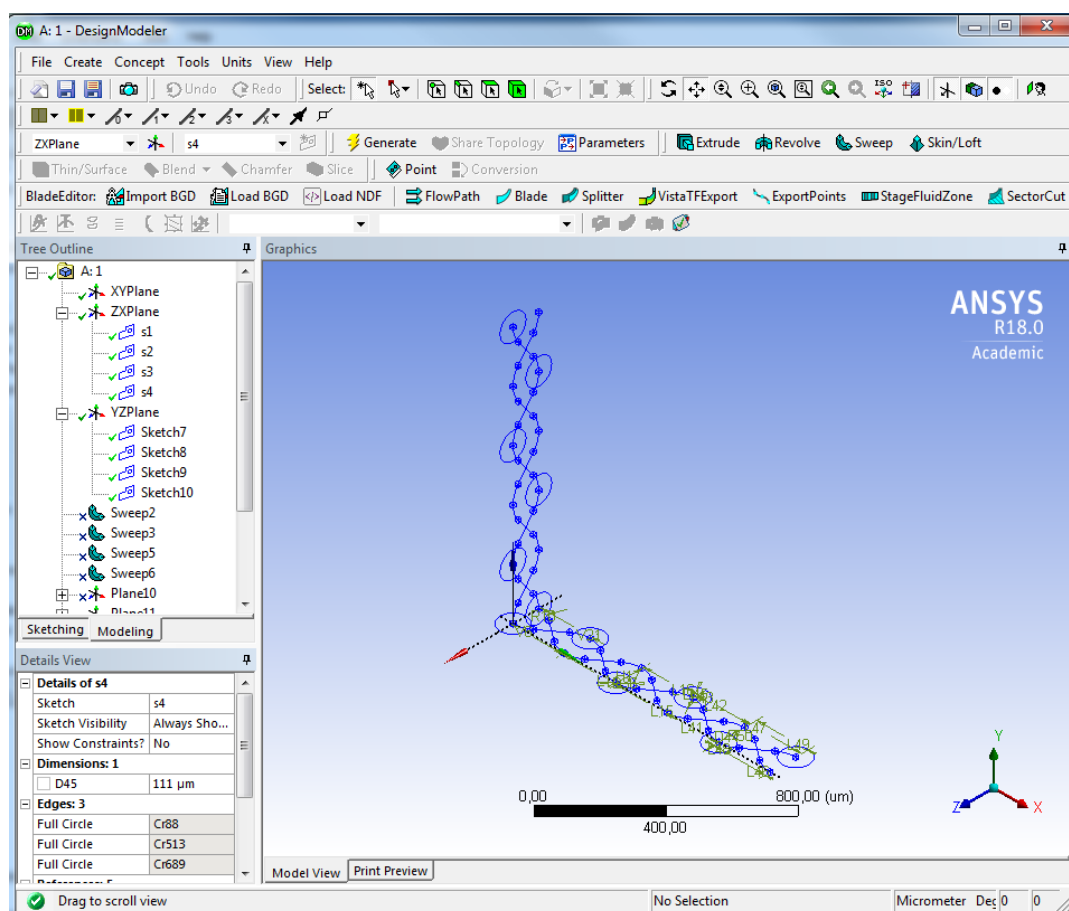


Figura 4.7: Creación de croquis paramétricos

Se dibujan croquis con la sección transversal y la trayectoria de los filamentos que componen la malla, representados en la Figura 4.8.

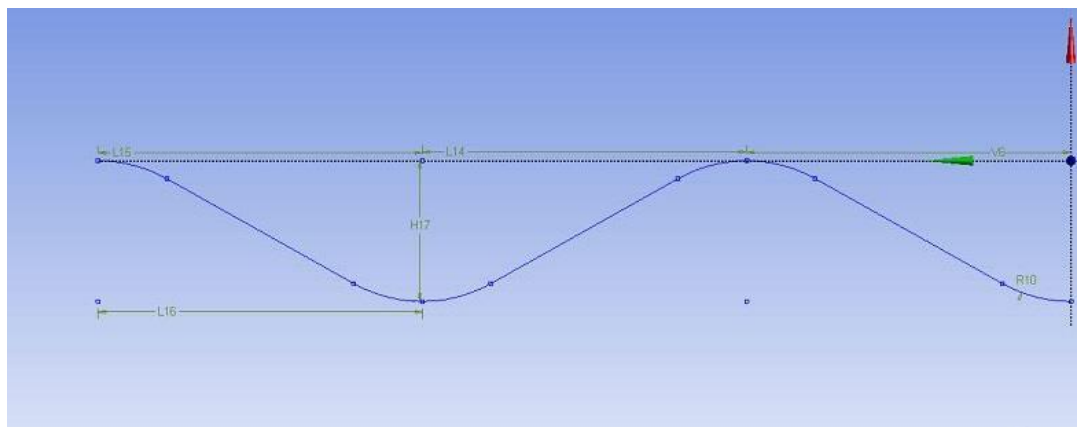


Figura 4.8: Croquis de un regenerador de porosidad uniforme

La Figura 4.9 representa dos croquis superpuestos. Uno con el perfil de los filamentos, y otro con la sección transversal de los mismos.

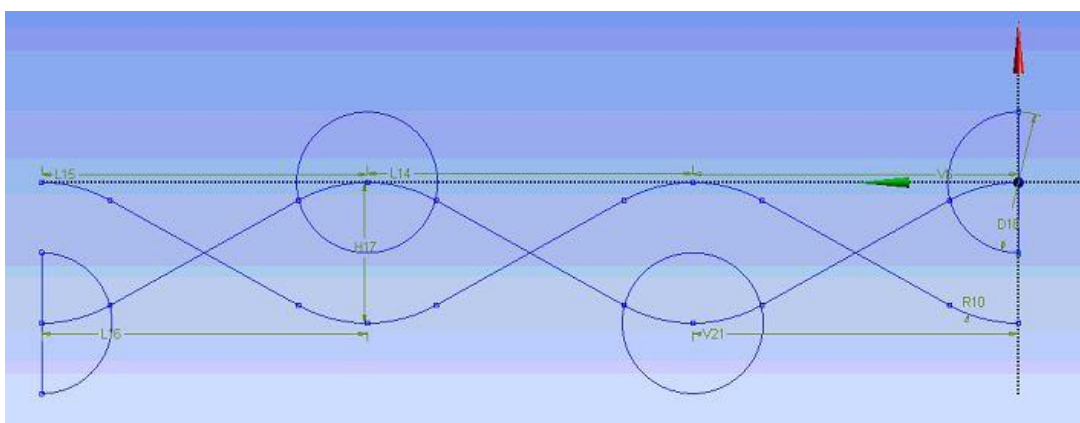


Figura 4.9: Acotación de croquis de un regenerador de porosidad uniforme

Utilizando la herramienta apropiada se extruyen los filamentos que componen el regenerador. Su creación se puede observar en la Figura 4.10

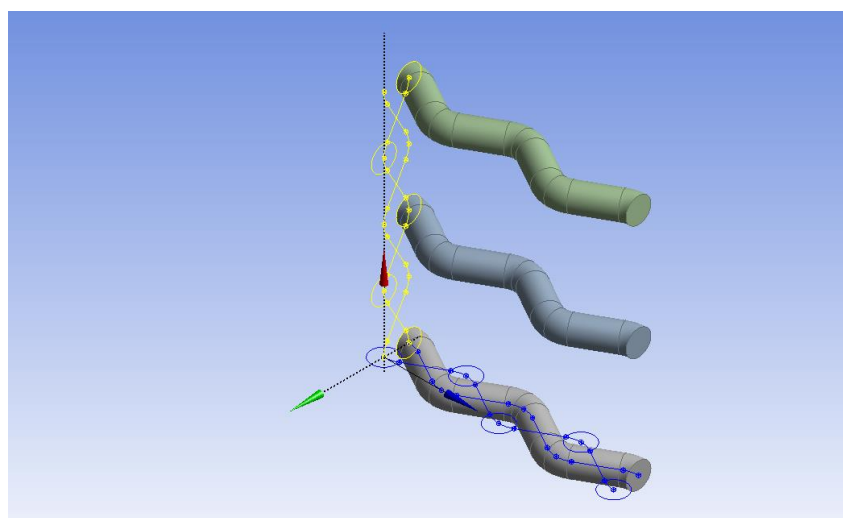


Figura 4.10: Creación de filamentos

Una vez obtenidos los primeros regeneradores que componen la primera capa utilizando la herramienta *Pattern*. La Figura 4.11 representa la selección de regeneradores a repetir, y Figura 4.12 representa la elección de dirección para posicionamiento de nuevos regeneradores.

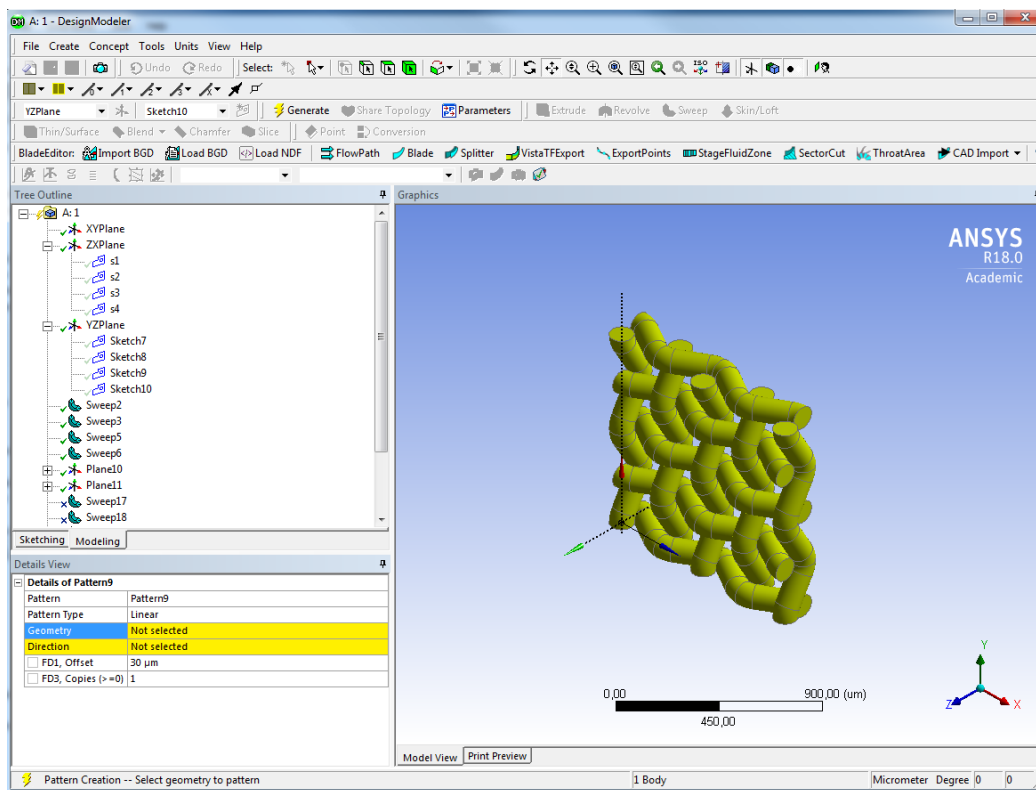


Figura 4.11: Creación de patrón de primera capa de filamentos

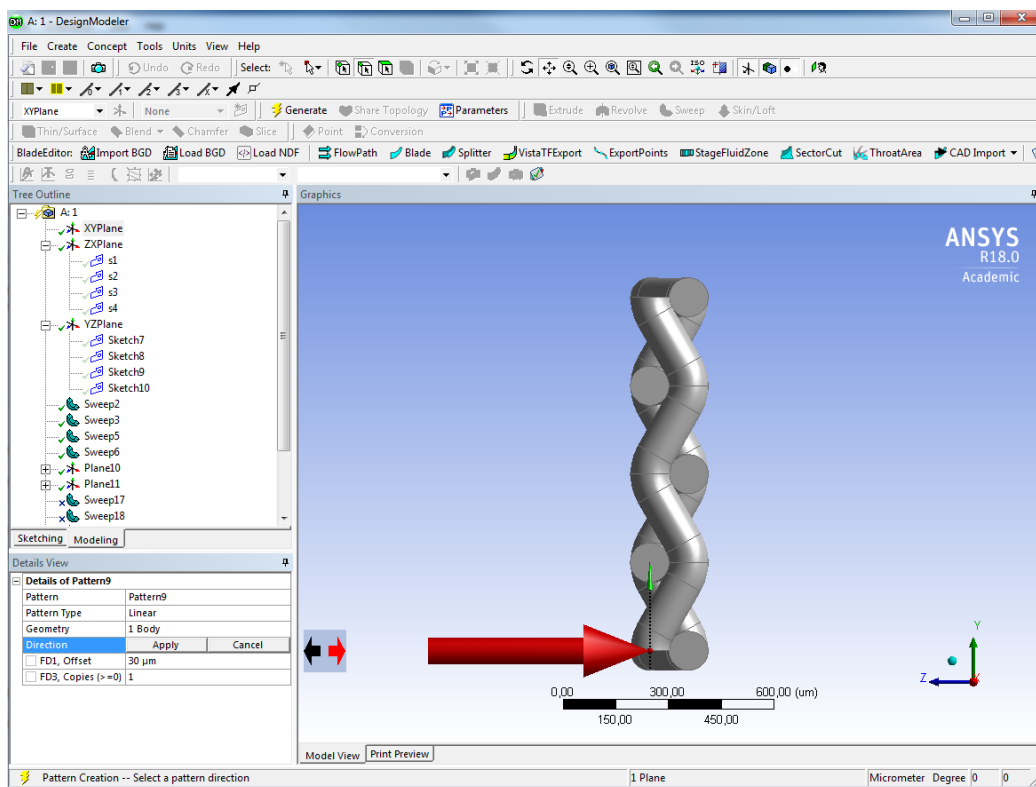


Figura 4.12: Dirección de creación del patrón de la primera capa de filamentos

En la figura se puede observar el resultado de la creación de patrón de los primeros regeneradores. Se puede observar que la posición de las capas es alineada.

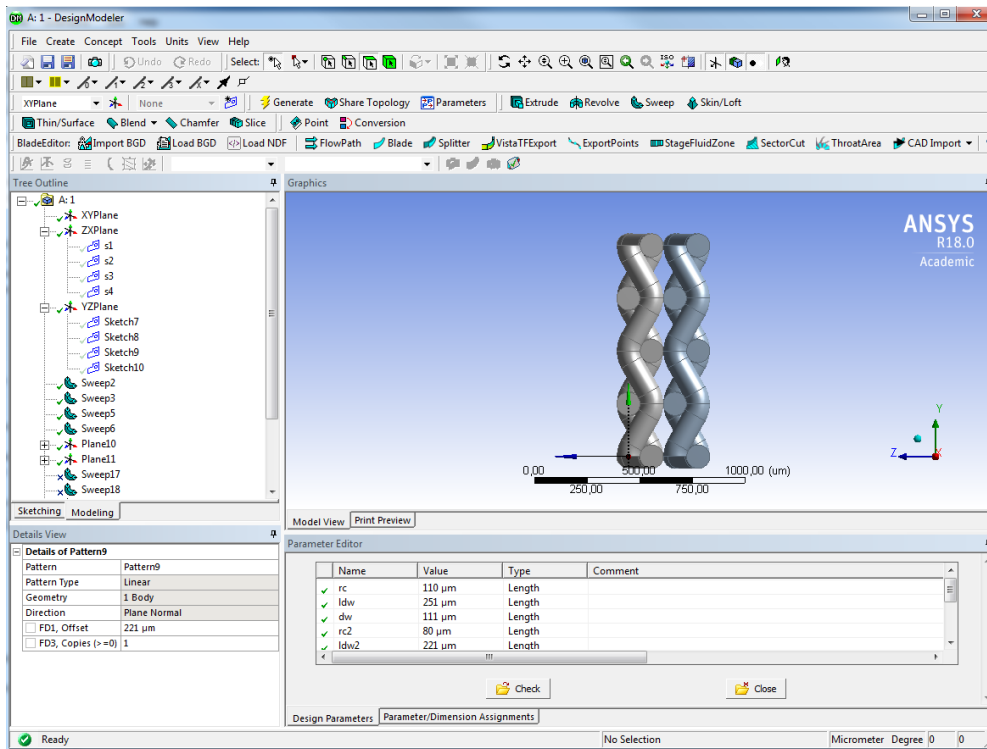


Figura 4.13: Patrón de la primera capa de los filamentos

Para crear una estructura de tipo desalineada y sin contacto, el segundo regenerador creado con la herramienta *Pattern*, se desplaza respecto al primero una distancia que es la mitad de separación entre los hilos, y en los dos ejes, perpendiculares al eje longitudinal, cuya representación se puede observar en la Figura 4.14.

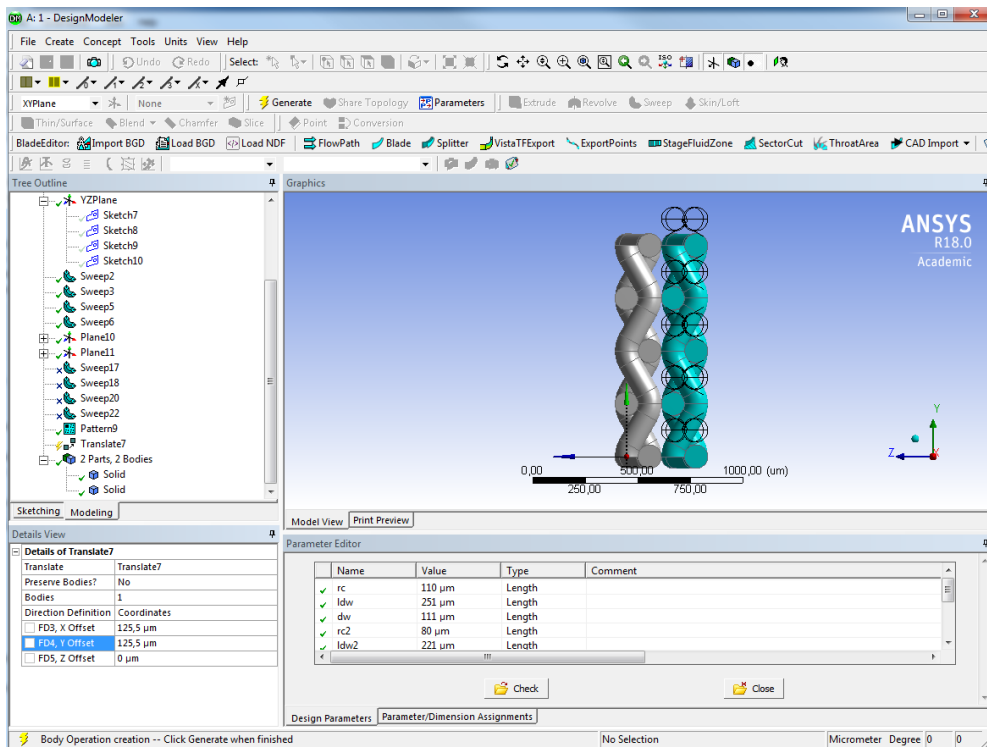


Figura 4.14: Creación de una malla desalineada y sin contacto

Como resultado, representado en la Figura 4.15, Figura 4.16 y Figura 4.17 se obtienen dos capas idénticas pero desplazadas una respecto a otra, creando de esta forma una estructura desalineada sin contacto.

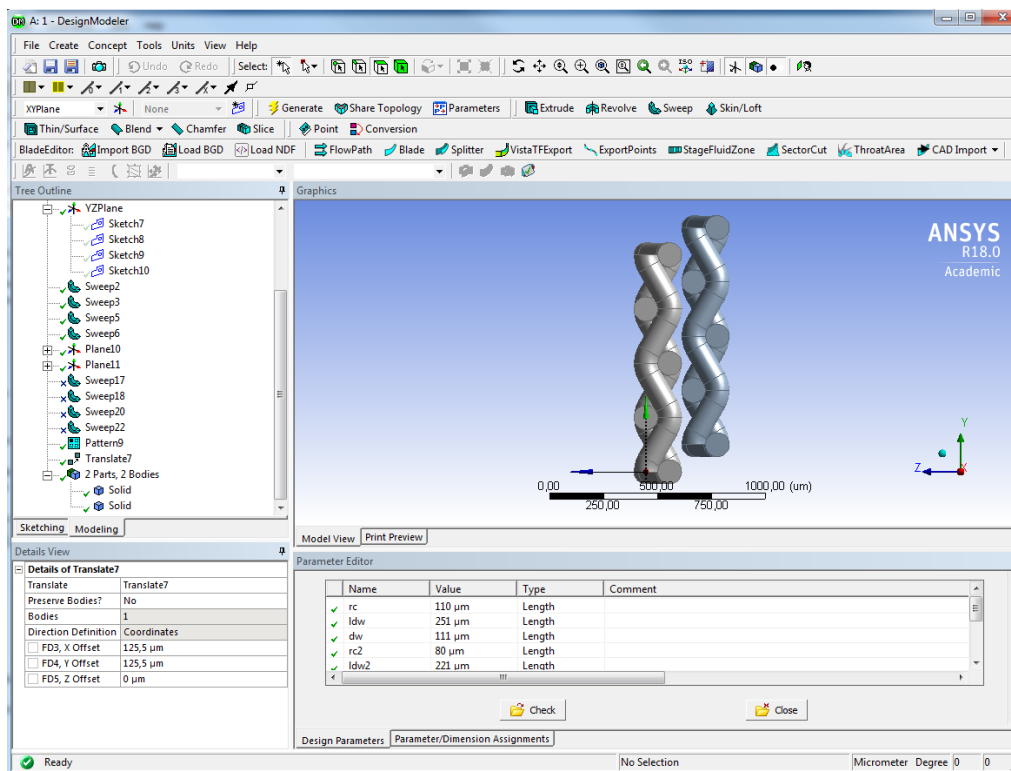


Figura 4.15: Dos capas de filamentos formando una estructura desalineada y sin contacto

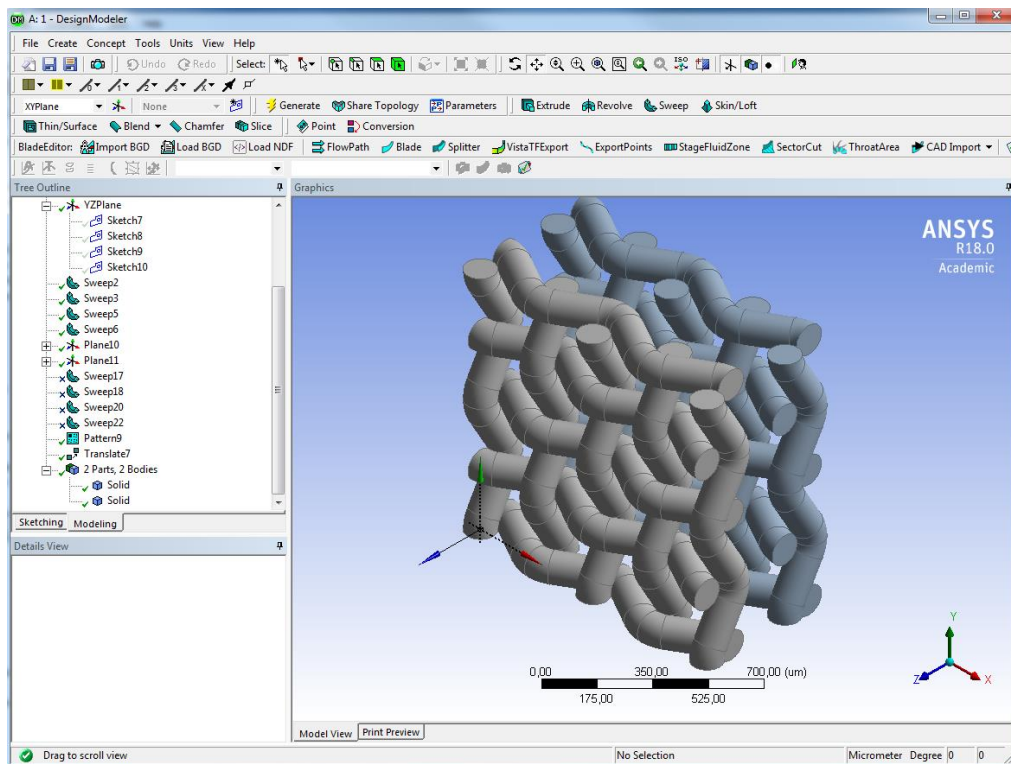


Figura 4.16: Dos capas de filamentos formando una estructura desalineada y sin contacto, vista isométrica

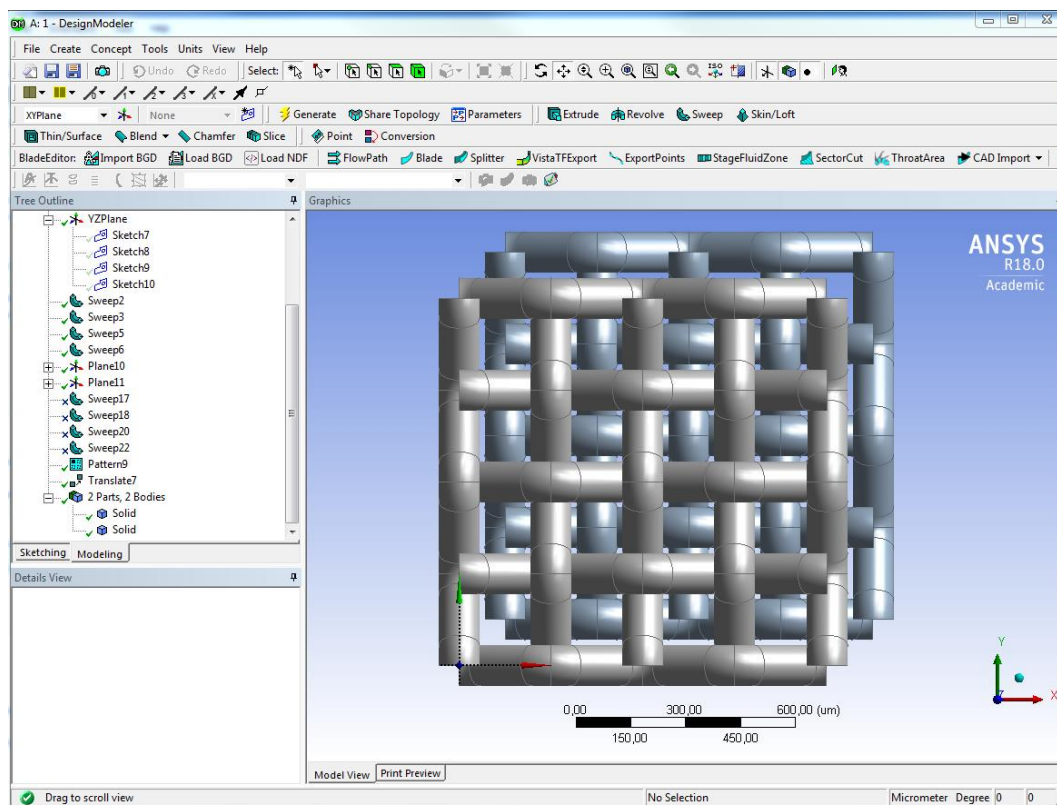


Figura 4.17: Dos capas de filamentos formando una estructura desalineada y sin contacto, vista de perfil

De esta forma se crea una geometría desalineada transversal y sin contacto. A continuación se crea un patrón con los dos sólidos dibujando de esta forma la longitud deseada del regenerador a estudiar, representado en la Figura 4.18.

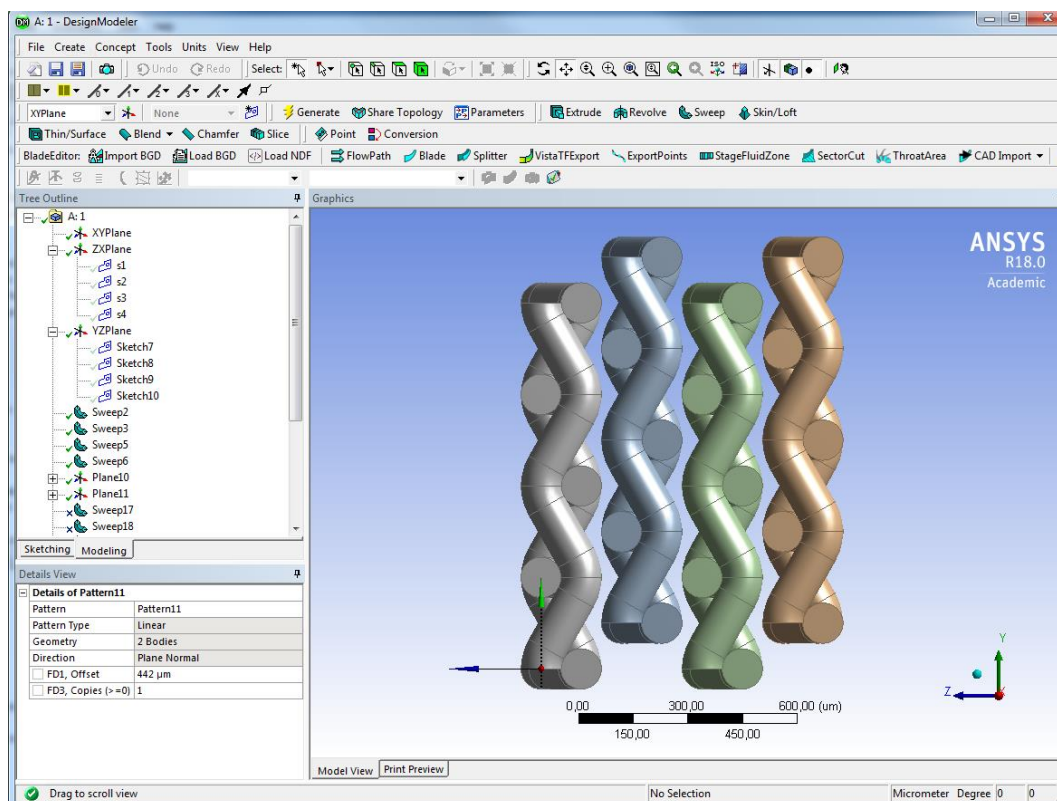


Figura 4.18: Creación de longitud deseada de regenerador a estudiar

Utilizando la herramienta *enclosure* se crea un regenerador adicional envolvente, que en un futuro se denominará como el fluido de trabajo, representado en la Figura 4.19.

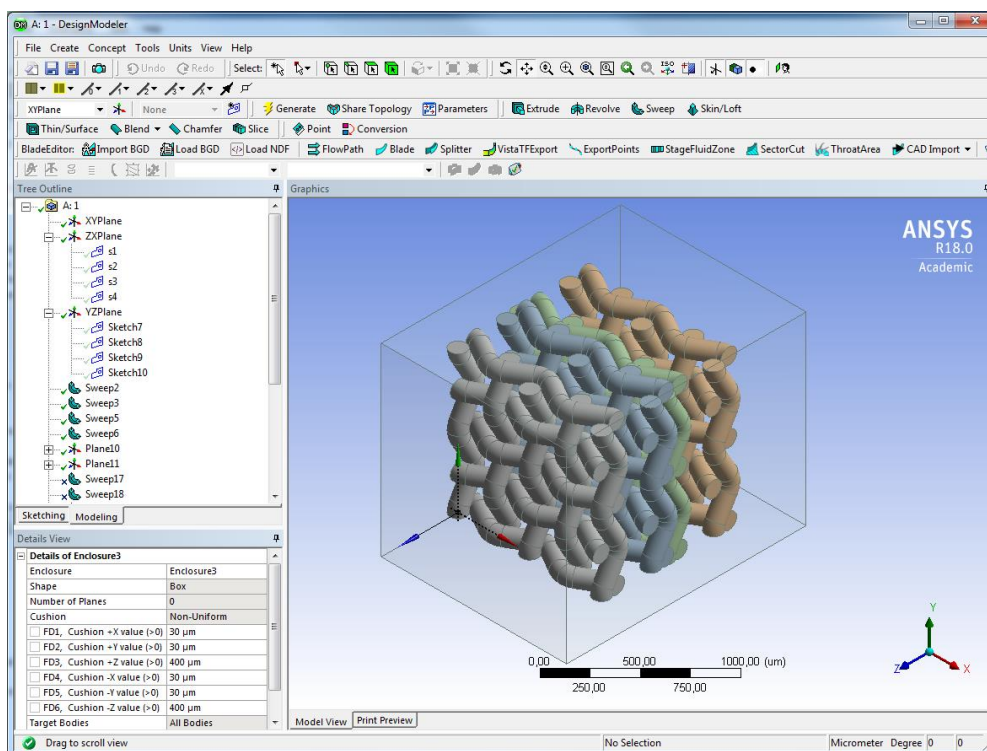


Figura 4.19: Creación de la envolvente con la herramienta *enclosure*

Para la adaptación del regenerador a un estudio de elemento infinitesimal de un total de regenerador, es necesario un recorte lateral con la herramienta *slice*. Se crean cuatro planos en puntos determinados deseados, a partir de los cuales se realiza la sección del regenerador de geometría deseada. Se representa en la Figura 4.20 y Figura 4.21.

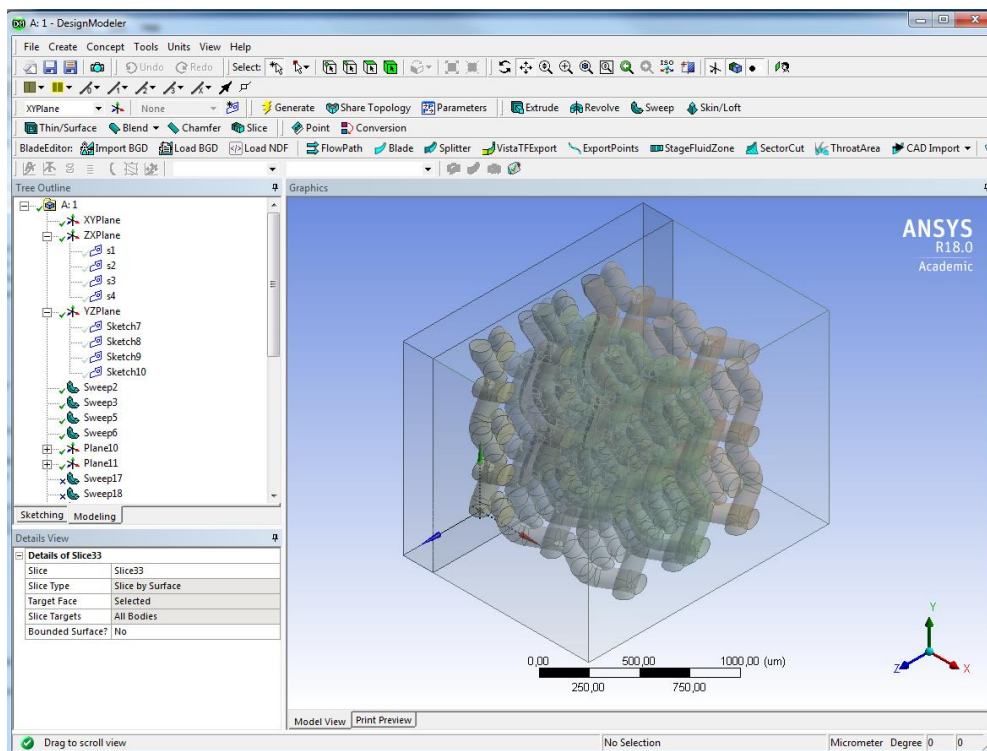


Figura 4.20: Sección del regenerador para la creación de la geometría deseada

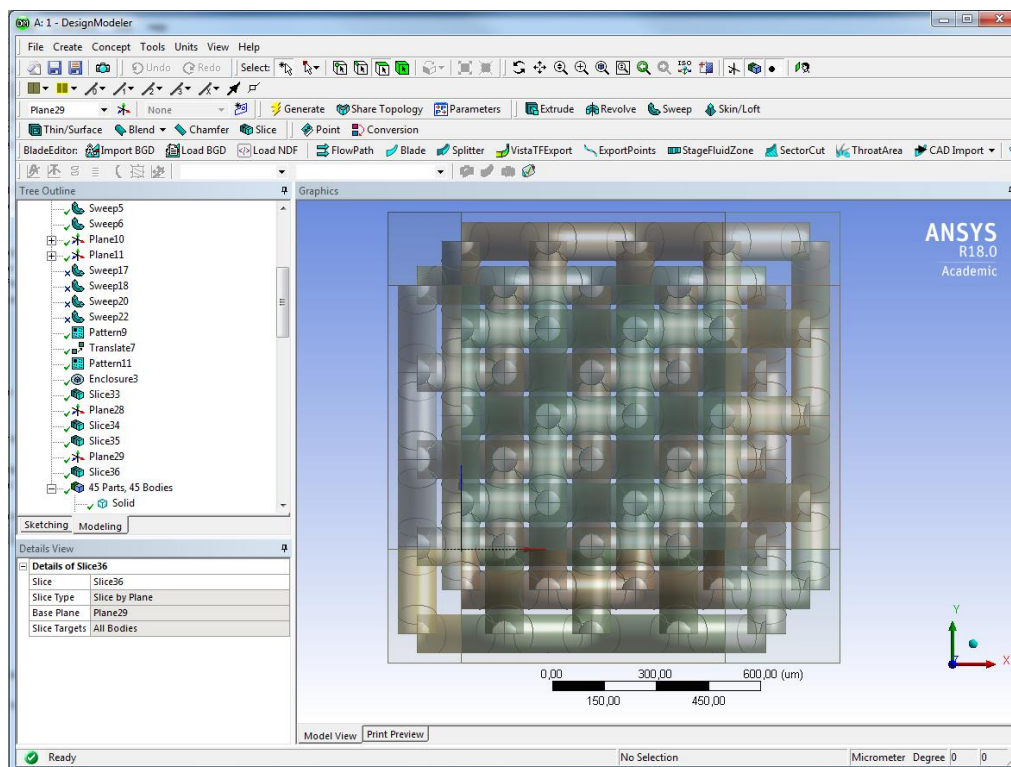


Figura 4.21: Sección del regenerador por cuatro planos para la creación de la geometría deseada

Una vez realizadas las secciones pertinentes se suprimen los cuerpos exteriores, formando de este modo la geometría deseada. La selección de sólidos a suprimir se representa en la Figura 4.22 en color amarillo.

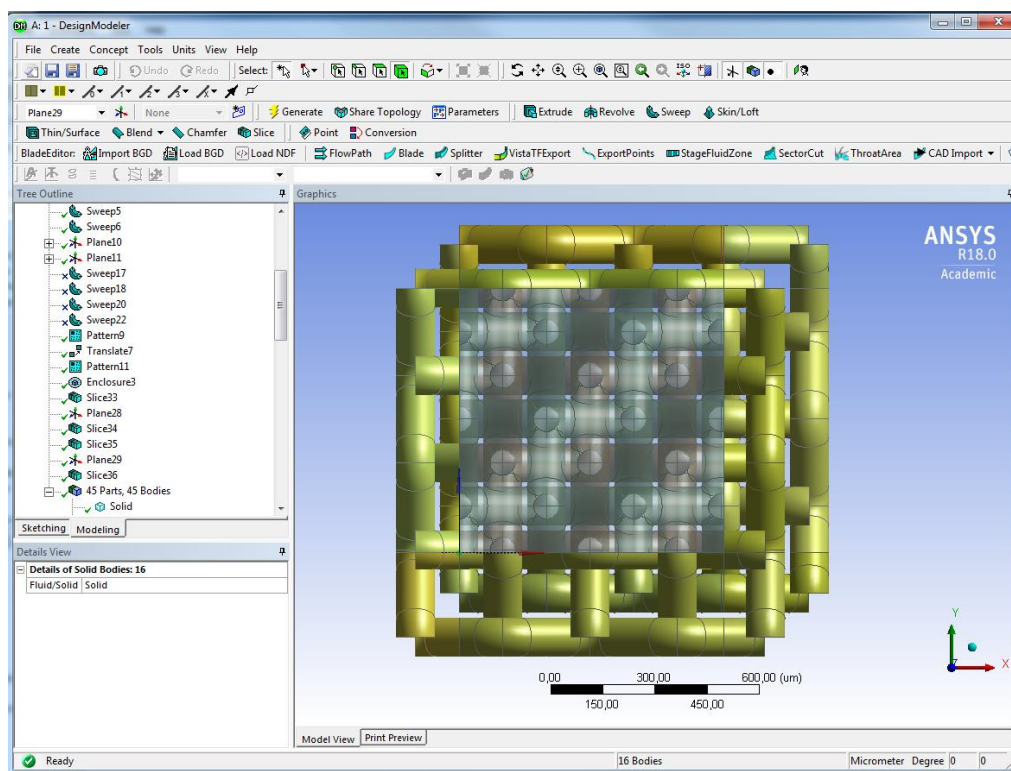


Figura 4.22: Selección de cuerpos a suprimir para la creación de geometría deseada

De esta forma se obtienen regeneradores deseados para el estudio. Para el análisis de regenerador de porosidad variable, previamente se ha creado un regenerador de porosidad uniforme. Se puede observar en la Figura 4.23 y Figura 4.24

En las figuras Figura 4.23 y Figura 4.24 se representa el regenerador S110 – 63% – NC, de porosidad uniforme $\Pi_v = 0.63$

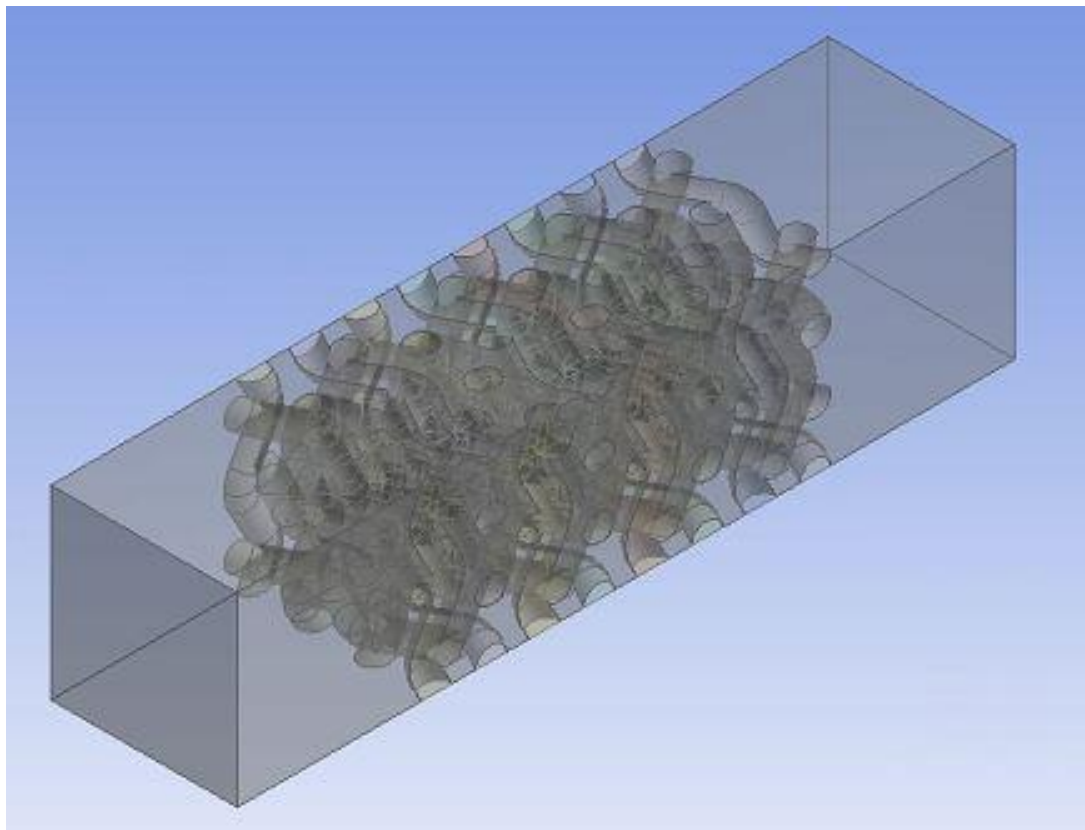


Figura 4.23: Regenerador de porosidad uniforme, vista isométrica

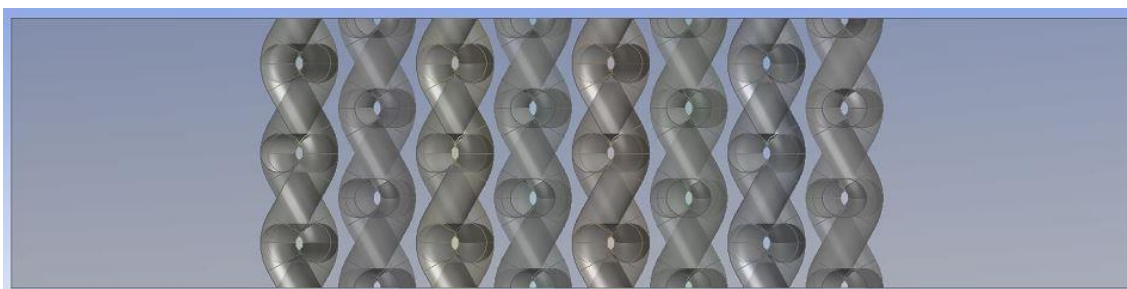


Figura 4.24: Regenerador de porosidad uniforme, visión lateral

Como se puede observar en la Figura 4.23 y la Figura 4.24 al regenerador creado y envuelto en un volumen de fluido, se le ha añadido un volumen adicional en la izquierda y la derecha de los filamentos. El objetivo de su creación es, en un futuro, el desarrollo completo de la velocidad, temperatura y presión impuestas como condición de contorno, y con ello la mayor similitud posible con el objeto real del estudio.

4.2.2. Regenerador de porosidad variable

Este regenerador en comparación con el regenerador anterior se compone de dos partes, cada una con una porosidad distinta. La primera mitad se corresponde con la malla S110 –

63% – NC. Mientras que la segunda mitad se crea variando el diámetro de los filamentos en los croquis previamente realizados. En la Figura 4.25 se representa el regenerador S80 – 68% – NC.

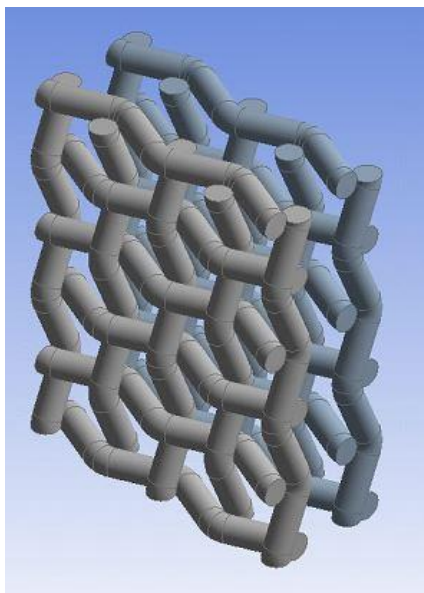


Figura 4.25: Regenerador S80 – 68%/–NC de porosidad $\Pi_v = 0.68$

Creando un patrón desplazado un medio de la separación entre los filamentos, se obtienen dos regeneradores a repetir en el eje longitudinal. Dado este regenerador de característica de porosidad variable, se crea el número de repetición necesario para en conjunción con la mitad del regenerador de porosidad uniforme, poder crear un regenerador con dos porosidades distintas. En la Figura 4.26 y Figura 4.27 se representa el regenerador con dos porosidades $\Pi_v = 0.63$ y $\Pi_v = 0.69$ las cuales han sido calculadas a partir de la ecuación (3.3)

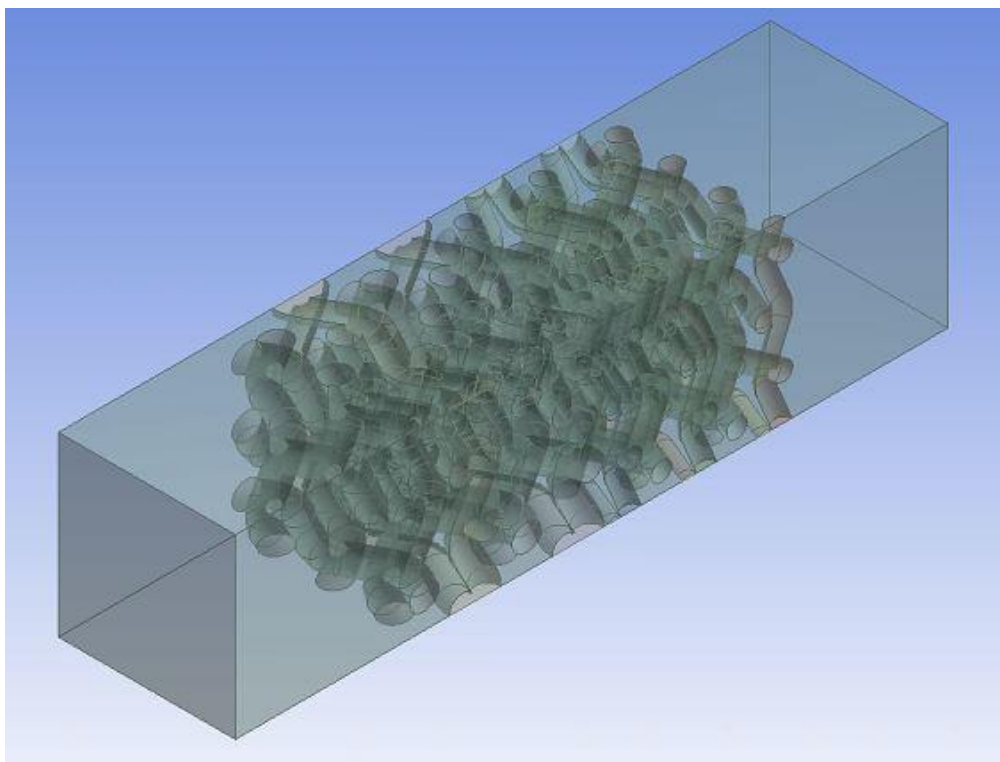


Figura 4.26: Regenerador de porosidad variable vista isométrica

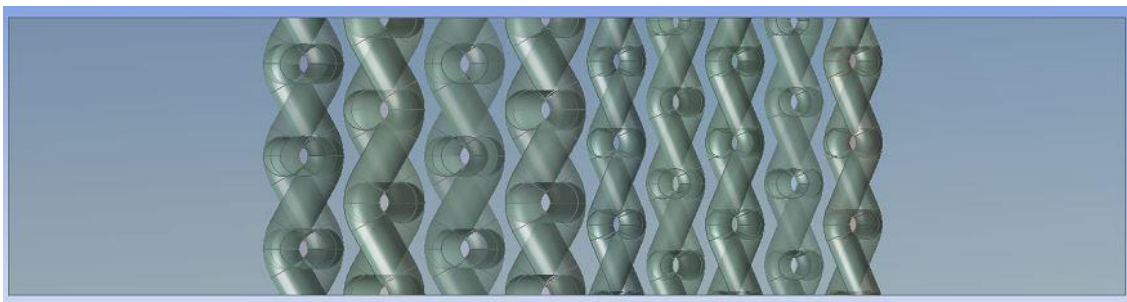


Figura 4.27: Regenerador de porosidad variable vista de perfil

Una vez creados los regeneradores a estudiar el siguiente paso es la discretización del volumen en otros más pequeños mediante la aplicación llamada Meshing.

4.3. Mallado del cuerpo regenerador

Para poder realizar un análisis de elementos finitos en un sistema físico, el software Ansys dispone de la aplicación Meshing. El programa divide una geometría importada en miles de puntos llamados nodos, los cuales están unidos entre sí por aristas y superficies comunes. Se crea una división del cuerpo en elementos más pequeños la aplicación de ecuaciones matemáticas a los cuales, es más fácil que a una geometría de un tamaño mayor. De esta forma se hace posible el estudio de sistemas muy complejos.

En el caso de presente estudio se crea un mallado para regenerador de porosidad uniforme y otro mallado con diferentes características para el regenerador de porosidad variable.

Para importar la geometría creada previamente con DesignModeler a la aplicación Meshing, se unen ambos bloques de aplicaciones dentro del espacio de trabajo en Ansys representado en la Figura 4.28

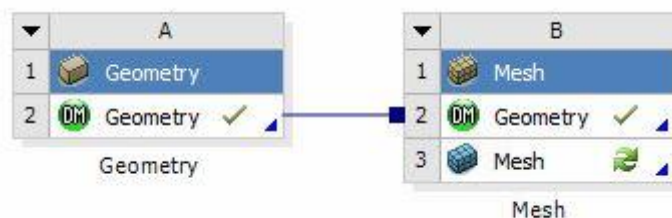


Figura 4.28: Creación de proyecto de mallado

Una vez importada la geometría representada en la Figura 4.29.

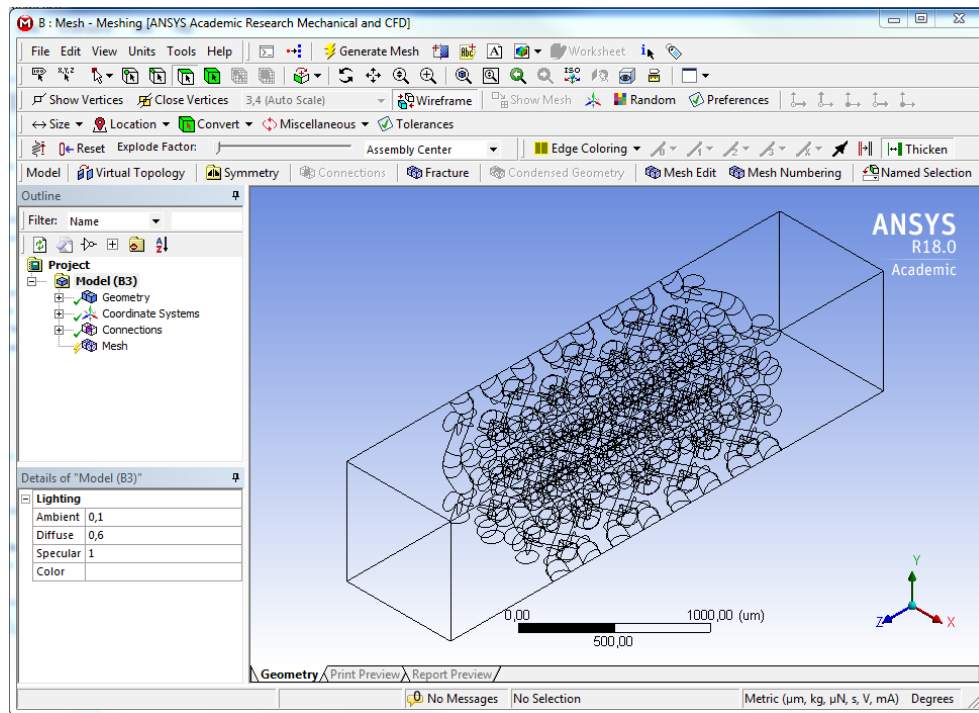


Figura 4.29: Importación de geometría en el programa Mesh

Durante la importación de la geometría en la región de contacto se crean dos superficies coincidentes. Una pertenece al regenerador y otra al volumen fluido que lo envuelve. Se representan en la Figura 4.30 y su posterior acoplamiento térmico permitirá una transferencia de calor desde el fluido a los filamentos y viceversa.

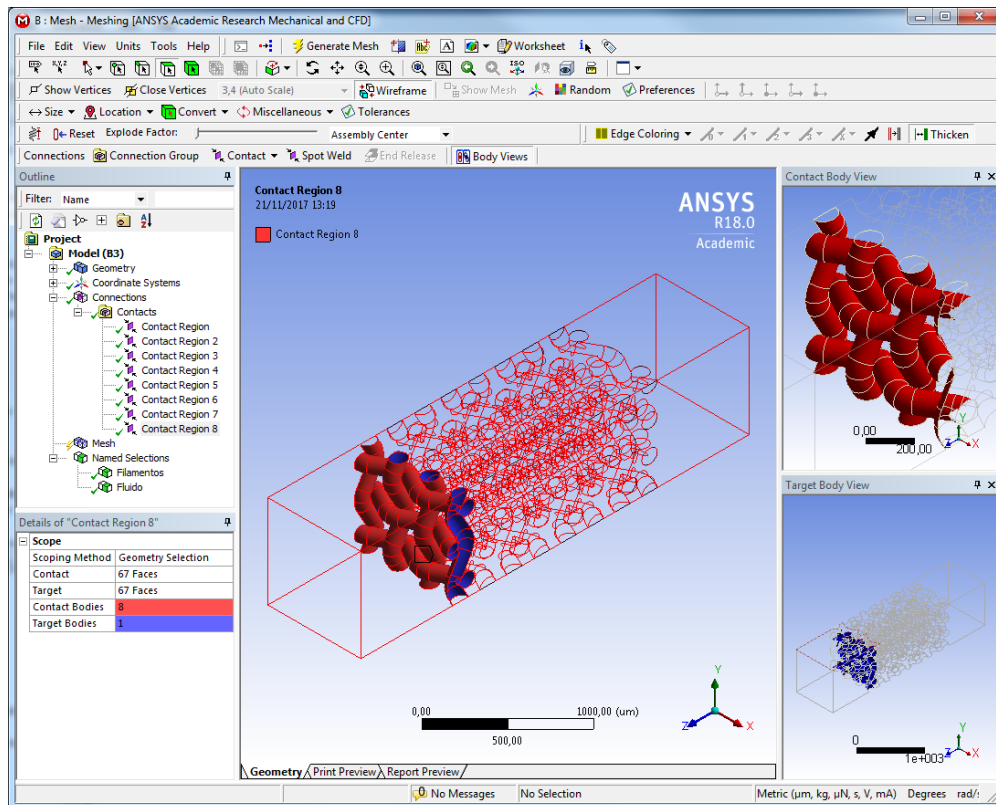


Figura 4.30: Superficie de contacto entre filamentos y fluido de trabajo

El primer paso es la denominación de las zonas de trabajo. En la Figura 4.31 se representa el nombramiento de las zonas del regenerador de porosidad uniforme. Las zonas necesarias para trabajar son Filamentos, Fluido, Entrada y Salida.

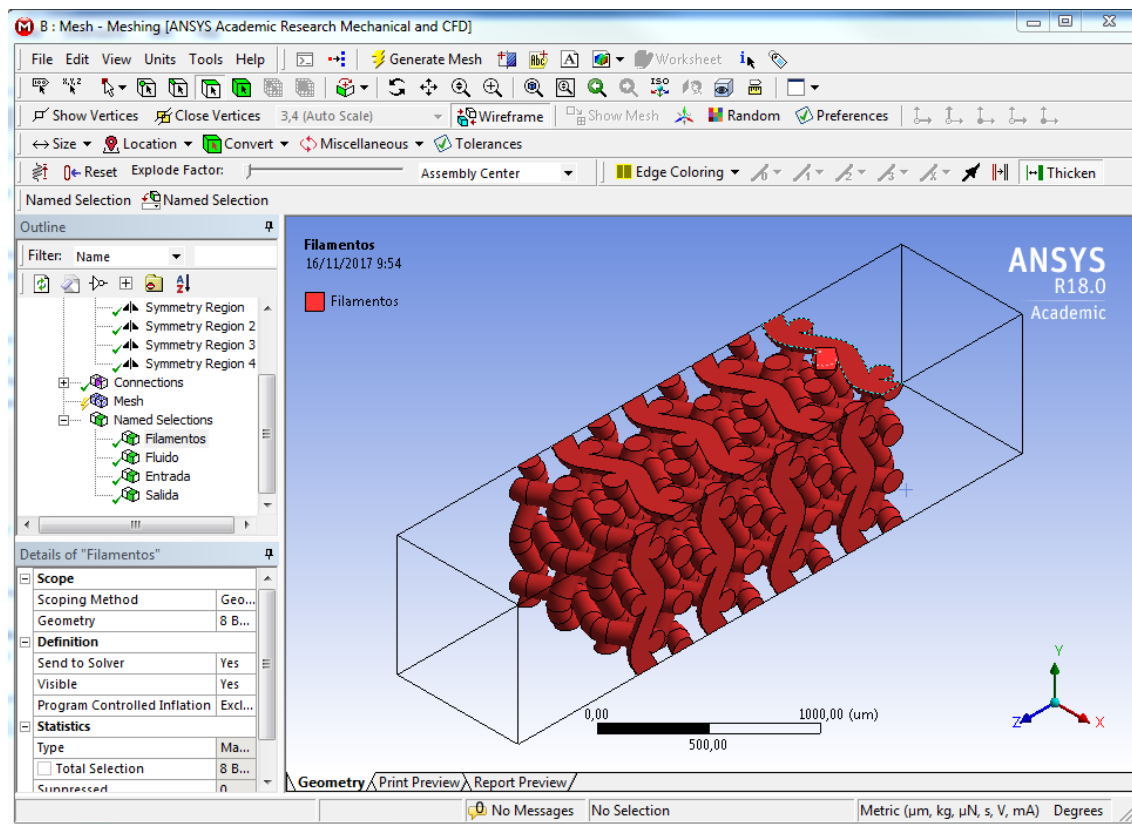


Figura 4.31: Nombramiento de zona Filamentos

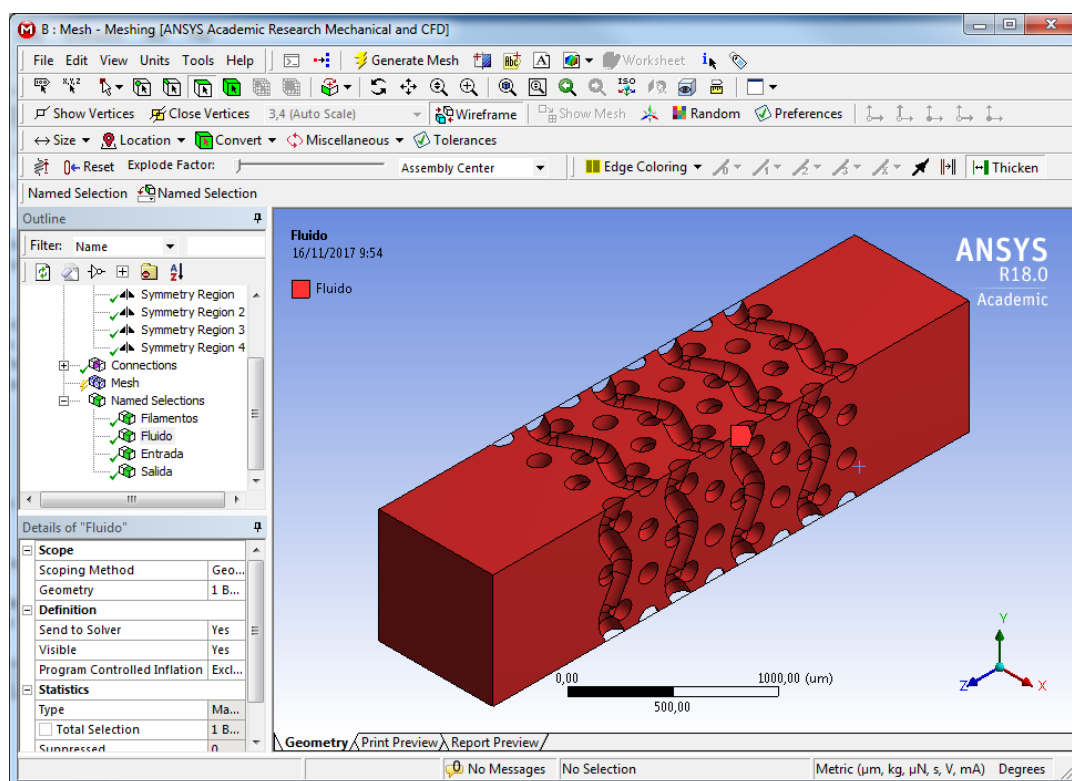


Figura 4.32: Nombramiento de zona Fluido

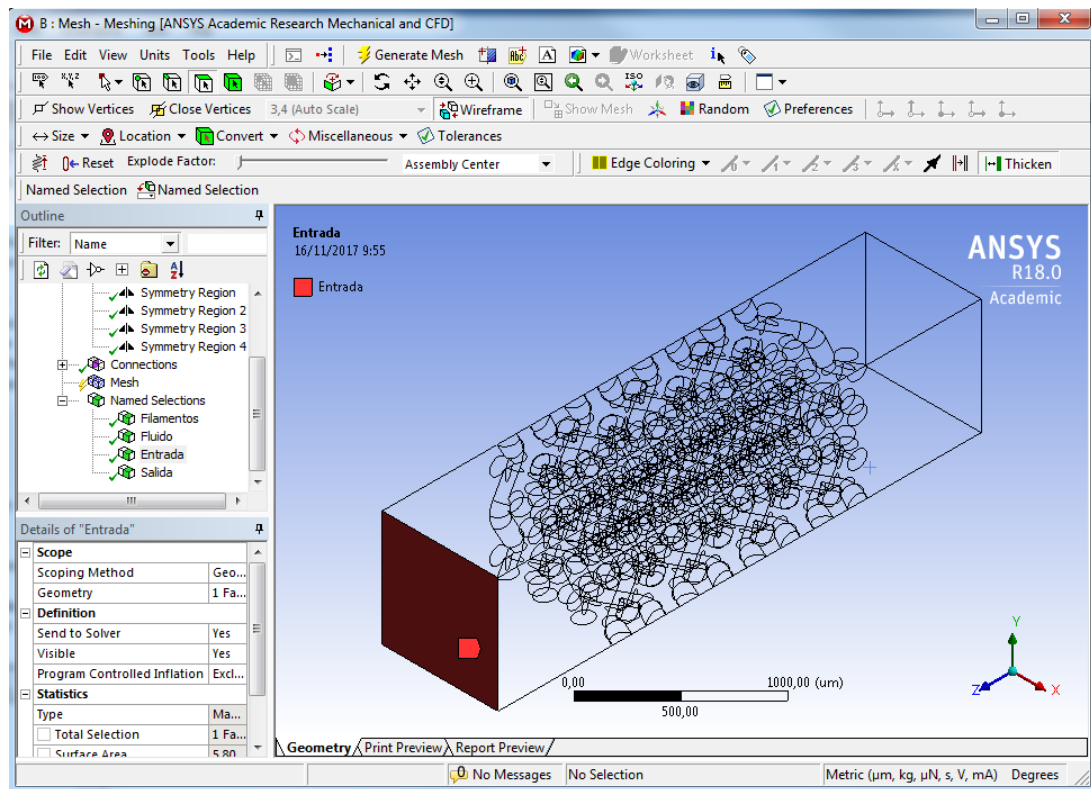


Figura 4.33: Nombramiento de Entrada

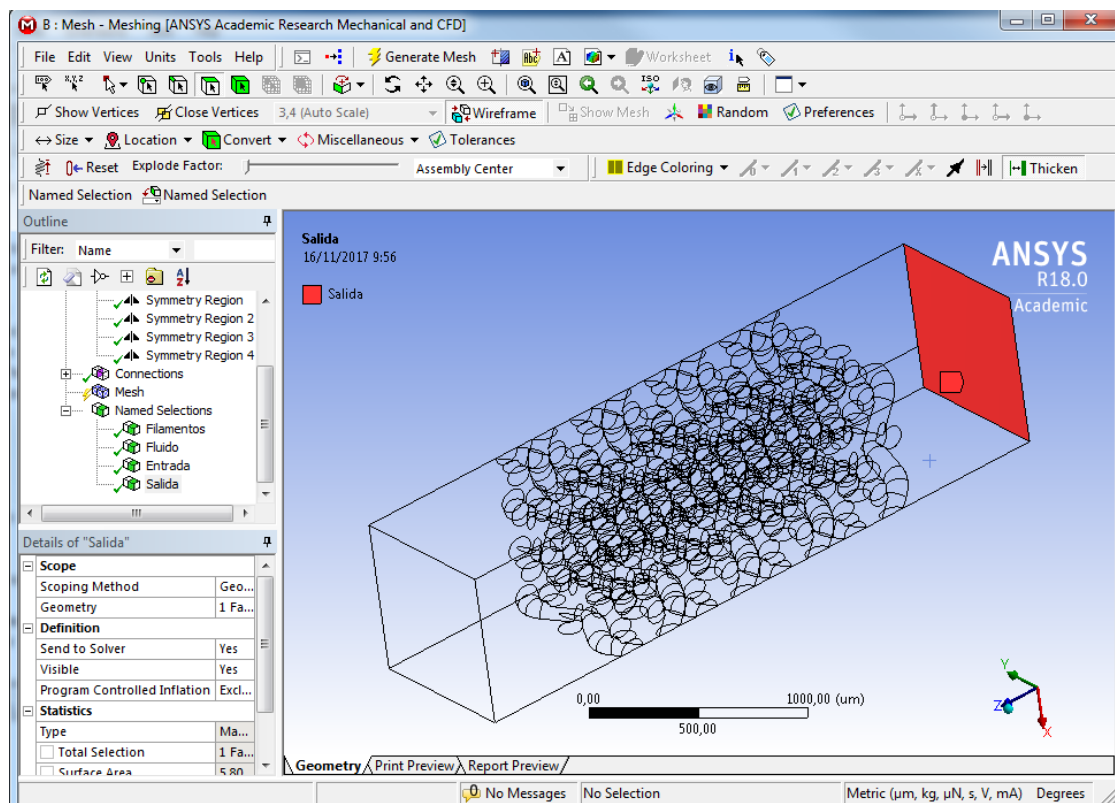


Figura 4.34: Nombramiento de Salida

Dichas zonas de trabajo destacadas y nombradas serán, en un futuro, lugares de aplicación de condiciones iniciales y de contorno.

Es necesario destacar que el modelo tridimensional creado no representa una sección completa del regenerador de un motor Stirling. La geometría creada es equivalente a un elemento infinitesimal del interior. Una de las características a destacar es las condiciones de contorno simétricas. Dichas condiciones se imponen gracias a la utilización de la aplicación de simetría en las caras seleccionadas. En la Figura 4.35 representa el nombramiento de las caras del regenerador como superficie de simetría.

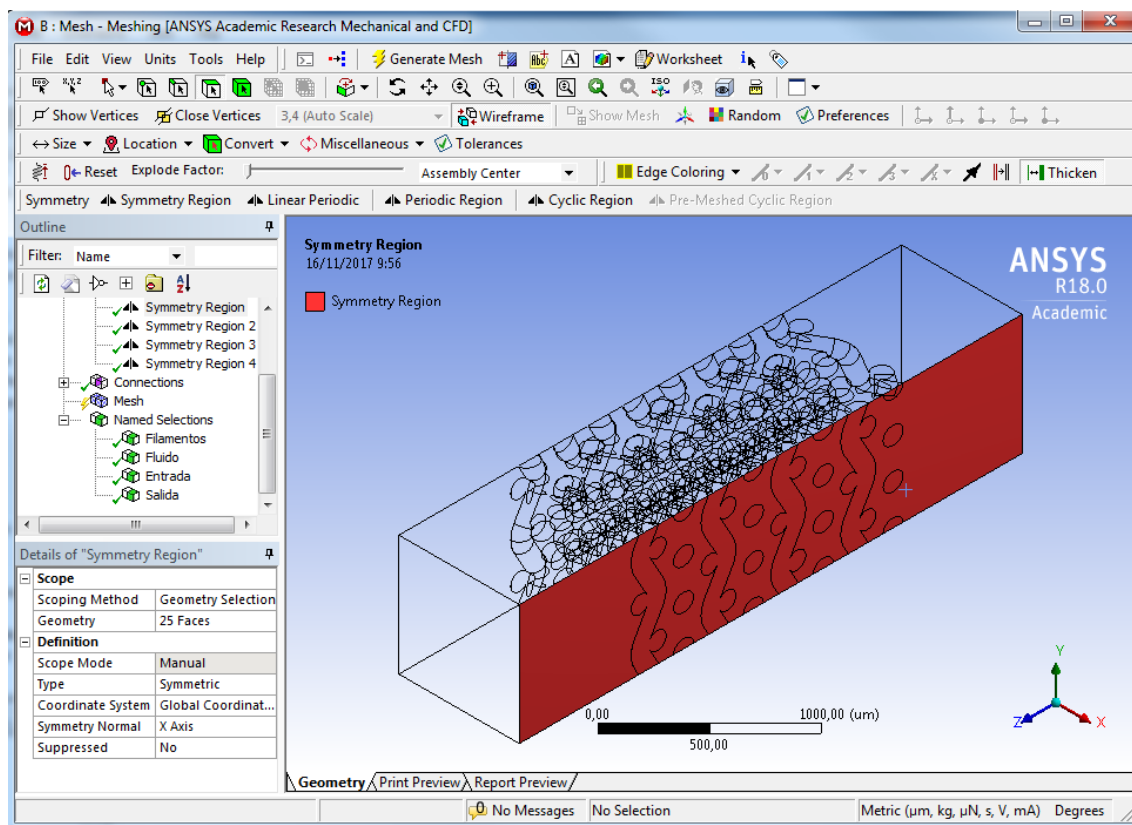


Figura 4.35: Creación de superficies simétricas

El método del mallado seleccionado es la división de la geometría importada en tetraedros de siguientes características para el regenerador de porosidad uniforme representado en la Figura 4.36.

Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Export Format	Standard
Element Midside Nodes	Dropped
Sizing	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	0,990 µm
<input type="checkbox"/> Max Face Size	99,0 µm
<input type="checkbox"/> Max Tet Size	199,690 µm
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (0,4950 µm)
Minimum Edge Length	1,15590 µm
Quality	
Inflation	
Assembly Meshing	
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	867539
<input type="checkbox"/> Elements	4310580

Figura 4.36: Características de la malla del regenerador uniforme

En la Figura 4.37 se puede observar la malla del regenerador de porosidad uniforme. El mallado es más denso en la zona de filamentos. Cuantos más puntos contenga, más similitud tendrá con un sistema real. Pero también hay que tener en cuenta que una malla muy fina, implica una gran carga computacional.

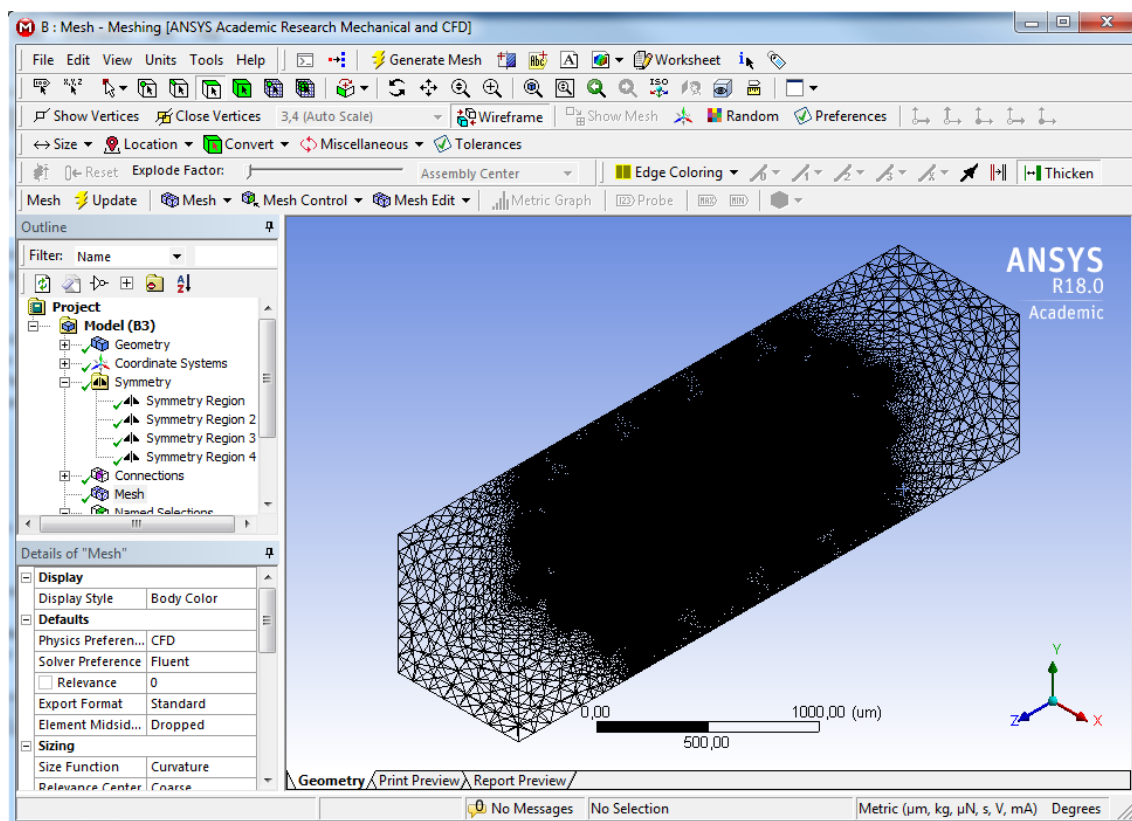


Figura 4.37: Malla del regenerador porosidad uniforme

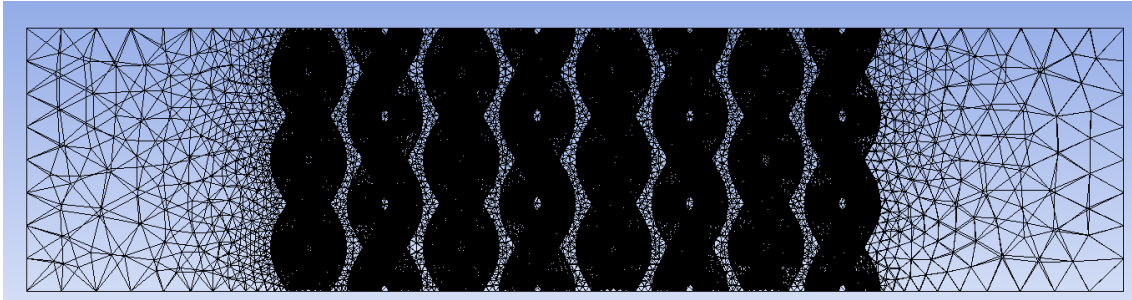


Figura 4.38: Detalle de la malla del regenerador porosidad uniforme

El detalle de mallado de los filamentos se representa en la Figura 4.39.

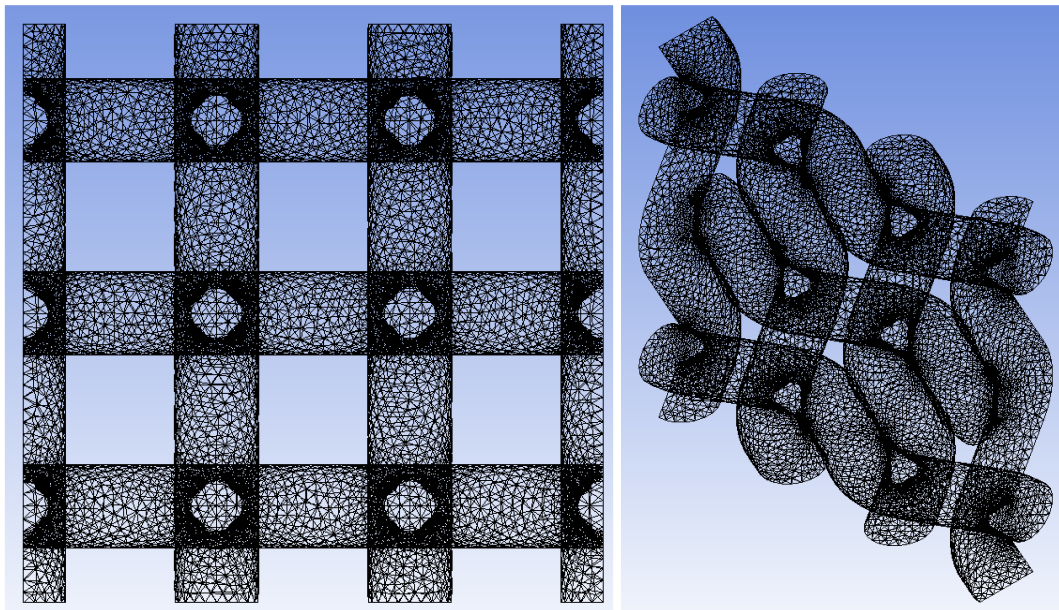


Figura 4.39: Detalle del mallado de los filamentos

El detalle del mallado de la zona llamada Fluido se representa en la Figura 4.40.

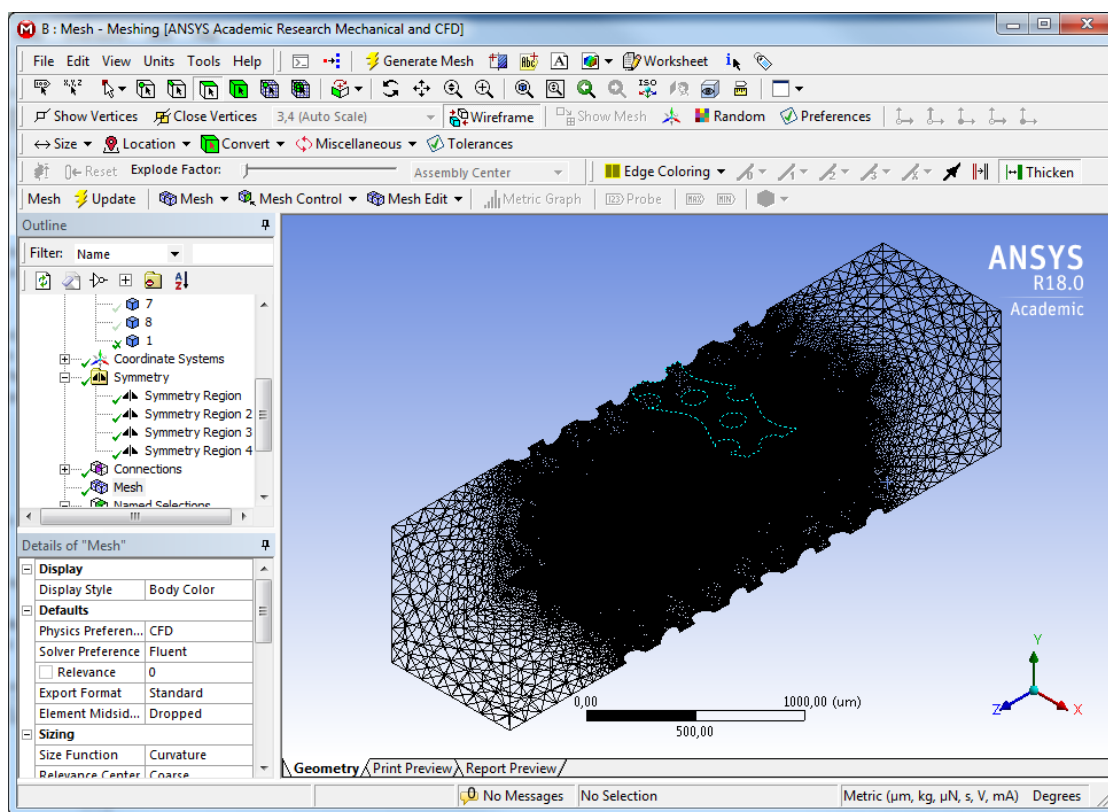


Figura 4.40: Mallado de la zona de Fluido

El mallado de regenerador de porosidad variable se diferencia en el tamaño de elementos debido a que la mitad del regenerador se compone de filamentos de un diámetro menor que el regenerador de porosidad uniforme. Un tamaño reducido de los filamentos requiere una mayor precisión en el mallado para un cálculo más robusto y fiable. Las características de dicha malla se representan en la Figura 4.41.

Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Export Format	Standard
Element Midside Nodes	Dropped
Sizing	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	0,850 µm
<input type="checkbox"/> Max Face Size	130,890 µm
<input type="checkbox"/> Max Tet Size	189,0 µm
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (0,4250 µm)
Minimum Edge Length	1,15740 µm
Quality	
Inflation	
Assembly Meshing	
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	717928
<input type="checkbox"/> Elements	3514017

Figura 4.41: Características de la malla de porosidad variable

Se puede destacar el número superior de nodos y elementos en el regenerador de porosidad uniforme ya que se compone de elementos de mayor tamaño que el regenerador de porosidad variable

Y en la Figura 4.42 y Figura 4.43 se representa la malla del regenerador de porosidad variable y sus componentes.

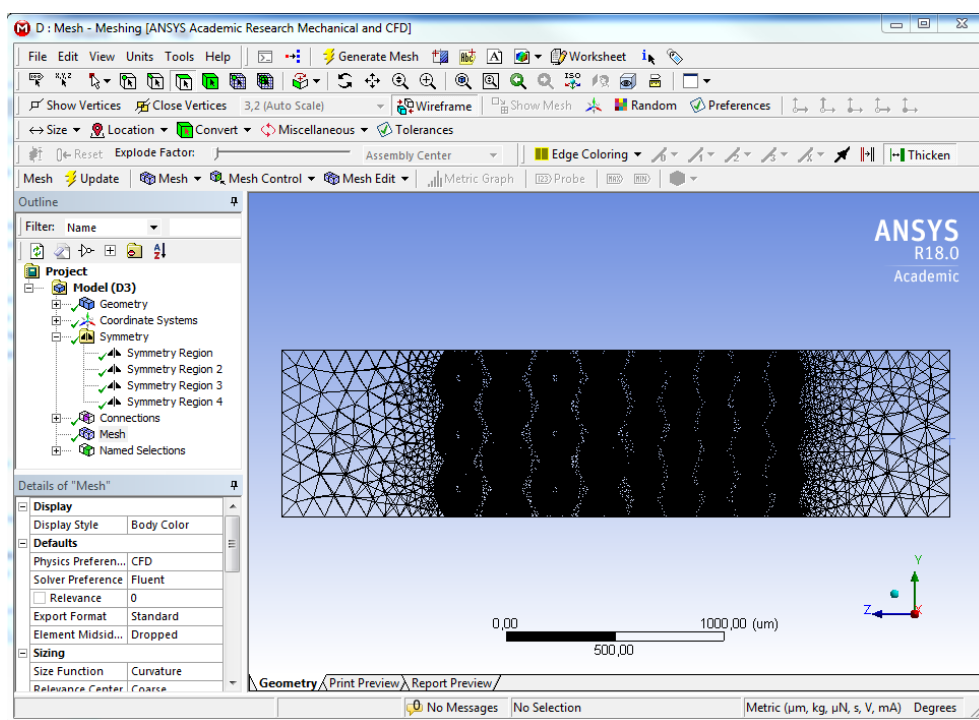


Figura 4.42: Mallado del regenerador de porosidad variable

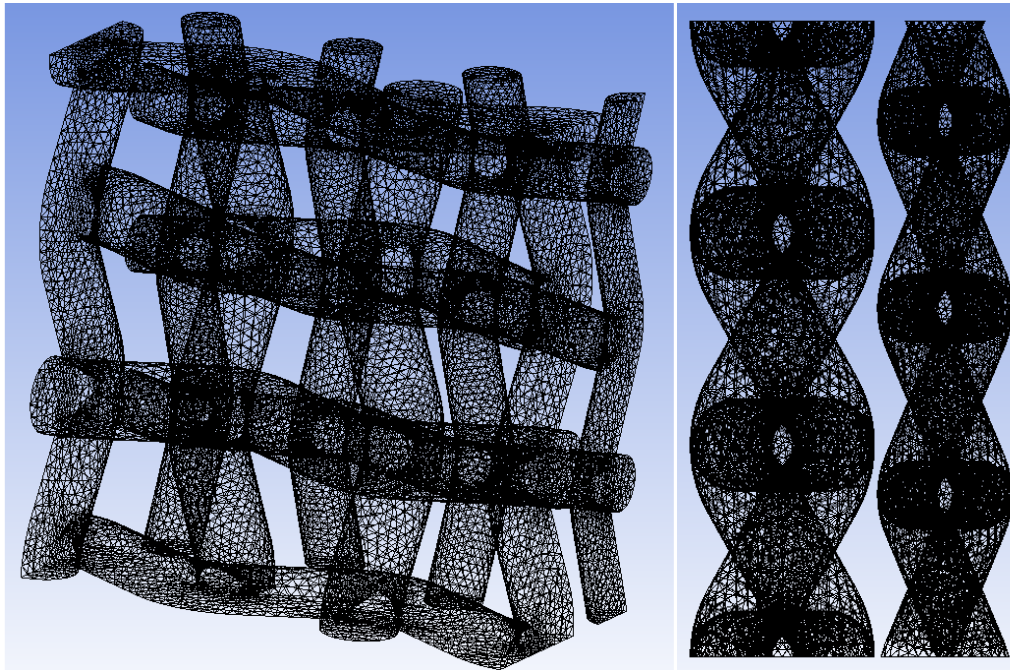


Figura 4.43: Malla de los filamentos del regenerador de porosidad variable

Una vez creadas las mallas de ambos regeneradores y nombradas las zonas para su análisis, se exporta el mallado creado a la aplicación llamada Fluent

4.4. Análisis numérico

Ansys Fluent CFD (dinámica de fluidos computacional) es una herramienta flexible, precisa y con amplitud de aplicaciones. Con este programa es posible obtener resultados rápidos para prácticamente cualquier sistema multifísico. Es aplicable en tales estudios como cavitación, flujos multifásicos, flujos reactivos y combustión, etcétera. Dado que el objetivo de presente estudio es el análisis de flujo pulsante a través de una malla de porosidad variable en un motor Stirling, las características del dicho software lo hacen adecuado para este estudio.

Este software de simulación está desarrollado utilizando la teoría de elementos finitos para estructuras y la teoría de volúmenes finitos para fluidos. A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas para modelar el flujo y la transferencia de calor.

4.4.1. Modelado matemático

Ecuación de continuidad

Es la ecuación de conservación de masa a través de un volumen de control infinitesimal

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4.1)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, t es tiempo y \vec{v} es el vector velocidad.

Ecuación de conservación de cantidad de movimiento

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.2)$$

Donde p es la presión estática, $\bar{\tau}$ es el tensor de tensiones, $\rho \vec{g}$ son fuerzas de gravedad y \vec{F} las fuerzas externas aplicadas.

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (4.3)$$

Donde μ es la viscosidad dinámica, I es la matriz unidad y el segundo término es el efecto de la dilatación volumétrica.

Ecuación de conservación de energía

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \left(\sum_j h_j J_j \right) + S_h \quad (4.4)$$

Donde $\sum_j h_j J_j$ es el término de efectos de entalpia en la difusión de especies, el S_h es el término de generación de energía térmica y el término E es la energía interna que se define en la ecuación (4.5).

$$E = h_e + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (4.5.)$$

Donde h_e es la entalpia.

Modelado del medio poroso

Al ser el regenerador una parte crucial y por tanto, su porosidad, se debe de modelar como tal. Para describir la naturaleza del medio poroso tanto, con propósito general como usado en el software Ansys, se fundamenta en la ley de H. Darcy y la ley de Forchheimer en flujos a alta velocidad, donde se obtienen de forma experimental los coeficientes necesarios para la descripción del flujo en medio poroso.

La ley de Darcy para un flujo estacionario y unidireccional se describe de siguiente forma:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha} v_f \quad (4.6.)$$

Donde ∇p es el gradiente de presión, μ es la viscosidad dinámica, α es el tensor de permeabilidad y v_f es el vector velocidad.

Por otro lado la ley de Forchheimer se basa en la ley de Darcy, y añade otro término más, que describe los efectos inerciales en el medio poroso. La ecuación de Forchheimer es la siguiente:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha} v_f - \beta \rho v_f^2 \quad (4.7)$$

Donde ρ es la densidad de fluido fe trabajo y β es el llamado coeficiente de Forchheimer que generalmente se obtiene de los resultados experimentales.

A partir de esta expresión, según la propuesta de Ergun (1852) el coeficiente β se describe de siguiente forma:

$$\beta = \frac{C_E}{\sqrt{\alpha}} \quad (4.8)$$

Donde C_E se denomina el coeficiente de Ergun, que corresponde a los efectos de fuerzas inerciales y α es el tensor intrínseco de permeabilidad en el medio poroso. De las ecuaciones (4.7) y (4.8) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha} v_f - \frac{C_E}{\sqrt{\alpha}} \rho v_f^2 \quad (4.9)$$

El coeficiente de Ergun es dependiente del tipo de flujo. Si el flujo es de velocidad baja, el coeficiente β es despreciable y la ecuación de caída de presión se convierte en la ecuación de Darcy. En cambio en flujo de alta velocidad aumentan los efectos de fuerzas inerciales y por tanto, la importancia del término β . Sin embargo este coeficiente es válido para flujos laminares de modo que es necesaria su adaptación para caso de flujo de alta velocidad.

Otra ecuación empírica a tener en cuenta es también definida por Ergun, tras numerosos experimentos, llamada ecuación general para factor de rozamiento en medio poroso que se escribe de siguiente forma:

$$C_f = \frac{a_1}{Re} + a_2 \quad (4.10)$$

Donde a_1 es la constante de correlación relacionada con el área de paso de fluido y a_2 es la constante de correlación relacionada con factor de fricción y el número de Reynolds.

Modelado del medio poroso con software CFD Fluent.

En el caso del software para modelar el medio poroso se añade un término adicional en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento.

El nuevo término se compone de dos partes, una corresponde al término de pérdidas viscosas y otro al término de pérdidas inerciales. La ecuación correspondiente es la siguiente:

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu u_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |u| u_j \right) \quad (4.11)$$

Donde S_i es el termino para i (x , y o z) en la ecuación de cantidad de movimiento, $|u|$ es el valor absoluto de la velocidad, y D y C son matrices diagonales con valores de coeficiente de resistencia viscosa y el coeficiente de resistencia inercial. En la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, este término contribuye al cálculo de la caída de presión en el medio poroso

La ecuación adaptada para el caso de un medio homogéneo poroso es la siguiente:

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |u| u_i \right) \quad (4.12)$$

Donde α es la permeabilidad del medio y C_2 es el factor de resistencia inercial.

Modelado de la ecuación de energía para el medio poroso con Fluent

Existen dos enfoques para el cálculo de ecuación de energía: el modelo de equilibrio térmico y el modelo de no-equilibrio térmico. En ambos casos Ansys Fluent resuelve la ecuación

estándar de energía para la ecuación de transporte en medio poroso introduciendo modificaciones solo para la conducción de flujo en términos transitorios.

Ecuación para modelado de equilibrio térmico

Esta ecuación es adecuada para las simulaciones en las que se considera el equilibrio térmico entre el medio poroso y flujo (del fluido). La conducción del flujo en el medio poroso usa la conductividad efectiva y el término transitorio incluye la inercia térmica en la región sólida del medio.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\gamma\rho_f E_f + (1-\gamma)\rho_s E_s) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho_f E_f + p)) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} + \tau_{ij} u_j - \left(\sum_i h_i J_i \right) \right] + S_f^h \end{aligned} \quad (4.13)$$

Donde E_f es la energía total del fluido, E_s es la energía total del medio regenerador, ρ_f es la densidad del fluido, ρ_s es la densidad total del regenerador, γ es la porosidad del medio, k_{eff} es la conductividad efectiva térmica del medio.

En el medio poroso, por defecto, basándose en el flujo volumétrico, el cálculo de la velocidad superficial se realiza mediante a ecuación (4.14).

$$\vec{v}_{superficial} = \gamma \vec{v}_{fisica} \quad (4.14)$$

Donde γ es la porosidad del medio. Esta aproximación mantiene la misma velocidad dentro que fuera del medio poroso. La formulación de velocidad física permite un cálculo preciso de la velocidad en el interior del medio poroso.

Ansys Fluent calcula la efectividad de la conductividad térmica k_{eff} en el medio poroso como el volumen medio entre conductividad del regenerador y del fluido:

$$k_{eff} = \gamma k_f + (1-\gamma)k_s \quad (4.15)$$

Donde k_f es la conductividad térmica del líquido y k_s es la conductividad térmica del regenerador.

Ecuación para modelado de no-equilibrio térmico

Este método de cálculo consiste en que el regenerador y líquido no se consideran en equilibrio térmico, se usa *dual cell approach*, que consiste en generación de una solución primaria y otra auxiliar de la ecuación de energía para el regenerador del medio poroso, y para el fluido de trabajo, por separado. Posteriormente se acoplan ambas soluciones. De este modo se calcula la ecuación de conservación de energía por separado para el fluido y el regenerador coincidentes.

La ecuación para la zona de fluido es la siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\gamma\rho_f E_f) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho_f E_f + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\gamma k_f \frac{\partial T_f}{\partial x_i} + \tau_{ij} u_j - \left(\sum_i h_i J_i \right) \right] + S_f^h \\ + h_{fs} A_{fs} (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Y la ecuación de conservación para la parte solida es:

$$\frac{\partial}{\partial t}((1-\gamma)\rho_s E_s) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((1-\gamma)k_s \frac{\partial T_s}{\partial x_i} \right) + S_s^h - h_{fs} A_{fs} (T_f - T_s) \quad (4.17)$$

Donde E_f es la energía total del fluido, E_s es la energía total del medio regenerador, ρ_f es la densidad del fluido, ρ_s es la densidad del regenerador, γ es la porosidad, k_f es la conductividad térmica de fluido de trabajo, k_s es la conductividad térmica del regenerador, h_{fs} es el coeficiente de transferencia térmica entre el regenerador y líquido, A_{fs} es la área de transferencia de calor (es la relación entre el área de contacto del líquido y sólido creado y el volumen de la zona porosa), T_f es la temperatura del fluido, T_s es la temperatura del regenerador, S_f^h es el término de la entalpia del fluido y S_s^h es el término de la entalpia del regenerador.

4.4.2. Análisis numérico con software Fluent

Para el análisis del problema con la aplicación Fluent del espacio de trabajo de Ansys, primero se crea la aplicación como proyecto y se le adjunta la geometría mallada previamente creada representada en la Figura 4.44.

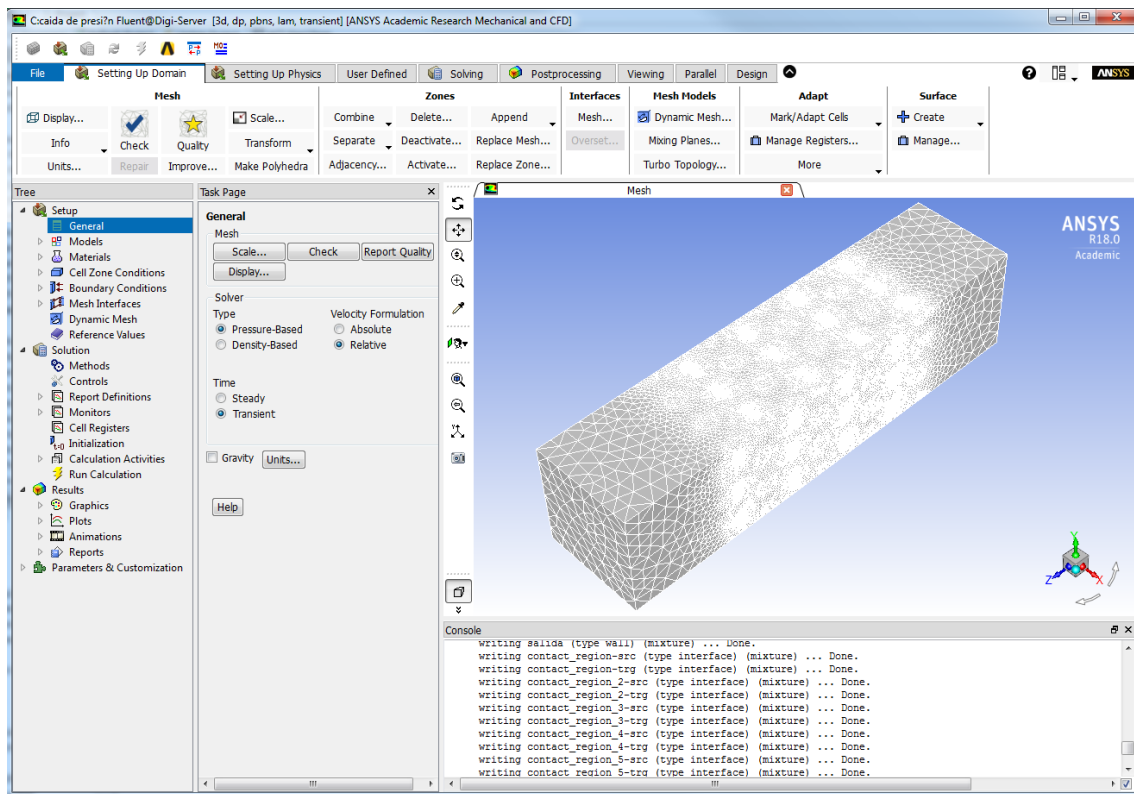


Figura 4.44: Importación de la malla en el programa Fluent

En presente estudio el flujo se caracteriza por ser viscoso, incompresible, 3D, laminar a bajo número de Reynolds, transitorio y por tener las condiciones de contorno adiabáticas.

El método de resolución

Una vez iniciada la aplicación y cargada la malla se selecciona como el método de resolución el *Solver/Pressure-Based*. Este método incluye distintos tipos de algoritmos propios del programa. Esta selección en concreto ofrece una solución robusta y de gran precisión para una amplia gama de problemas a analizar. Es especialmente recomendada en flujos

caracterizados por ser incompresible, como es el caso de presente estudio. En la Figura 4.45 se representa la selección del control del método de resolución, la formulación de velocidad y el tipo de flujo estacionario o transitorio en función del estudio a realizar.

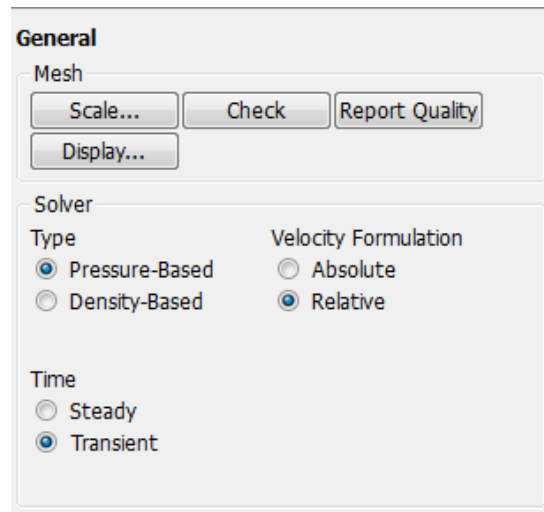


Figura 4.45: Selección del método de resolución

La formulación de velocidad seleccionada es la relativa. La formulación de velocidad absoluta corresponde a un flujo casi estacionario en la mayor parte del volumen estudiado a excepción de un pequeño porcentaje cuya velocidad es distinta de cero mientras que la formulación relativa es apropiada para un análisis donde la mayor parte del dominio esta en movimiento.

Tipo de simulación

Se realizarán dos tipos de simulación, la caída de presión, la cual no necesita de activación del modelo energético, y la simulación de transferencia térmica en la cual se activará el modelo energético. El flujo se considera laminar, como se ha indicado previamente. En la Figura 4.46 se representa la selección de tipo de simulación.

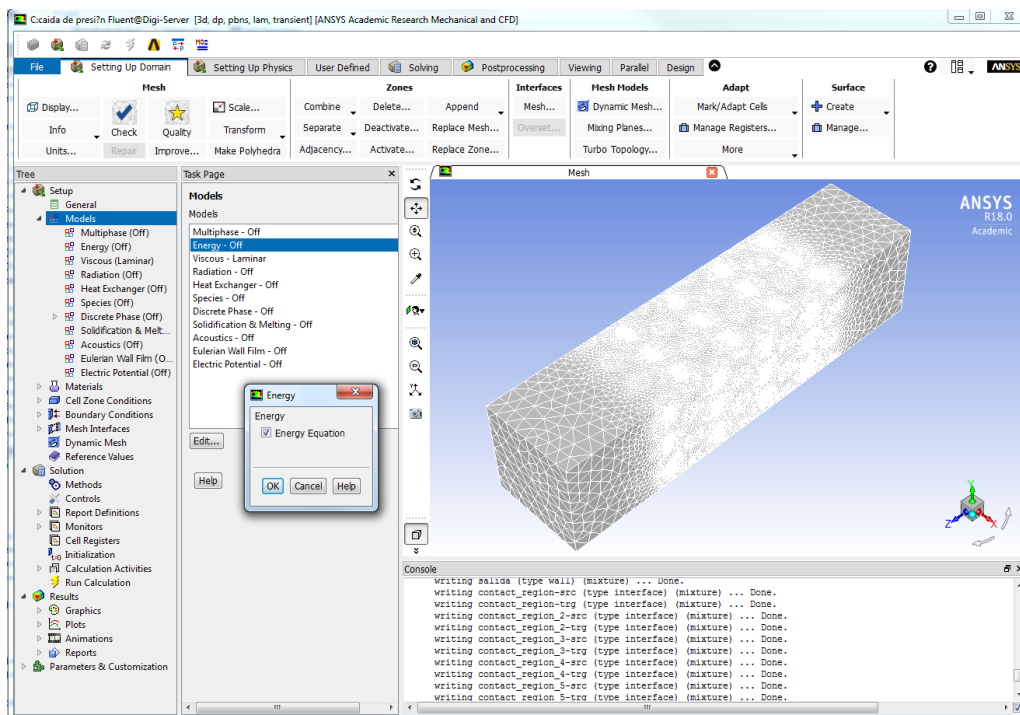


Figura 4.46: Elección de tipo de simulación

Fluido de trabajo

Como fluido de trabajo se ha seleccionado el aire. En el caso de flujo unidireccional en el análisis de los regeneradores de porosidad uniforme y porosidad variable, las propiedades del fluido de trabajo se consideran constantes ya que el tamaño de regeneradores a estudiar es poco representativo para tener en consideración variación de dichas propiedades.

En el estudio de transferencia térmica en el flujo oscilatorio, la simulación se realiza a una longitud total del regenerador. Este caso las propiedades de fluido de trabajo se consideran variables con la temperatura. Para ello se utiliza la opción *polynomial* en la cual se define un polinomio cuyo mayor grado posible es 8. La ecuación de polinomio se define según la ecuación (4.18)

$$\rho(T) = A_1 + A_2T + A_3T^2 + \dots \quad (4.18)$$

Los coeficientes del polinomio son previamente calculados con [35] para una amplia gama de temperaturas y posteriormente correlacionados con el software Matlab para obtención del polinomio. La misma operación se ha repetido para la densidad, color específico, viscosidad y conductividad térmica. La asignación de valores del polinomio se representa en la Figura 4.47.

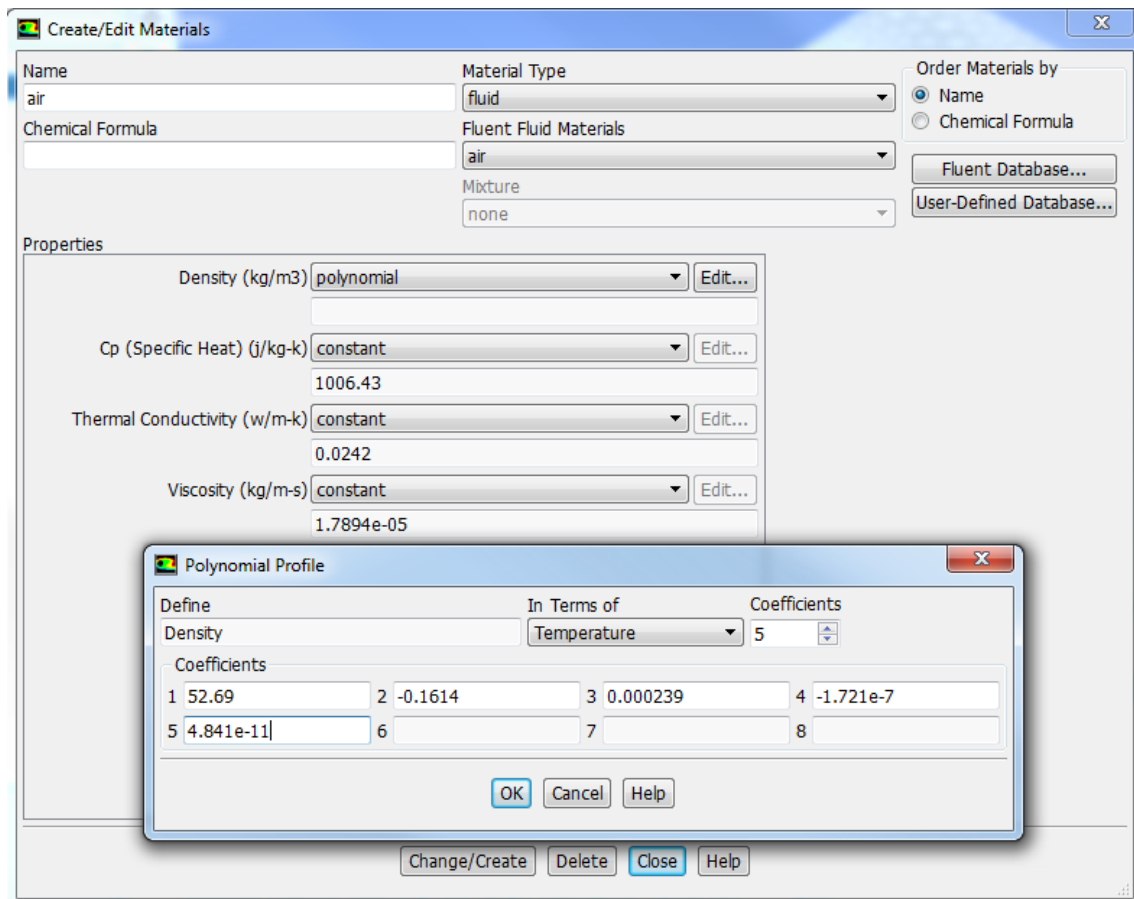


Figura 4.47: Creación de propiedades en función de la temperatura

Material

El material seleccionado para los filamentos es acero, ampliamente utilizado en la construcción de las mallas [27]. En la Figura 4.48 se representa la elección del material entre una amplia gamma ofrecida por el programa, que contiene las características necesarias para su uso en cualquier tipo de simulación. La Figura 4.49 representa la asignación de un

material determinado a una zona nombrada previamente. El programa ofrece la posibilidad de trabajar con numerosos materiales en diferentes zonas, por lo que la asignación de los mismos es tan importante.

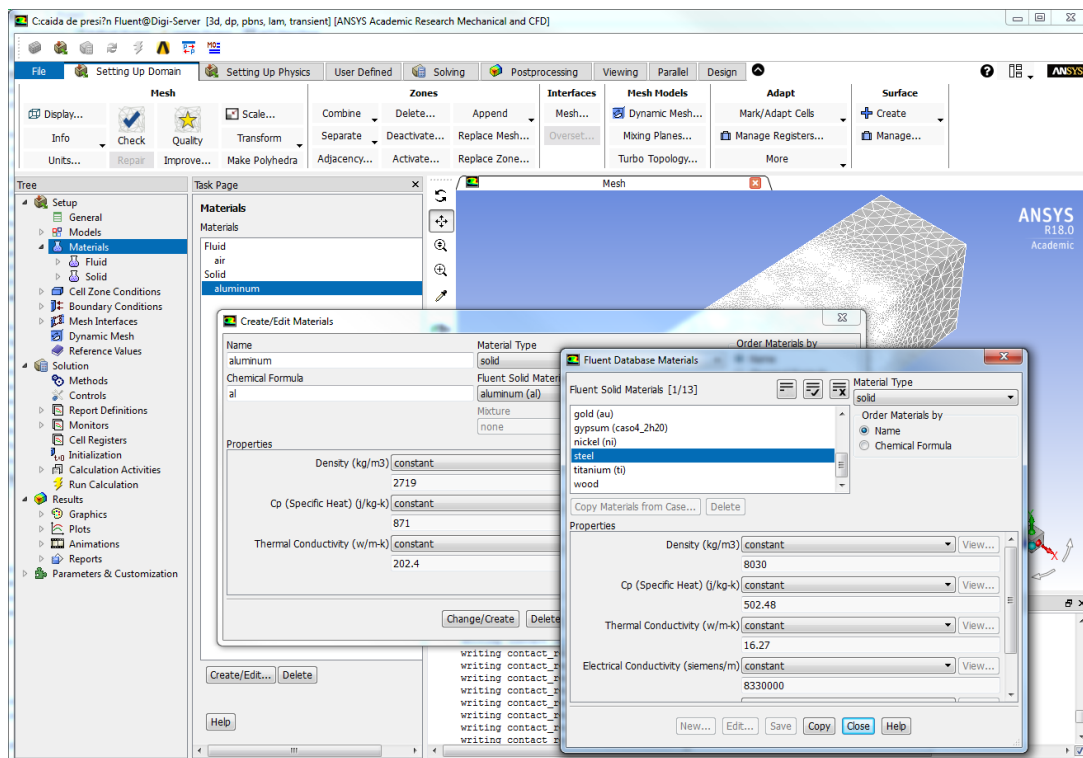


Figura 4.48: Selección de material para el regenerador

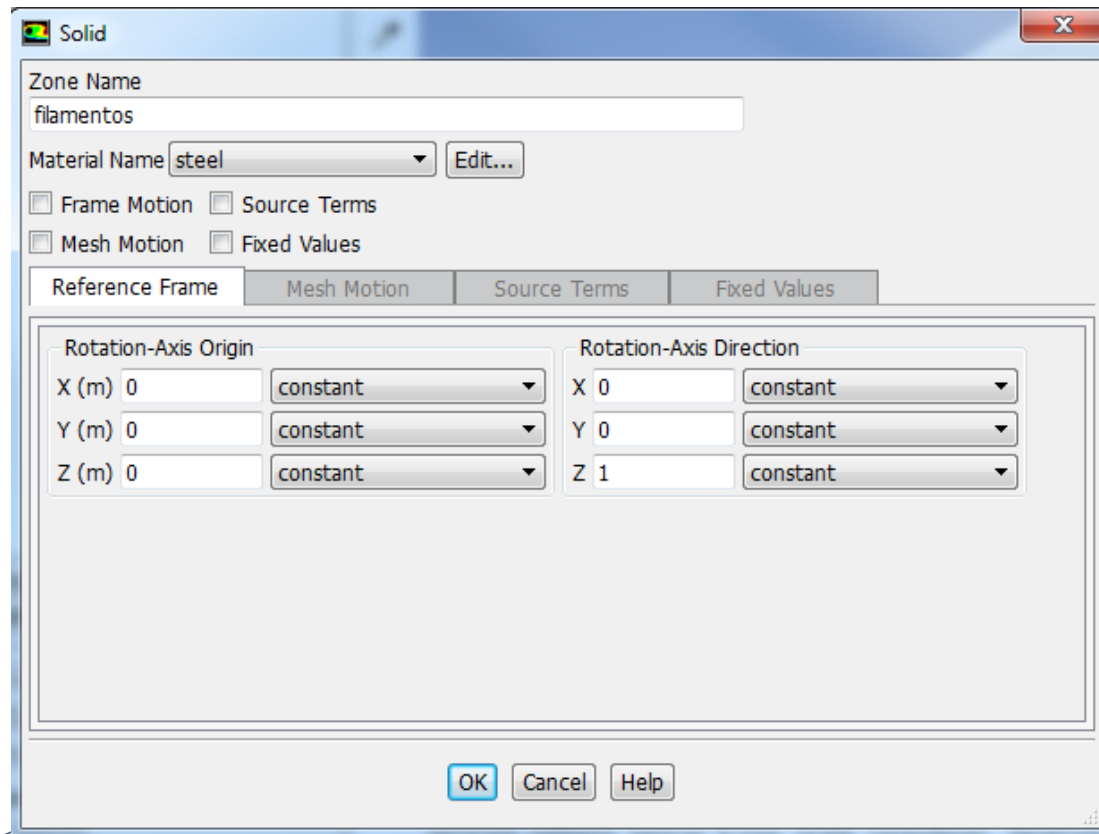


Figura 4.49: Selección de material para los filamentos

Condiciones de contorno

Entrada: Temperatura constante. Velocidad constante para flujo unidireccional en un análisis del regenerador 3D, y velocidad en forma senoidal para un análisis de flujo pulsante, la cual se crea mediante una función UDF (*User Define Function*).

Para ello se crea una función utilizando lenguaje de programación C++ y los comandos propios del Fluent. La zona llamada entrada se compone de nodos que a su vez forman superficies. Todos ellos forman parte de un mismo identificador de zonas llamado *Thread*, gracias al previo nombramiento de la misma en el apartado del mallado 4.3. La declaración de perfil de condiciones de contorno se realiza con una *macro* (función propia de Fluent) de tipo *DEFINE_PROFILE*. La misma se aplica a todos los elementos pertenecientes al identificador de zona nombrado y seleccionado para su aplicación. Dentro de la *macro* *DEFINE_PROFILE* se utiliza bucle que recorre todas las superficies del identificador en cada paso de tiempo, y se aplica la característica deseada a todas ellas utilizando la función *F_PROFILE*. Esta función solo se aplica a las superficies siendo ésta su principal característica.

En la Figura 4.50 se representa el código para creación de velocidad en forma de onda senoidal.

```
#include "udf.h"
#include "metric.h"
#include "mem.h"

DEFINE_PROFILE(vs,t,i)
{
    face_t f;
    real ti=CURRENT_TIME;
    begin_f_loop(f,t)
    {
        F_PROFILE(f,t,i)=U*sin(f*M_PI*ti);
    }
    end_f_loop(f,t)
}
```

Figura 4.50: Código para la creación de velocidad senoidal

Es necesaria la previa declaración de variable *face_t f* para definición de las superficies pertenecientes al identificador propio de la zona nombrada, y la declaración de variable de tipo real *ti*. A esta variable se le atribuye el valor de instante de tiempo en el que se realiza el cálculo. Para ello se utiliza la función *CURRENT_TIME*, propia del programa. En este código la amplitud de la onda se determina mediante la variable *U* y donde *f* representa la frecuencia de giro del motor. En la Figura 4.51 se representa la asignación de las condiciones de contorno.

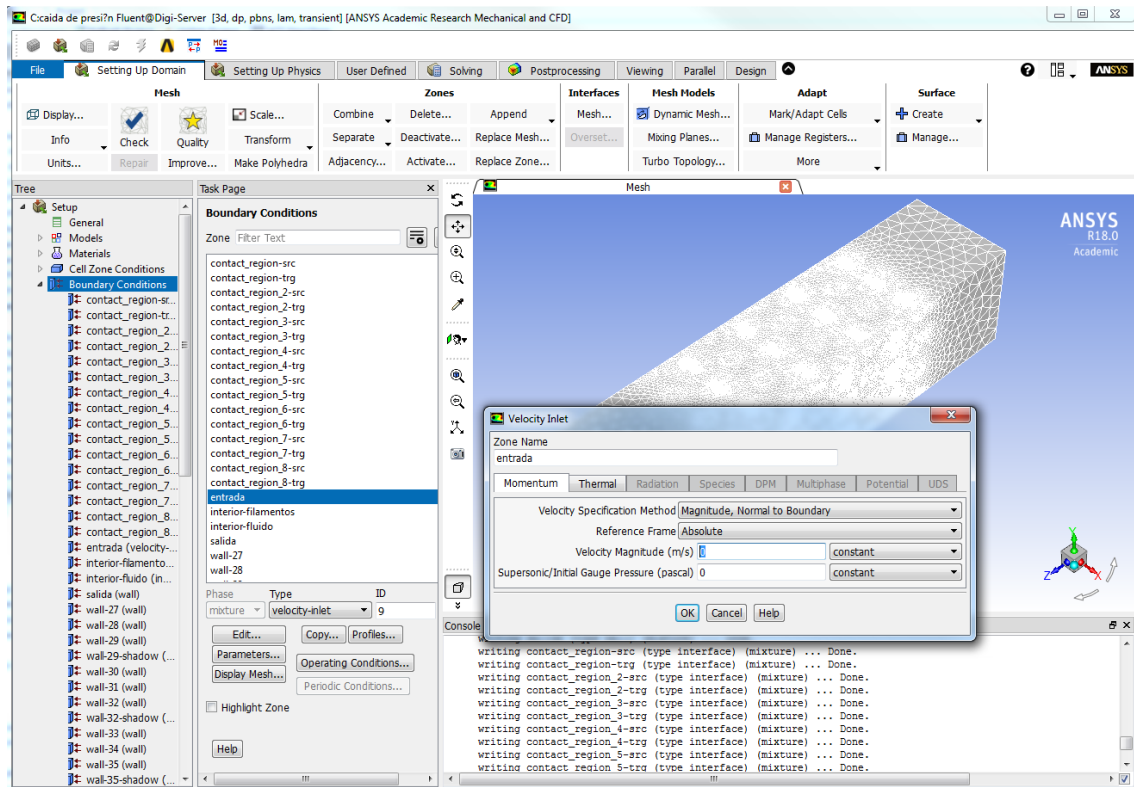


Figura 4.51: Definición de condiciones de contorno

Salida: Presión y temperatura constante para los casos de flujo unidireccional y flujo oscilatorio.

Para el caso de un análisis de transferencia térmica, cabe destacar que una de las características de software utilizado es que, por defecto, en el caso de estudio de un flujo a una temperatura determinada, rodeando la superficie de un regenerador a otra temperatura determinada, la transferencia de calor se produce en una sola dirección, variando la temperatura de fluido y manteniendo constante la temperatura de la superficie del regenerador.

Presente estudio analiza la influencia de un regenerador de porosidad variable en un motor Stirling, para ello es necesario un análisis de temperatura de la malla y de fluido, además de otros factores. Para simular el flujo de calor en ambas direcciones, desde el fluido al regenerador y en dirección contraria, es necesario el acoplamiento térmico entre ambas zonas. Debido a la declaración de las partes del sistema a estudiar en el apartado 4.3, como Filamentos y Fluido, en la superficie entre ambos se crean regiones de contacto duplicadas.

Para un mismo regenerador se crea superficie de contacto *source* y *target*. Ambas situadas en el mismo punto, pero una de ellas perteneciente al fluido y otra al regenerador. Para la existencia de flujo de calor en ambas direcciones entre estas superficies, es necesario crear un acoplamiento térmico disponible en la opción de *Mesh Interfaces*. Para ello se elimina el acoplamiento previo que no incluye una transferencia térmica y se crea una nueva región de contacto incluyendo la opción *Coupled Wall*, véase la Figura 4.52.

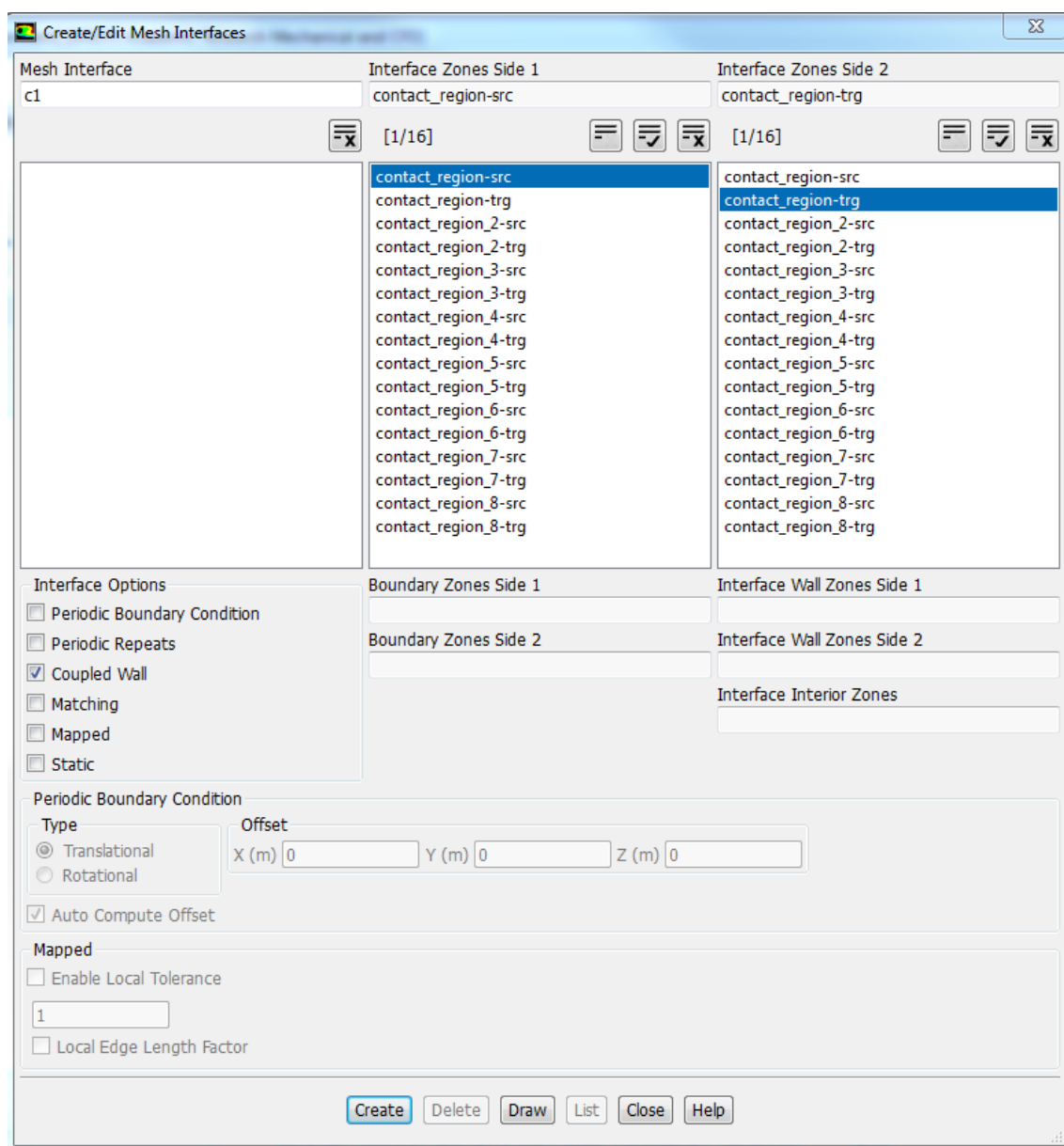


Figura 4.52: Acoplamiento térmico de regiones de contacto

Se selecciona el método de inicialización el *Hybrid Initialization Method*. Este método es la colección de métodos de interpolación de contornos, donde se calculan e imponen como condición inicial tales variables como la temperatura, fracción volumétrica, fracción de especies, a partir de valores promedios del dominio. La otra opción permitida es el cálculo de los mismos a partir de los valores predeterminados por el usuario. La Figura 4.53 muestra la selección del método de inicialización.

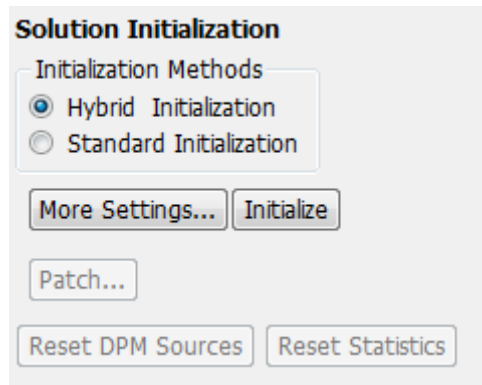


Figura 4.53: Método de inicialización

La opción *More Settings* incluye una serie de ajustes adicionales representados en la Figura 4.54. Antes de iniciar una simulación, es necesario establecer valores iniciales en velocidad y presión, realizando para ello diez iteraciones utilizando la ecuación de Laplace. Sin embargo, para alcanzar el valor de tolerancia de convergencia de $1 \cdot 10^{-6}$, diez iteraciones pueden ser insuficientes en sistemas de geometrías complejas y curvas que es el caso de presente estudio.

El método de relajación utilizado en análisis numérico permite alcanzar la convergencia del mismo, significativamente más rápido. El factor explícito del método de sub-relajación (*Explicit Under-Relaxation Factor*), cuyo valor es $0 < w < 1$, se utiliza durante la resolución de ecuaciones de Laplace en la inicialización de valores de velocidad y presión.

El caso de análisis de geometría complicada de presente estudio, requiere un aumento de número de iteraciones a un valor de treinta, y disminución de factor de sub-relajación al 0.5.

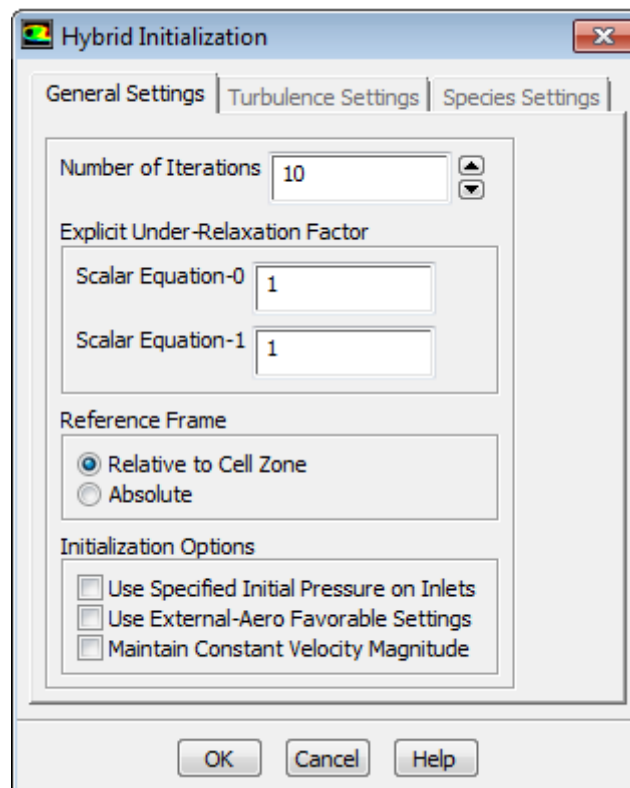


Figura 4.54: Ajustes de método de inicialización

En los controles de tiempo de simulación, se ajusta el paso de tiempo en función del muestreo de valores deseados par el flujo unidireccional, y en función del periodo de la onda

senoidal para el flujo pulsante. Se mantiene el valor de 20 iteraciones para cada paso de tiempo, representado en la Figura 4.55.

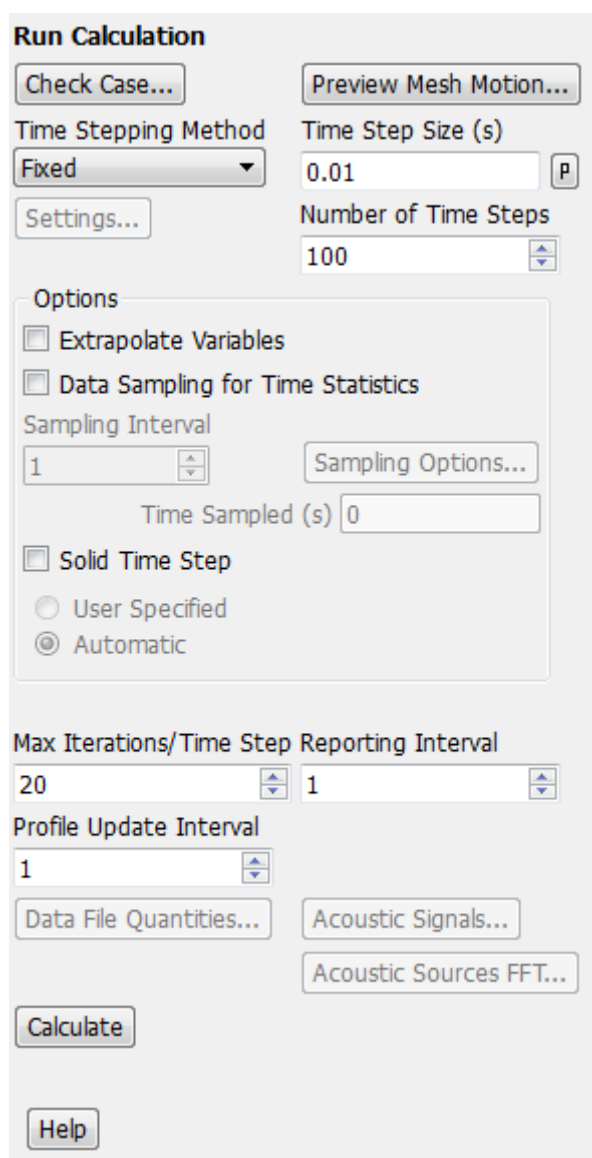


Figura 4.55: Características temporales de simulación

Una vez realizada la simulación el siguiente paso es el análisis de los resultados.

4.5. Análisis de los resultados

Esta aplicación, incluida en el espacio del trabajo de Ansys, se encarga de analizar los resultados previamente calculados en el programa Fluent, creando gráficas, tablas, contornos y representaciones de todas las propiedades de fluido. La Figura 4.56 representa la creación de un plano YZ, en el cual se muestra la presión en la zona previamente determinada como fluido, utilizando un mapa de colores. Y la Figura 4.57 representa el campo vectorial de la velocidad en el interior de la zona previamente determinada como fluido.

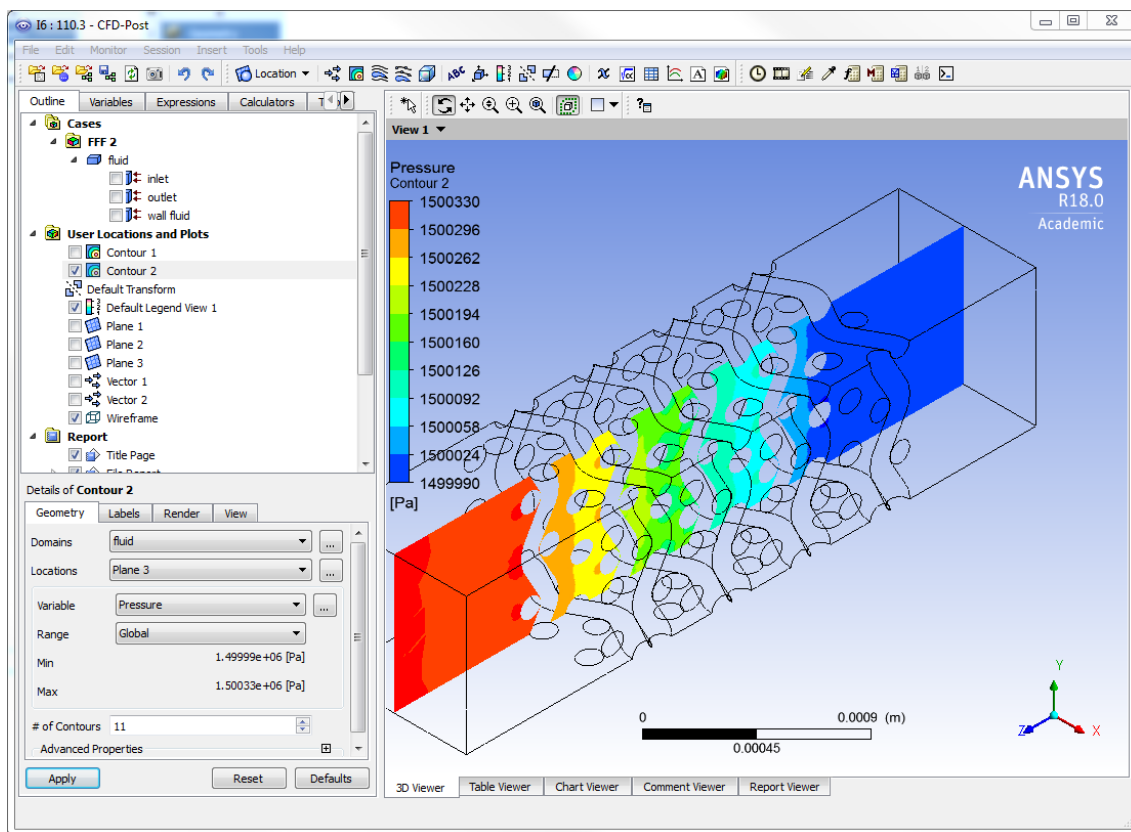


Figura 4.56: Observación de la presión en un plano medio

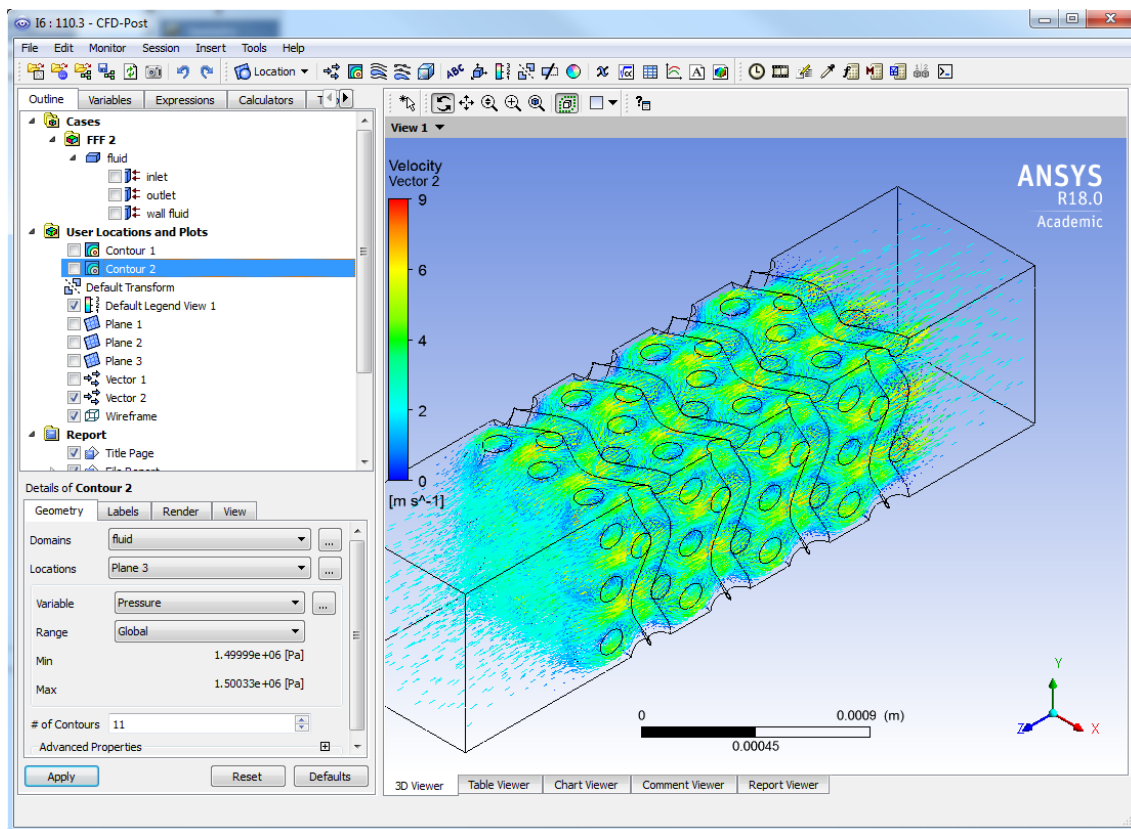


Figura 4.57: Observación del campo vectorial de velocidad

Capítulo 5

Resultados

5.1. Introducción

Un regenerador de porosidad uniforme, dadas las características de su construcción tales como una malla tejida uniformemente, y un acoplamiento uniforme de sus capas, se puede caracterizar como un medio homogéneo. Este tipo de caracterización permite el uso de la herramienta incluida en el software Fluent, llamada *Porous Medium*. Para el análisis de un regenerador de porosidad variable, se necesita la caracterización como medio poroso, de cada una de las porosidades a analizar, por separado.

Para la caracterización del medio poroso en el caso de presente estudio, se necesitan tres características: el coeficiente de fricción, la porosidad del medio y el coeficiente de transferencia térmica. Para ello es necesaria la realización de tres estudios diferentes. El primero es la caracterización de la caída de presión, el segundo es la caracterización de la transferencia térmica y el tercero es la propia caracterización del medio poroso.

Además de la caracterización del regenerador como medio poroso, en este capítulo se analizan las diferencias entre el regenerador de porosidad uniforme y un regenerador de porosidad variable.

5.2. Caída de presión

5.2.1. Introducción

Como ha sido demostrado anteriormente, el regenerador es la parte crucial del motor Stirling. Por tanto, es importante identificar las características que influyen en la eficiencia y el óptimo punto de trabajo del motor. De cara a las futuras previsiones de su uso en numerosos campos y aplicaciones, la identificación de dichos factores y su mejora tendría un gran impacto en la potencia obtenida del motor, aumento de su rendimiento y fomento del uso de las energías más eficientes.

Este apartado se centrará como primer paso, en el estudio de la caracterización de caída de presión de un regenerador de porosidad uniforme en 3D y posteriormente de un regenerador de porosidad variable, también en 3D. El objetivo es observar la existencia de diferencia en la caída de presión en los regeneradores. Posteriormente se procederá al cálculo de coeficiente de fricción que se basa en correlaciones empíricas y se compararán con estudios anteriormente realizados.

5.2.2. Principios computacionales

En este cálculo, el flujo se caracteriza por ser viscoso, incompresible, 3D, laminar a bajo número de Reynolds. También se caracteriza por ser flujo isotérmico y estacionario con condiciones de contorno adiabáticas.

5.2.3. Validación del modelo

En el presente estudio, se realizará el cálculo de caída de presión y determinación del coeficiente de fricción de la malla. Los estudios de Tanaka et al. [33], se basaron en experimentos con flujo oscilante a través de las mallas porosas para determinar su fórmula empírica. Los estudios de Gedeon y Wood et al. [2], se centraron en obtención de la correlación del factor de fricción, número de Nusselt y otros parámetros influyentes en la malla, el estudio de Costa et al. [1], se centraron entre otros en comprobación del coeficiente de fricción en las mallas de distintas porosidades y configuraciones. Dichos estudios se usarán para la validación de presente modelo en un regenerador de porosidad uniforme.

El modelado de factor de fricción se basa en la ecuación de dos parámetros de Ergun (4.8), a partir de la cual, experimentando con flujos a distintas velocidades, se ha desarrollado la ecuación (4.10.) utilizando tres parámetros, que tiene un ajuste más preciso que la de dos.

$$C_f = \frac{a_1}{Re} + a_2 Re^{a_3} \quad (5.1)$$

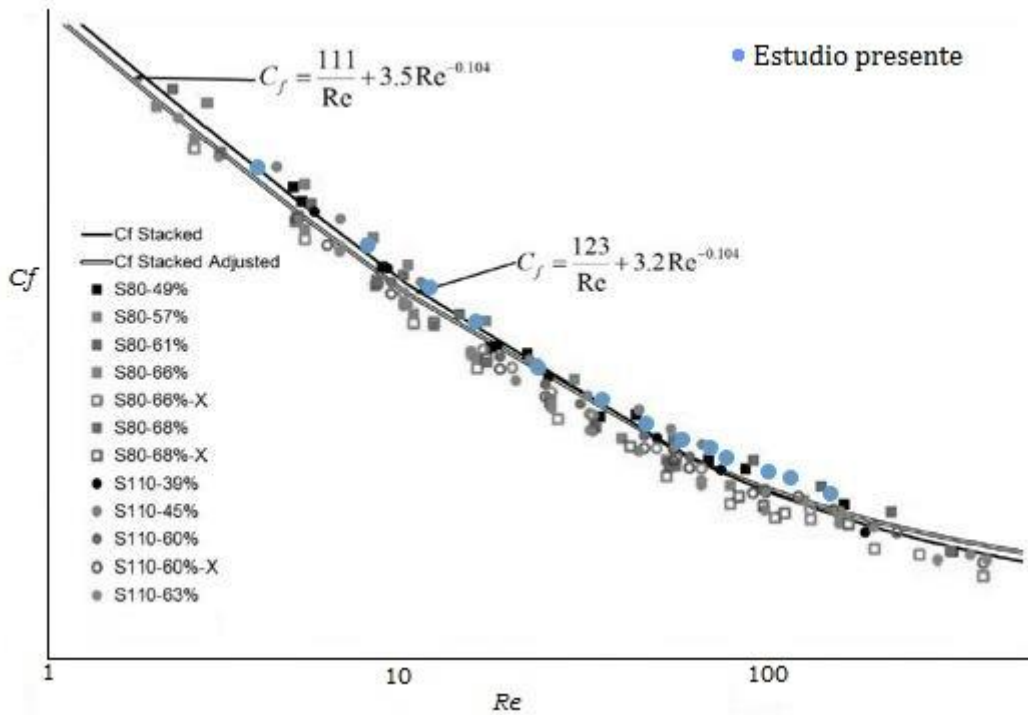
En esta ecuación el primer y segundo término se corresponde con efectos viscosos e inerciales, el número de Reynolds se calcula según la ecuación (3.8), utilizando para ello el diámetro hidráulico, con lo cual la caída de presión en función de coeficiente de fricción se define según la ecuación (5.2).

$$\Delta p = C_f \frac{L_r \rho (u_{max})^2}{d_h} \quad (5.2)$$

Donde C_f es el factor de fricción, L_r es la longitud del regenerador, ρ es la densidad del fluido de trabajo, u_{max} es la velocidad máxima a través del regenerador y d_h es el diámetro hidráulico de la malla a analizar.

Para la obtención de la correlación del coeficiente de fricción solo de un tipo de malla con una porosidad uniforme determinada, se han realizado numerosas simulaciones de flujo unidireccional, transitorio, a diferentes velocidades, obteniendo con ello una caída de presión para cada velocidad. Cabe destacar la necesidad de repetición del mismo proceso para la obtención del coeficiente de fricción en cada uno de los regeneradores de porosidad diferente que se desean estudiar.

Utilizando las velocidades aplicadas en las simulaciones, y operando con las ecuaciones (3.7) y (3.8), se define el número de Reynolds para cada velocidad. A continuación, operando con la caída de presión obtenida en cada simulación, y la ecuación (5.2), se obtiene el coeficiente de fricción. De esta forma, representado en la Gráfica 5.1, se obtiene la correlación del coeficiente de fricción, en función del número de Reynolds, de un tipo de malla de porosidad determinada.



Gráfica 5.1: Validación del coeficiente de fricción

Como se puede observar en la Gráfica 5.1, la correlación del coeficiente de fricción sigue una línea de tendencia logarítmica. El ajuste del coeficiente de fricción del estudio presente, coincide con su correlación de estudio anterior de Costa et al. [1]. La correlación es ajustable con la ecuación (5.1), cuyos coeficientes se determinan ajustando los puntos obtenidos a una ecuación exponencial, obteniendo la ecuación (5.3).

$$C_f = \frac{111}{Re} + 3.5Re^{-0.104} \quad (5.3)$$

Debido a un buen ajuste del coeficiente de fricción calculado en el presente estudio de un regenerador de porosidad uniforme, con el estudio de Costa et al. [1], se da por válido el modelado, y se prosigue con la comparación de un regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable.

5.2.4. Resultados

Para la comparación de un regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable, previamente se crean modelos de los mismos según los apartados 4.2.1 y 4.2.2. Las condiciones de contorno son: velocidad constante de 2 (m/s) a la entrada y presión constante de 15 00000 (Pa) a la salida. El fluido se considera incompresible y sus propiedades constantes. No se considera la influencia de la temperatura en el presente análisis.

En la Figura 5.1 se representa el resultado de la simulación de la caída de presión de un elemento infinitesimal del regenerador de porosidad uniforme. Sus caras laterales se caracterizan por tener las condiciones de contorno simétricas. En el centro del mismo se encuentran los filamentos que forman la malla, a través de los cuales pasa el fluido desde la cámara de expansión a la cámara de compresión. Se pueden observar dos volúmenes añadidos en ambos extremos del regenerador, donde no se presenta un cambio en los valores de presión. Dichos volúmenes se añaden para una mayor similitud con el regenerador real, y para un desarrollo de las líneas de corriente del fluido.

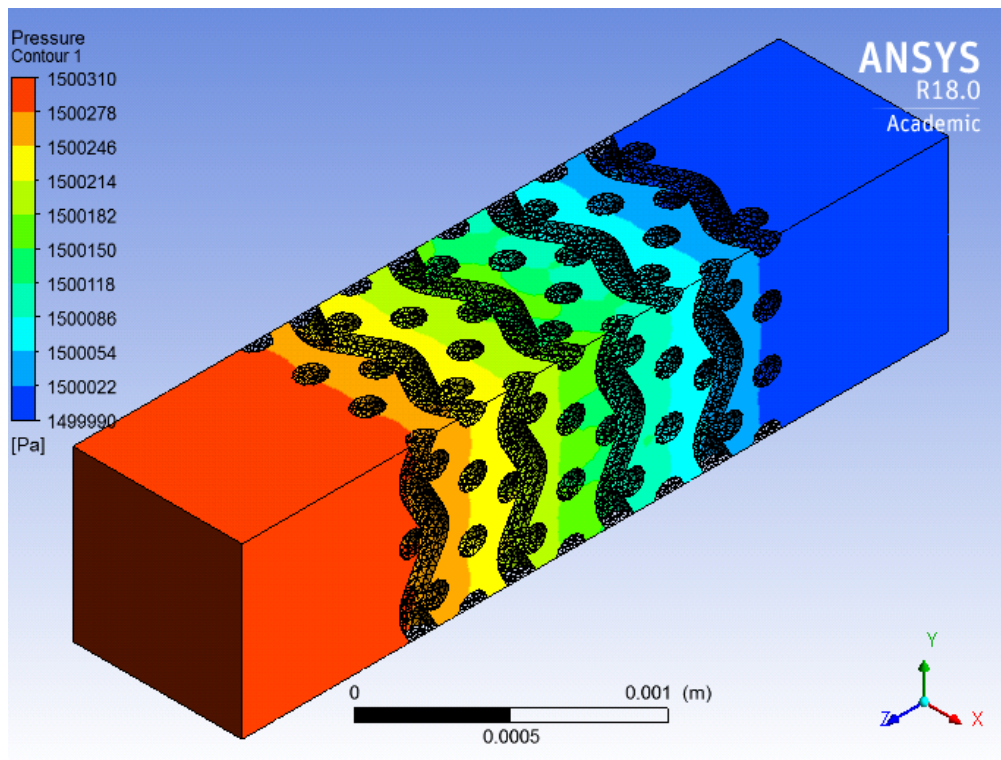


Figura 5.1: Caída de presión del regenerador de porosidad uniforme

La Figura 5.2 y Figura 5.3 representa la caída de presión en el regenerador de porosidad uniforme en visión lateral y en detalle. Se observa que la caída de presión se origina debido a la presencia de los filamentos de la malla, variando a medida que se desplaza en la posición en el interior del sólido

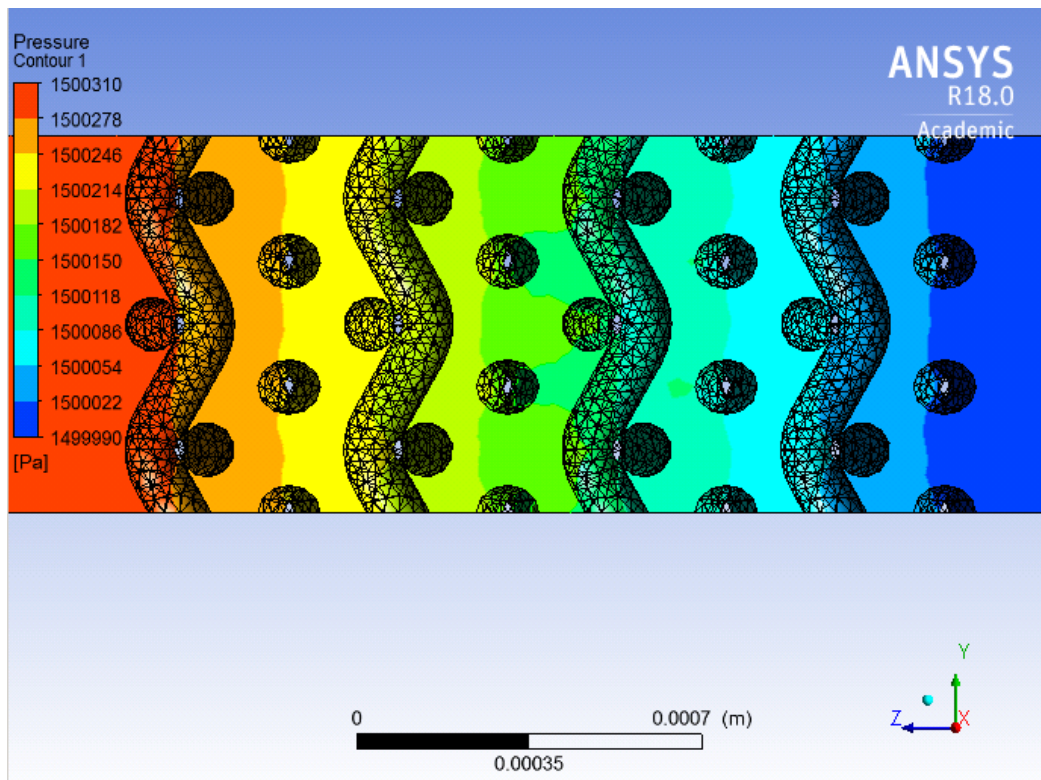


Figura 5.2: Detalle de la caída de presión en el regenerador de porosidad uniforme visión lateral

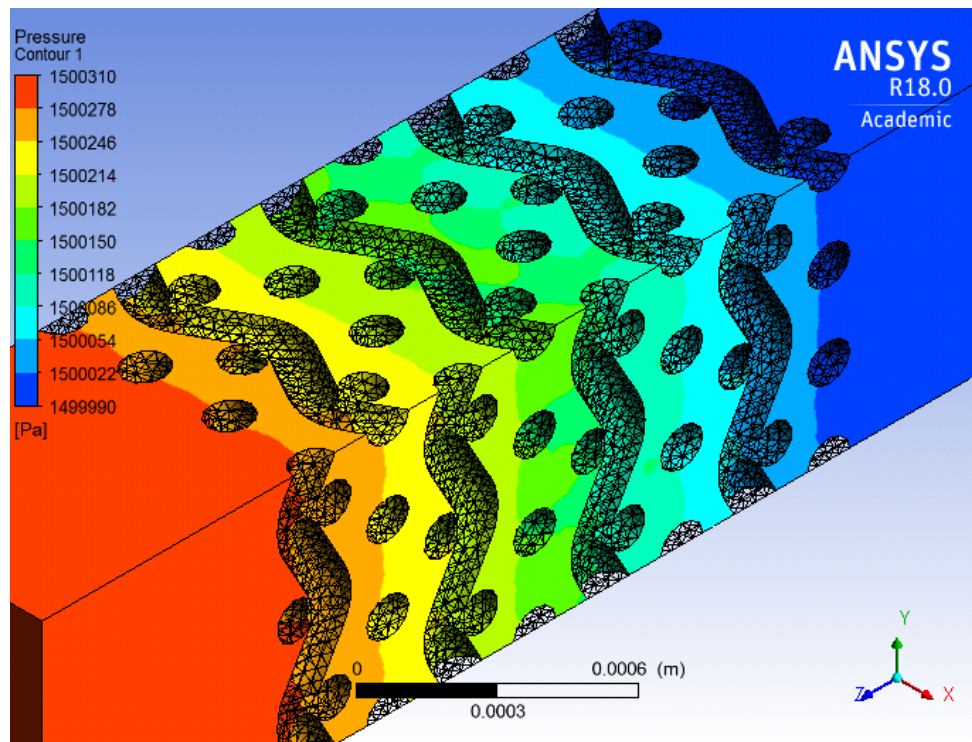


Figura 5.3: Detalle de la caída de presión en el regenerador de porosidad uniforme vista isométrica

En la Figura 5.4 se representa la caída de presión del regenerador de porosidad variable. De la misma forma que en el sólido de porosidad uniforme, no se observan cambios de presión en los volúmenes añadidos en los extremos del regenerador.

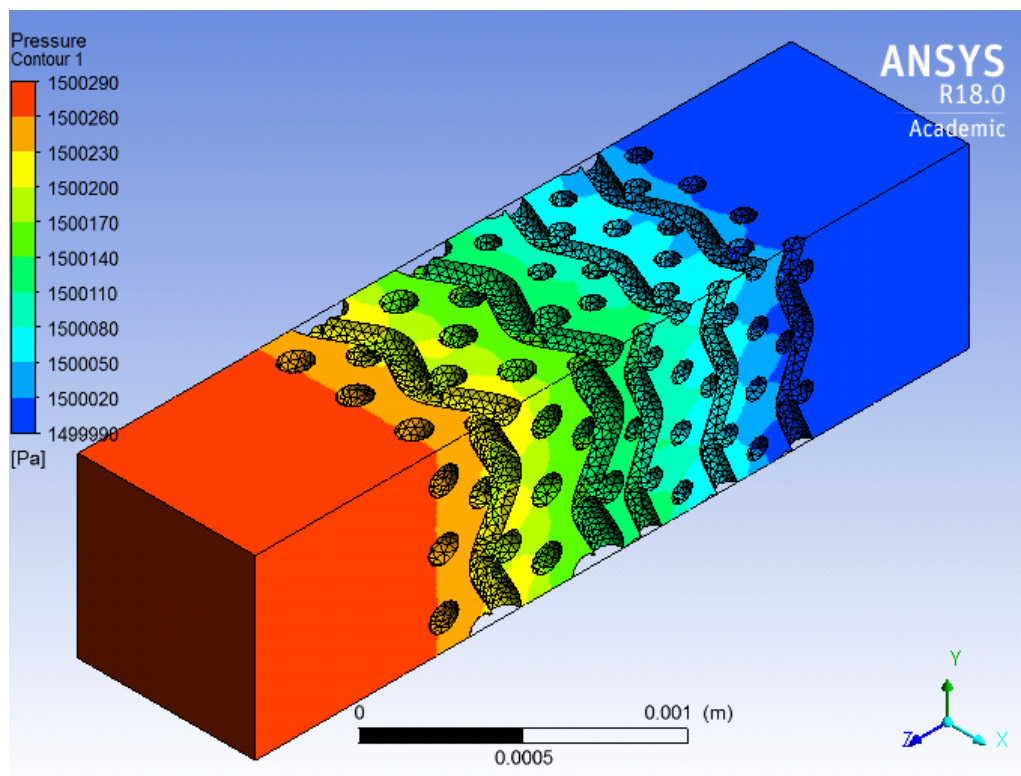


Figura 5.4: Caída de presión en el regenerador de porosidad variable $\Pi_v = 0.63$ y $\Pi_v = 0.69$

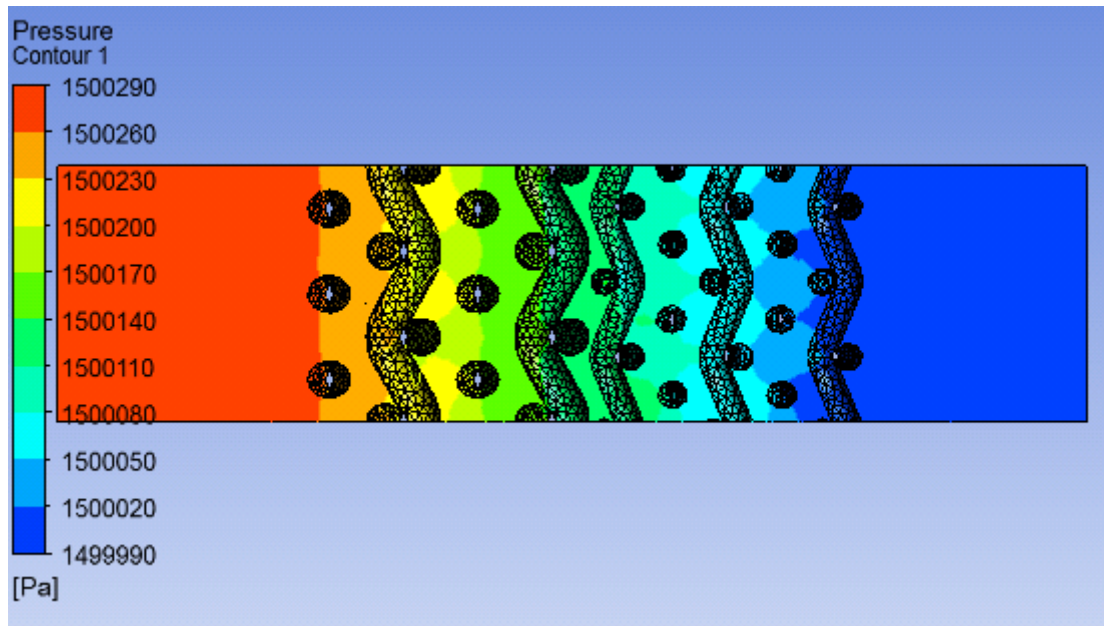


Figura 5.5: Detalle de la caída de presión en el regenerador de porosidad variable $\Pi_v = 0.63$ y $\Pi_v = 0.69$ visión lateral

En la Figura 5.5, 5.6 y 5.6, se representa en detalle la presión en el fluido. En este regenerador, cuya primera porosidad es menor que la segunda, se puede observar una distribución de presiones de un valor menor que en el regenerador de porosidad uniforme. Esto se debe al cambio en el diámetro de los filamentos de la malla, manteniendo la separación entre ellos, aumentando de esta forma, el tamaño de los huecos.

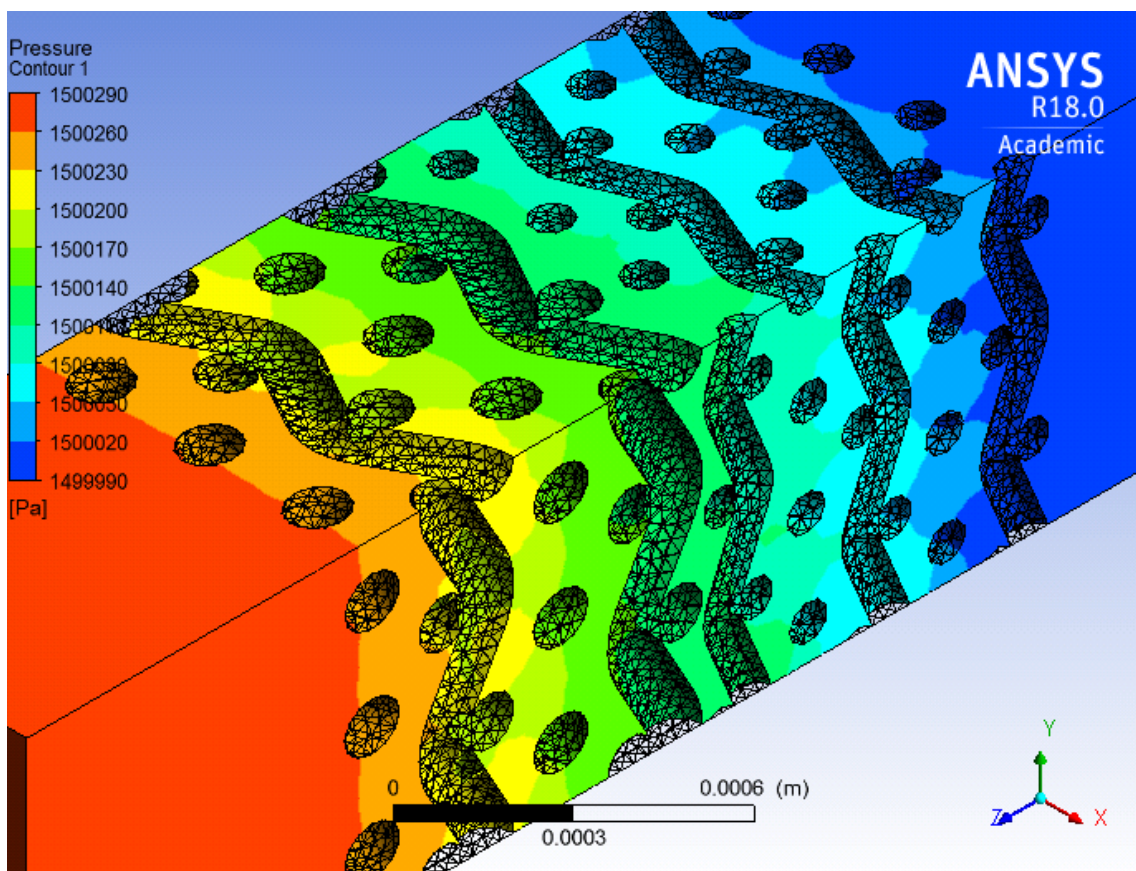


Figura 5.6: Detalle de la caída de presión en el regenerador de porosidad variable $\Pi_v = 0.63$ y $\Pi_v = 0.69$ vista isométrica

La caída de presión en el regenerador de porosidad variable es menor que el regenerador de porosidad uniforme, en cuyo caso se ha aumentado el valor de la porosidad. El valor de presión en la entrada, definido en color rojo, es diferente para ambos regeneradores, debido a la aplicación de contorno una velocidad constante. Mientras que a la salida, definida en color azul, la presión para ambos regeneradores es constante, ya que es la condición de contorno impuesta.

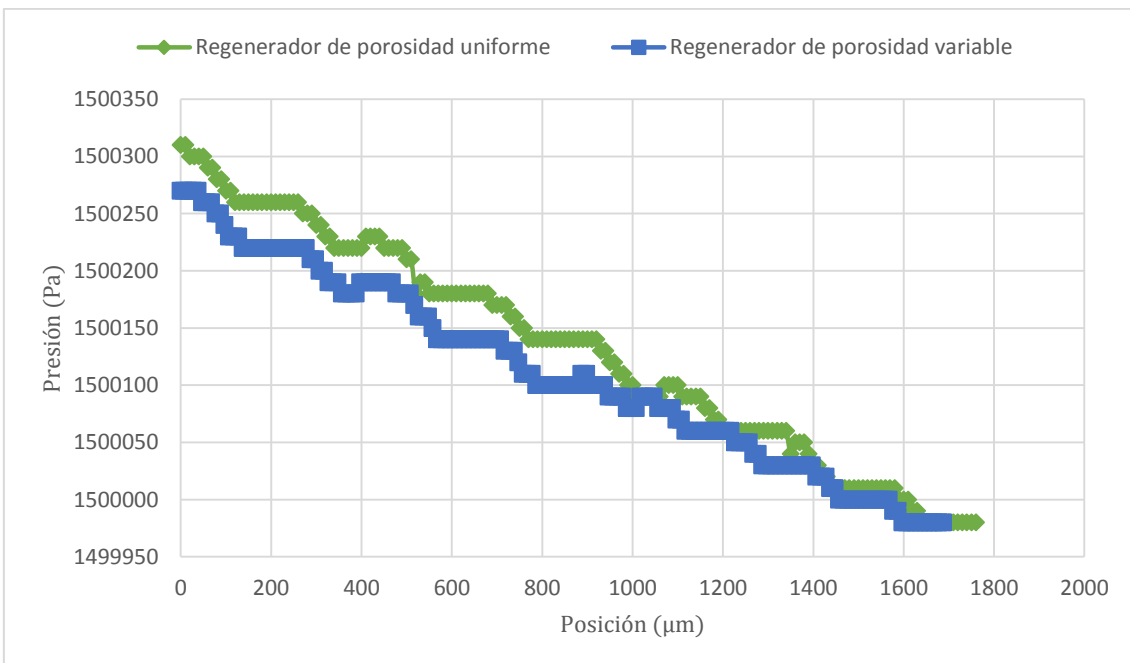
Los resultados del cálculo numérico de presión y velocidad, se reflejan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Resultado caída de presión

	Solido porosidad uniforme	Solido porosidad variable	
	Porosidad 63%	Porosidad 63%	Porosidad 68%
Caída de Presión (Pa)	310	170	120
Velocidad Media ($\frac{m}{s}$)	3.67737	3.67463	3.13722
Velocidad Maxima ($\frac{m}{s}$)	4.91032	4.98093	3.9558

Con el cambio de porosidad de 63% a 69%, el regenerador de porosidad variable presenta una caída de presión 20 Pa menor que el regenerador de porosidad uniforme. Y el valor de velocidad media del fluido, en el regenerador de porosidad variable, es 19% menor que en el regenerador de porosidad uniforme.

La Grafica 5.2 se representa la presión del fluido, en función de la posición en el interior del regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable.



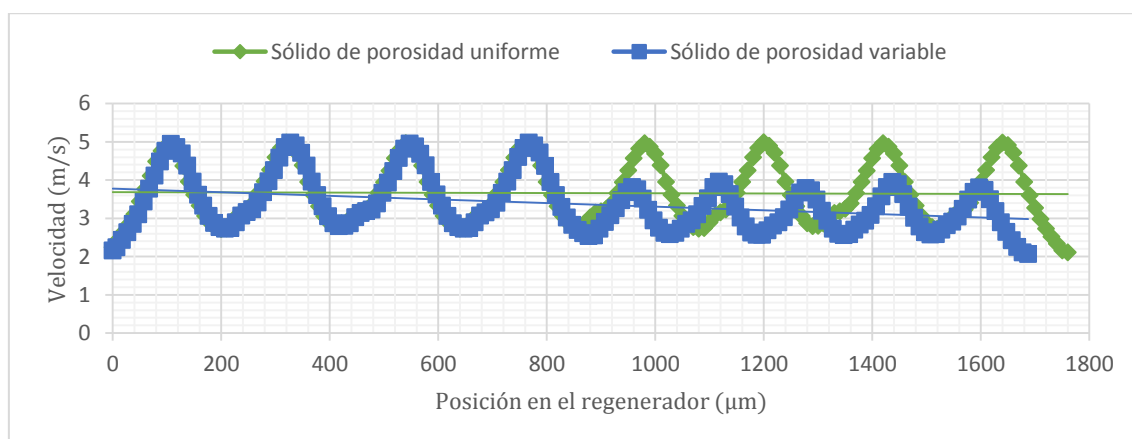
Grafica 5.2: Caída de presión en el regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable

La caída de presión es mayor en el regenerador de porosidad uniforme, que en el regenerador de porosidad variable. La diferencia entre presiones se presenta en la entrada del regenerador, donde se ha impuesto como condición de entrada la velocidad constante.

La presión del regenerador de porosidad uniforme y variable coincide en la salida, ya que se ha impuesto la condición de contorno de salida, la presión constante.

En la Grafica 5.3 representan las velocidades medias de fluidos, en función de la posición en el interior de los regeneradores de porosidad uniforme y variable.

En la entrada de ambos regeneradores, el valor de velocidad coincide, ya que su condición de contorno es la velocidad constante. A medida que se avanza en la posición en el interior de los regeneradores, la velocidad varía disminuyendo en el regenerador de porosidad variable, y se mantiene constante en el regenerador de porosidad uniforme. Esto se debe al aumento de los huecos en el interior del regenerador de porosidad variable, y por tanto el aumento del área de paso. Se puede observar una forma de onda que corresponde a velocidades en distintos puntos, nos con más huecos, por tanto, mayor área de paso y menor velocidad, y otros con huecos de un tamaño menor, área de paso menor y por tanto, mayor velocidad del fluido. Las líneas rectas representan una tendencia de la velocidad media de fluido en ambos regeneradores. El valor medio de velocidad del fluido, en el regenerador de porosidad uniforme, se sitúa alrededor de 3.6 m/s , mientras que en el regenerador de porosidad variable la velocidad media disminuye a un valor de 3.4 m/s .



Gráfica 5.3: Velocidad media en regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable

La mayor diferencia se observa en el valor de la velocidad máxima de cada regenerador, que alcanza valores de 4.9 m/s en el regenerador de porosidad uniforme y 3.8 m/s en el regenerador de porosidad variable, en la franja de mayor porosidad.

En la Figura 5.7 y Figura 5.8 se representa el campo de vectores en el regenerador de porosidad uniforme y en el regenerador de porosidad variable. En los volúmenes añadidos en los laterales de los regeneradores, se pueden observar vectores velocidad y el aumento de su tamaño a medida que se acercan a la zona de los filamentos de las mallas. De esta forma se consigue un correcto desarrollo de la corriente del fluido. Según en mapa de colores, situado en el lateral, el fluido del regenerador de porosidad uniforme, alcanza unos valores mayores de velocidad, que el fluido del regenerador de porosidad variable.

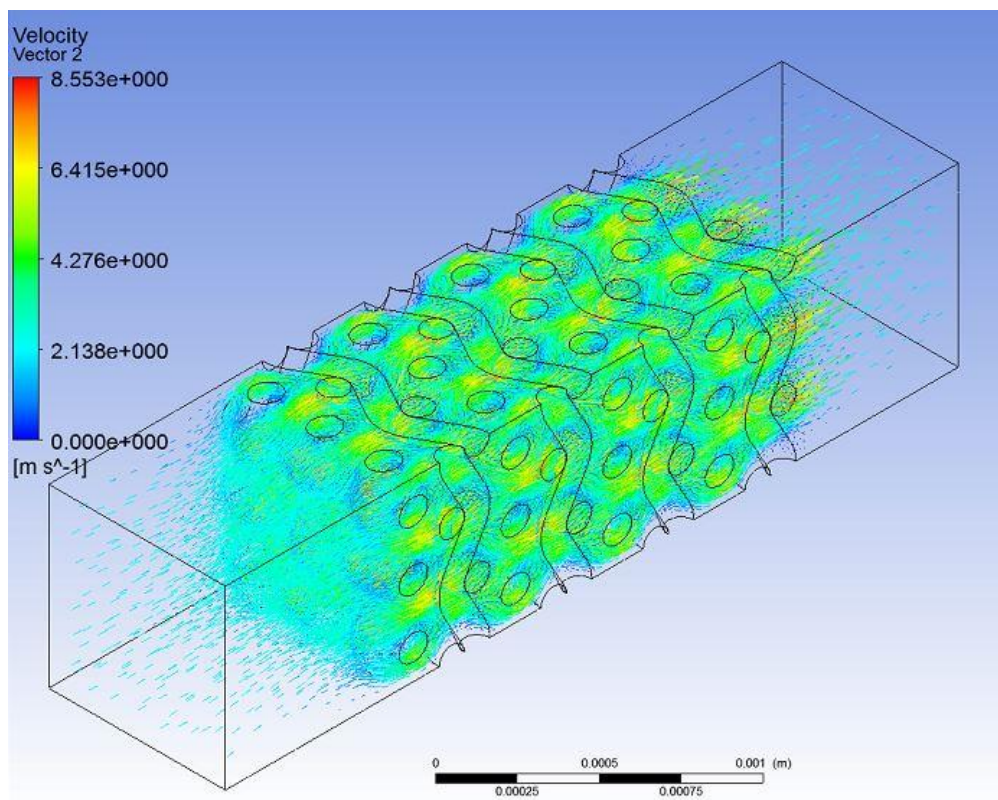


Figura 5.7: Campo vectorial de velocidad en el regenerador de porosidad uniforme

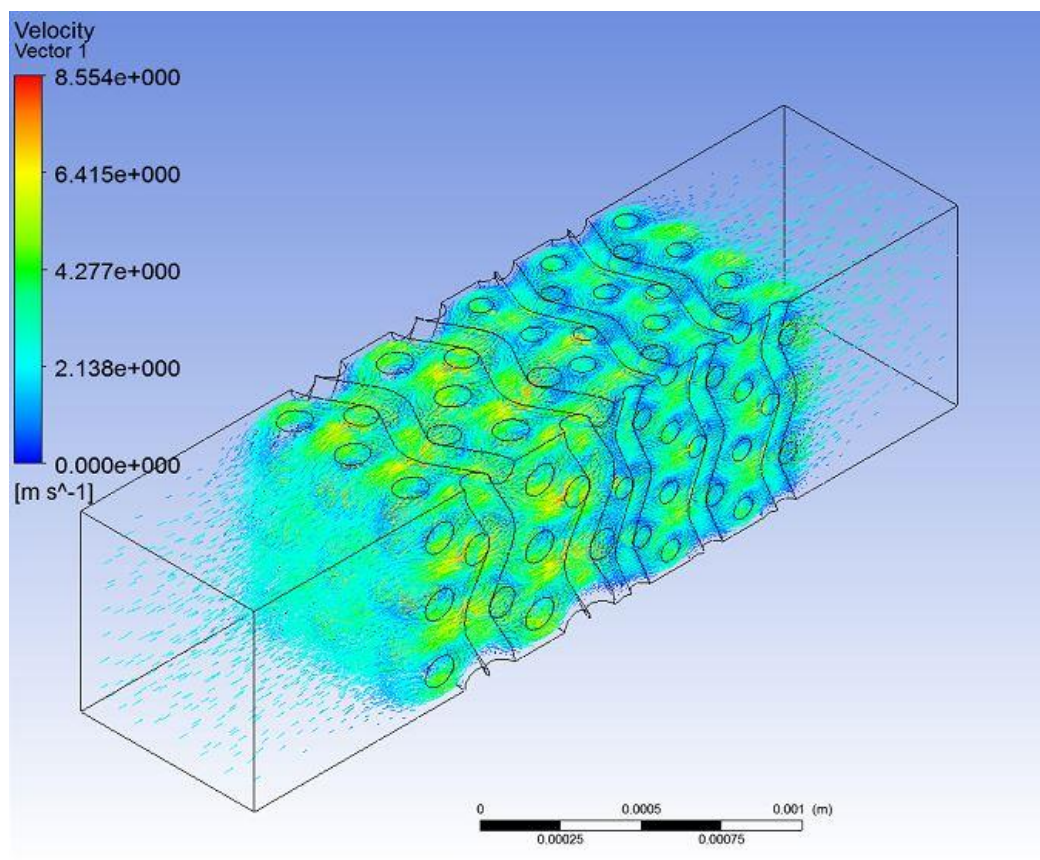


Figura 5.8: Campo vectorial de velocidades en el regenerador de porosidad variable

En la Figura 5.9 y Figura 5.10 se pueden observar el campo de vectores de velocidad en la sección central de ambos regeneradores. El regenerador de porosidad uniforme presenta una mayor velocidad, y en el regenerador de porosidad variable, se observa una disminución de los vectores velocidad a partir de la variación de la porosidad, donde disminuye el tamaño de los filamentos.

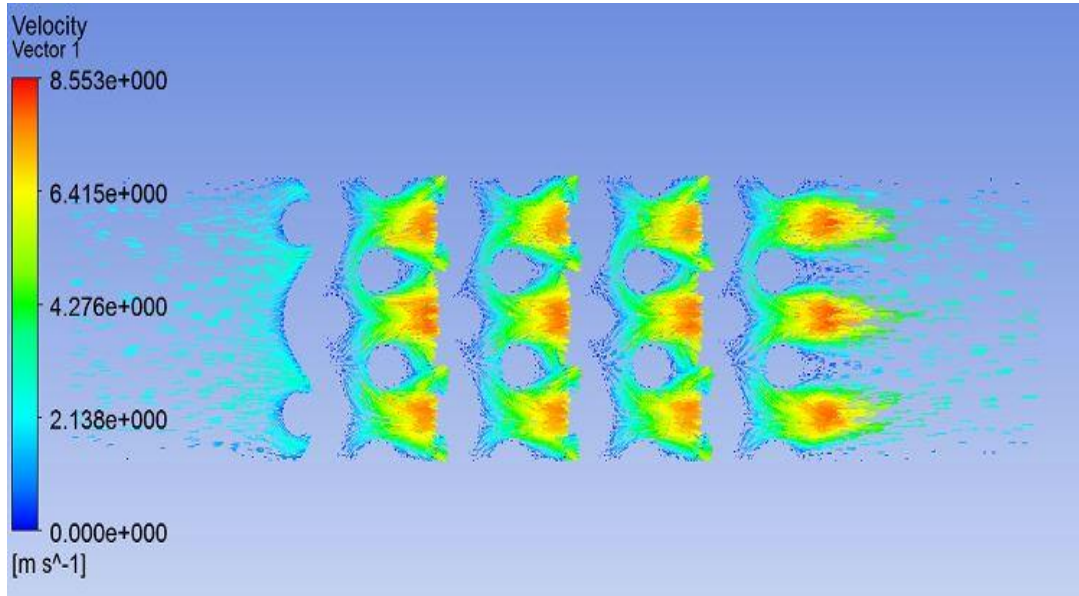


Figura 5.9: Campo de velocidades regenerador porosidad uniforme

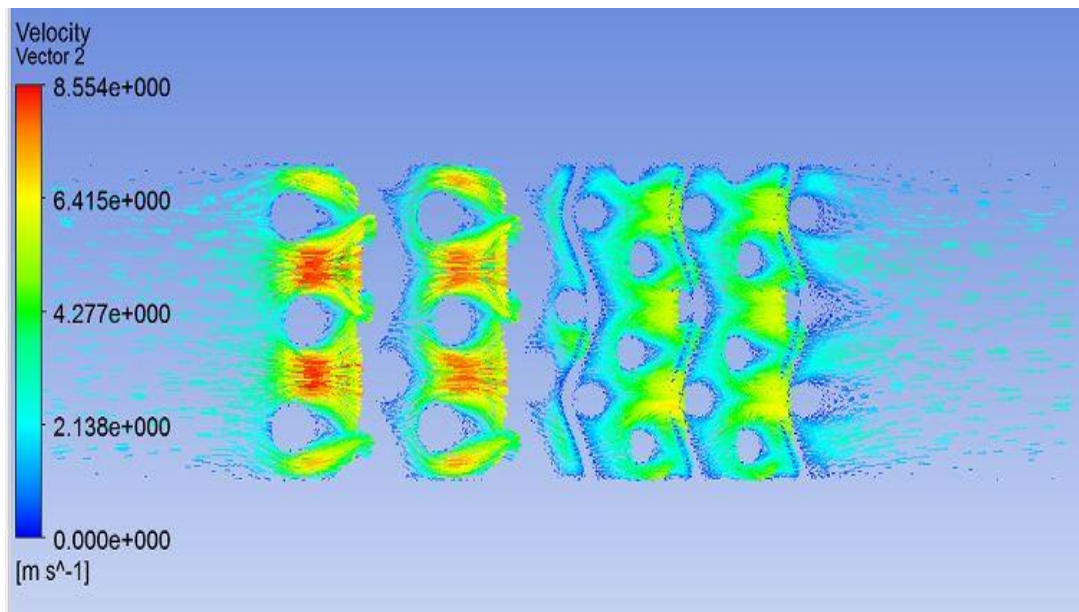


Figura 5.10: Campo de velocidades regenerador porosidad variable

Al aumentar la porosidad se ha disminuido la velocidad en el interior y por tanto, la caída de presión. Tras el cálculo del coeficiente de fricción, se ha determinado que el mismo, se puede correlar mediante la ecuación (4.2) de dos parámetros, y para un mejor ajuste, con la ecuación (5.3) de tres parámetros. También se ha observado la similitud de coeficientes de fricción de mallas de diferentes porosidades y diferentes acoplamientos entre capas, pero todas del tipo de mallas tejidas con filamentos, en forma rectangular. Por lo que, la ecuación del coeficiente de fricción (5.3), se puede considerar la misma, para las mallas de tipo *Stacked Wire Screen*.

5.3. Transferencia térmica

5.3.1. Introducción

El siguiente paso para la caracterización del regenerador del motor Stirling, como un medio poroso, es la determinación del coeficiente de transferencia térmica. De este modo, al estudio anterior de caída de presión, se añade el análisis de la transferencia térmica, activando para ello, la ecuación de la energía en la simulación.

5.3.2. Principios computacionales

Las ecuaciones empleadas para este cálculo están descritas en el apartado 4.4.1. Cabe destacar que se sigue manteniendo la hipótesis de flujo laminar e incompresible. Se mantienen constantes las características como densidad, conductividad, viscosidad y calor específico.

5.3.3. Validación del modelo

La validación de modelado de transferencia térmica en el regenerador se realizará comparando el presente estudio con los resultados de los estudios de Tanaka et al. [33], Gedeon y Wood et al. [2] y Costa et al. [1]. Dichos trabajos realizaron experimentos de flujos oscilatorios a través de una malla metálica, lo que permitió definir la correlación para el número de Nusselt en función del número de Reynolds. El cálculo se realiza usando el diámetro hidráulico de la malla, definido según la ecuación (3.4)

La correlación de número de Nusselt se determina en función de número de Reynolds y tres parámetros. Dichos parámetros se obtienen de forma experimental y la correlación se describe con la ecuación (5.4)

$$Nu = c_1 + c_2 Re^{c_3} \quad (5.4)$$

Para la validación del modelo de transferencia térmica, primero se calcula el coeficiente de transferencia térmica según la ecuación (5.5)

$$h = \frac{\dot{m} C_p \Delta T_g}{A_{wr} \Delta T_m} \quad (5.5)$$

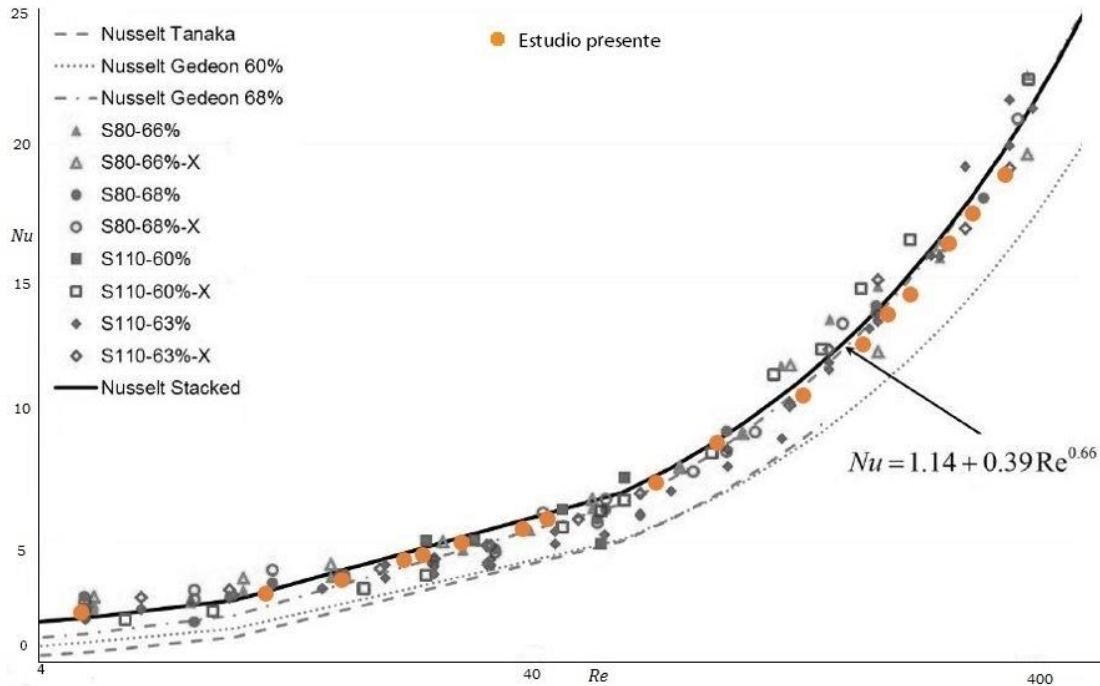
donde \dot{m} es el flujo másico de gas, C_p es calor específico a presión constante, ΔT_g es la diferencia de temperatura del fluido de trabajo entre los planos de entrada y salida del modelo, A_{wr} es el área de transferencia del regenerador y ΔT_m es la diferencia de temperatura media logarítmica entre la superficie del regenerador y el fluido de trabajo.

Posteriormente se determina el número de Nusselt según la ecuación (5.6)

$$Nu = \frac{h d_h}{k_g} \quad (5.6)$$

Para ello, se realizan numerosas simulaciones de un sólido de porosidad determinada. Como condición de entrada, se impone la velocidad y temperatura constantes. La condición en la salida, es presión y temperatura constante. Como condición inicial, se impone una temperatura en los filamentos y en el fluido, igual a la temperatura de salida. Para calcular el coeficiente de transferencia térmica, en una malla de porosidad determinada, se realizan numerosas simulaciones a distintas velocidades constantes de entrada. Tras obtener el resultado, se calcula el coeficiente de transferencia térmica de cada simulación. Operando

con los datos obtenidos, las ecuaciones (5.5) y (5.6), se obtiene el número de Nusselt característico de cada simulación. Operando con las propiedades de fluido de trabajo, características para la temperatura de entrada a la que se ha realizado la simulación, y con la ecuación (3.8), se obtiene el número de Reynolds para cada una de las velocidades utilizadas en la simulación. De esta forma se hace posible una correlación del número de Nusselt, en función de número de Reynolds, para un regenerador de porosidad determinada. La Gráfica 5.4 representa el cálculo de número de Nusselt en estudios anteriores y el cálculo de número de Nusselt del estudio presente.



Gráfica 5.4: Validación del número de Nusselt

Cabe destacar la tendencia logarítmica del número de Nusselt en función de número de Reynolds. Se observa una correlación similar para varios tipos de mallas, de distinta porosidad y configuración de capas consecutivas, que se describe con la ecuación (5.4), cuyos coeficientes se determinan ajustando los datos obtenidos a una ecuación de tipo exponencial, obteniendo la ecuación (5.7)

$$Nu = 1.14 + 0.39Re^{0.66} \tag{5.8}$$

5.3.4. Resultados

Tras la determinación de la correlación del número de Nusselt, se realiza un estudio de transferencia térmica y caída de presión, y se comparan los resultados del regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable.

En la Figura 5.11 y Figura 5.12 se representa la temperatura de los filamentos del regenerador de porosidad uniforme y el regenerador de porosidad variable, en el instante de tiempo $t = 0.27$ (s). Las superficies laterales de los regeneradores se caracterizan por tener impuesta la condición de simetría. Esto implica que no existe una transferencia de calor a través de los mismos, al igual que en presión y velocidad. El mayor valor de temperatura de los filamentos, corresponde con la entrada del regenerador, donde se ha impuesto la temperatura de entrada. La temperatura de los mismos disminuye a medida en que se avanza en la posición en el regenerador. En este determinado instante de tiempo, se observa como los filamentos del regenerador de porosidad variable, han alcanzado una

temperatura mayor que los filamentos del regenerador de porosidad uniforme. Esto se debe a un menor diámetro de los mismos y por tanto una menor inercia térmica. De esta forma, se observa que la malla de un regenerador de porosidad variable, mediante la disminución de diámetro de sus filamentos, se calienta antes que una malla del regenerador de porosidad uniforme.

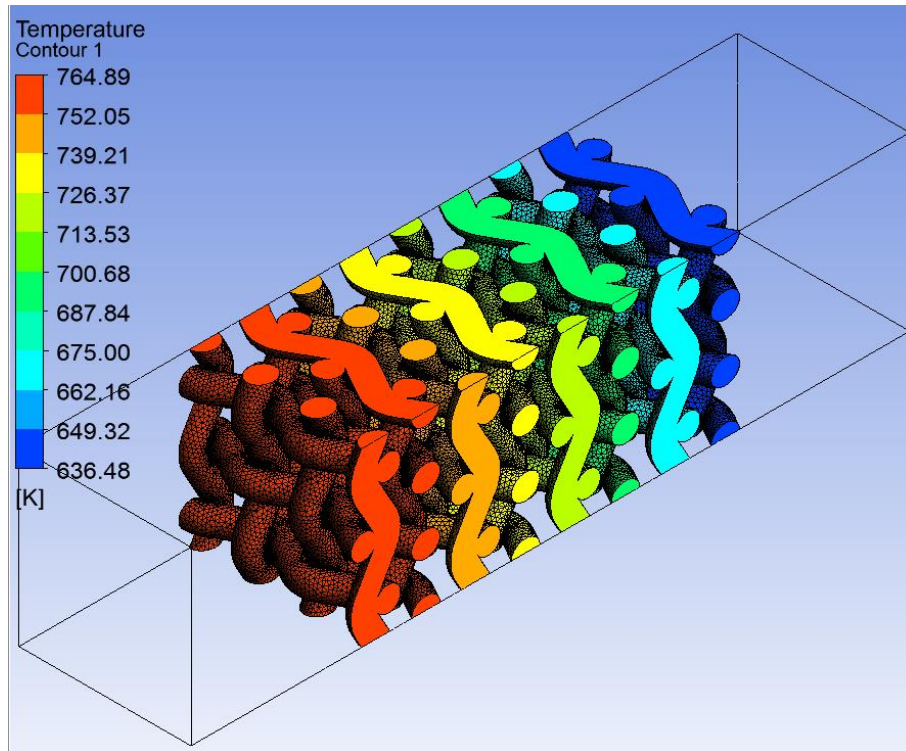


Figura 5.11: Gradiente de temperatura en regenerador de porosidad uniforme en $t=0.27(s)$

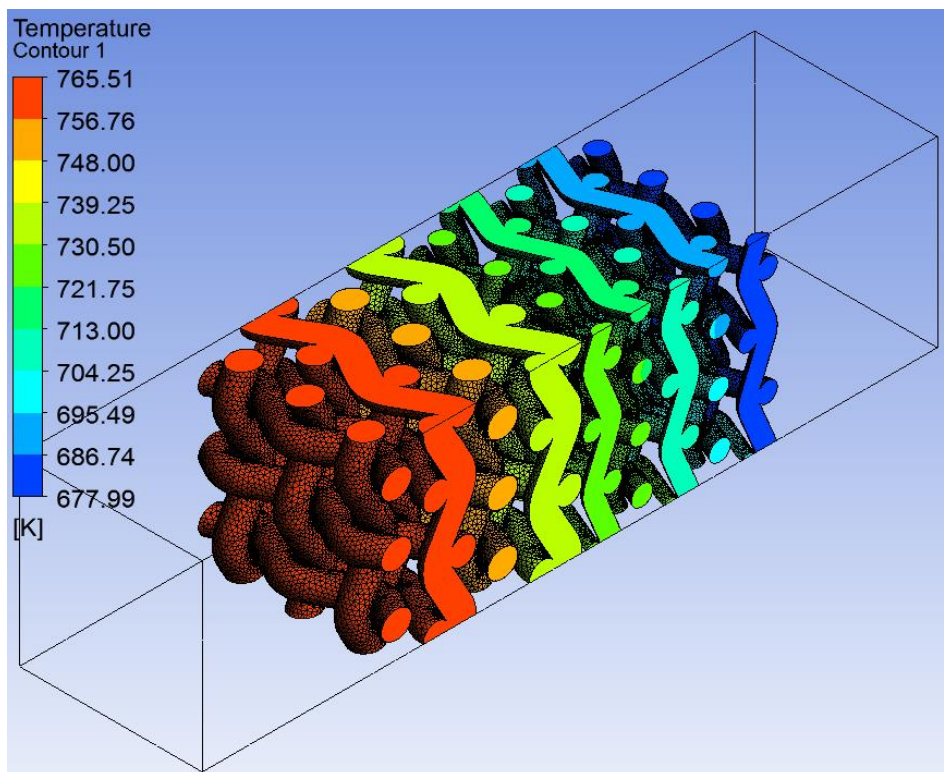
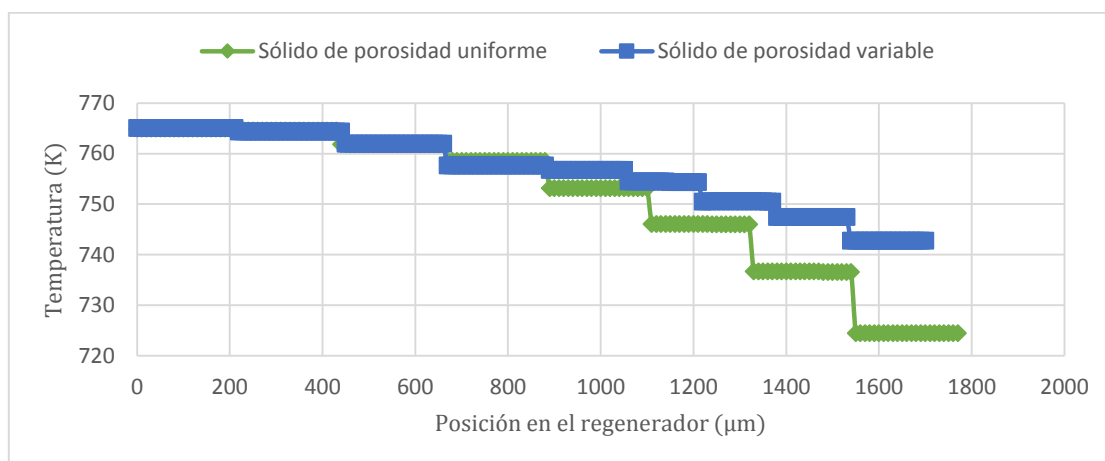


Figura 5.12: Gradiente de temperatura en regenerador de porosidad variable en $t=0.27(s)$

La Grafica 5.5 representa la temperatura de las mallas en ambos regeneradores en el instante de tiempo $t = 0.27(s)$, en función de la posición en el regenerador. Se observa que la temperatura a la entrada de los regeneradores, coincide. Esto se debe a la imposición de la temperatura constante en la entrada, como una de las condiciones de contorno. A medida en que se avanza en la posición en los regeneradores, se observa que la temperatura de los filamentos de la malla del regenerador de porosidad variable, ha alcanzado un valor superior, en el mismo tiempo, que los filamentos del regenerador de porosidad uniforme. Esto se debe a que la variación de porosidad, se ha realizado disminuyendo el diámetro de los filamentos. Tienen un tamaño menor, y por tanto una mayor facilidad para calentarse.



Grafica 5.5: Temperatura media de los filamentos del regenerador de porosidad variable $\Pi_v = 0.63$ y $\Pi_v = 0.69$ en $t=0.27(s)$

En la Figura 5.13 se representa temperatura en el fluido en el regenerador de porosidad uniforme en instante $t = 0.27(s)$. En los extremos del regenerador, al igual que en el análisis de caída de presión, se han añadido volúmenes de fluido adicionales. Debido a que dichos volúmenes no contienen filamentos para el intercambio de calor, la temperatura a lo largo de los mismos es constante. Se puede observar una mayor temperatura en el fluido a la entrada del regenerador, donde se impone la temperatura constante como condición de contorno. A medida de que se avance en la longitud del regenerador, se observa una disminución de temperatura del fluido. Esto se debe a que la figura representa un instante de tiempo, intermedio, en un análisis transitorio. La menor temperatura del fluido corresponde con la salida del regenerador, donde se ha impuesto una temperatura como condición inicial, menor que la temperatura de entrada.

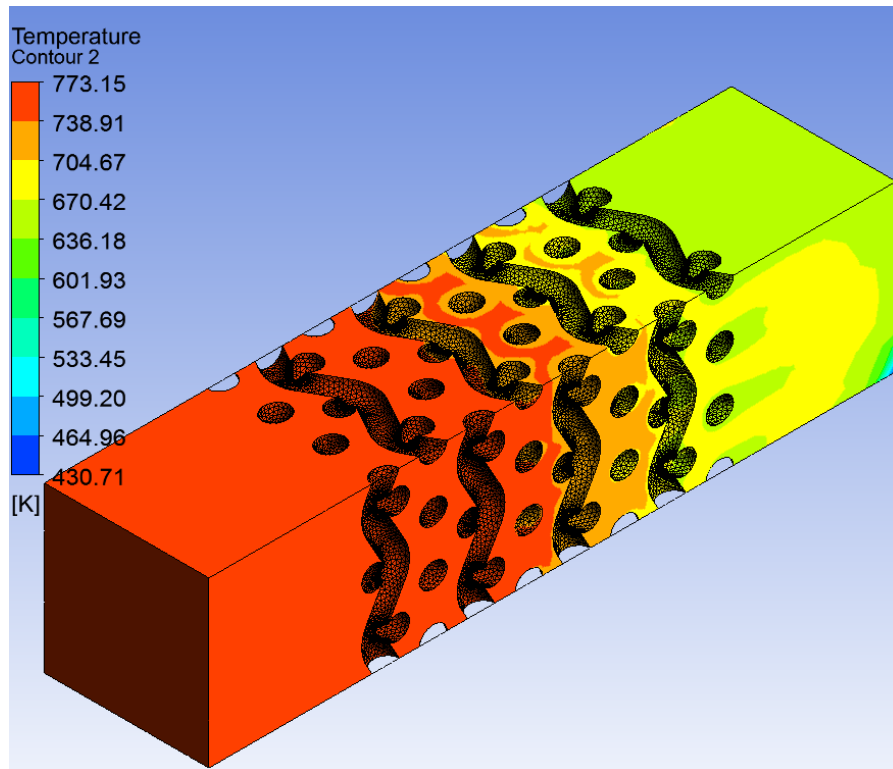


Figura 5.13: Gradiante de temperatura en regenerador de porosidad uniforme $\Pi_v = 0.63$ en $t=0.27(s)$

En la Figura 5.14 y Figura 5.15 se representa la temperatura del fluido del regenerador de porosidad uniforme. Se observa un gradiente de temperatura entre la entrada y salida, debido al calor absorbido por los filamentos. Se puede observar como la temperatura disminuye, a medida en que se avanza en la posición en el regenerador.

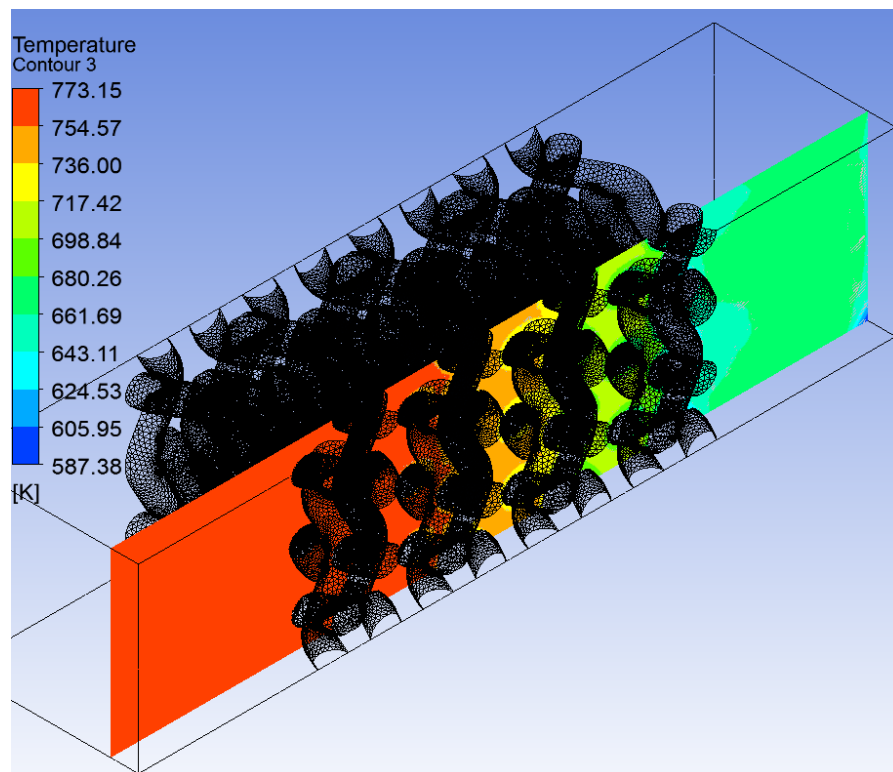


Figura 5.14: Gradiante de temperatura vista isométrica en el fluido en el regenerador de porosidad uniforme $\Pi_v = 0.63$ en $t=0.27(s)$

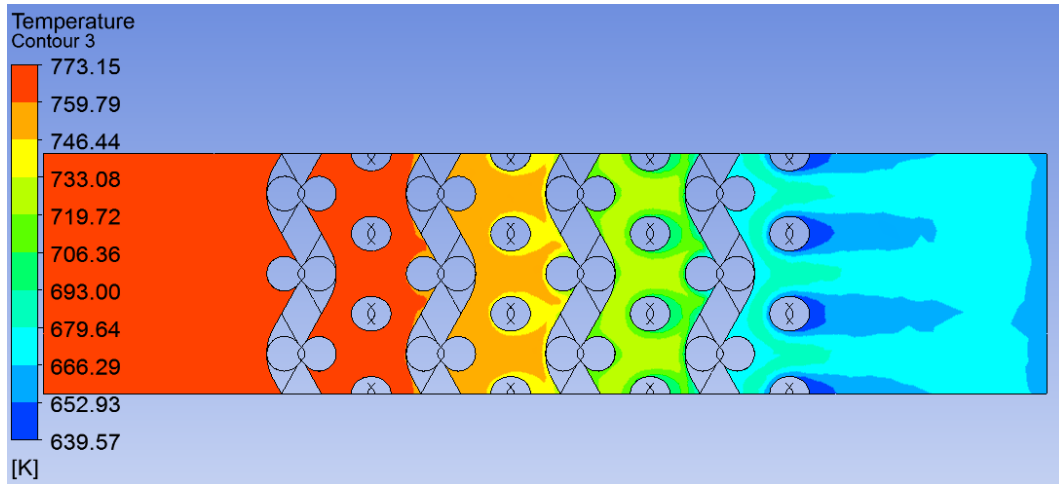


Figura 5.15: Gradiente de temperatura en plano medio en regenerador de porosidad uniforme $\Pi_v = 0.63$ en $t=0.27(s)$

En la figura Figura 5.16 se representa el gradiente de temperatura el en regenerador de porosidad variable en el instante de tiempo $t = 0.27(s)$. Se puede observar como la mayor temperatura se corresponde con la entrada del regenerador, donde se impone la temperatura constante como la condición de contorno. También se observa una mayor temperatura alcanzada en el fluido en comparación con el regenerador de porosidad uniforme. Esto se debe a un mayor tamaño de los huecos en la parte de mayor porosidad. Su aumento facilita el flujo y por tanto la transferencia térmica. La zona de menor temperatura corresponde con la salida del regenerador donde se ha impuesto la temperatura inicial y de salida, menor que la temperatura de entrada.

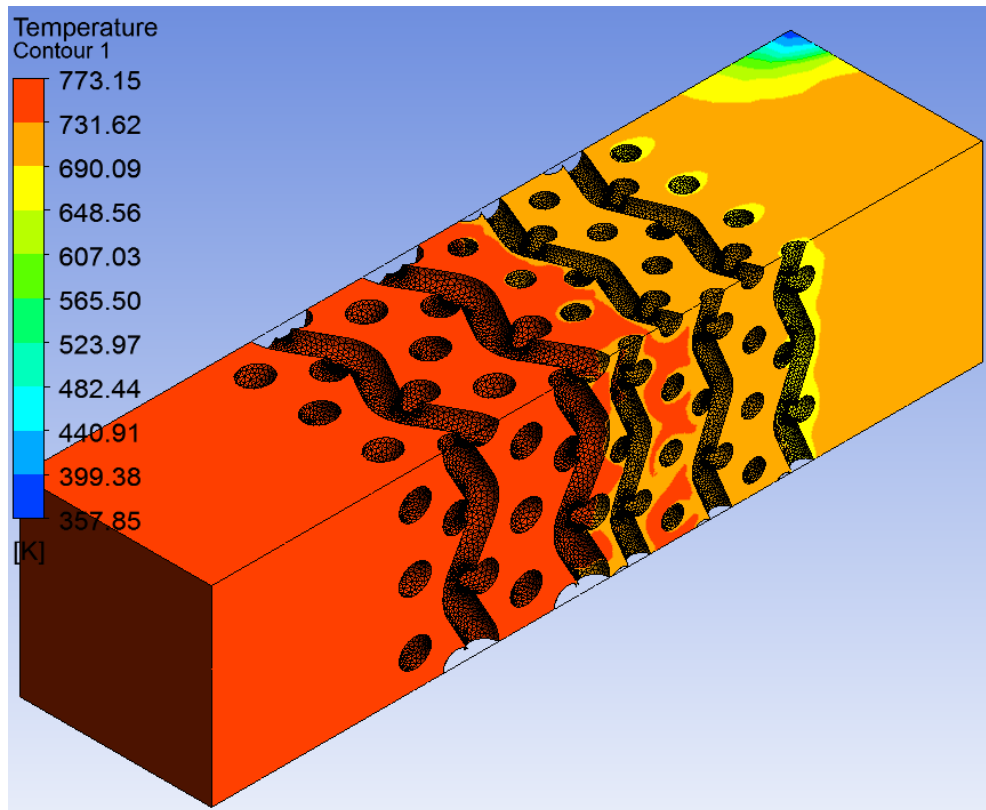


Figura 5.16: Gradiente de temperatura en el regenerador de porosidad variable $\Pi_v = 0.63$ y $\Pi_v = 0.69$ en $t=0.27(s)$

En la Figura 5.17 y Figura 5.18 se representa el gradiente de temperatura de fluido del regenerador de porosidad variable, que varía debido a la absorción de calor por parte de los filamentos de la malla. Se puede observar en el mismo tiempo, el calentamiento del fluido de regenerador de porosidad variable, es mayor que en el regenerador de porosidad uniforme, debido a un ensanchamiento de los huecos entre los filamentos y la disminución del diámetro de los mismos.

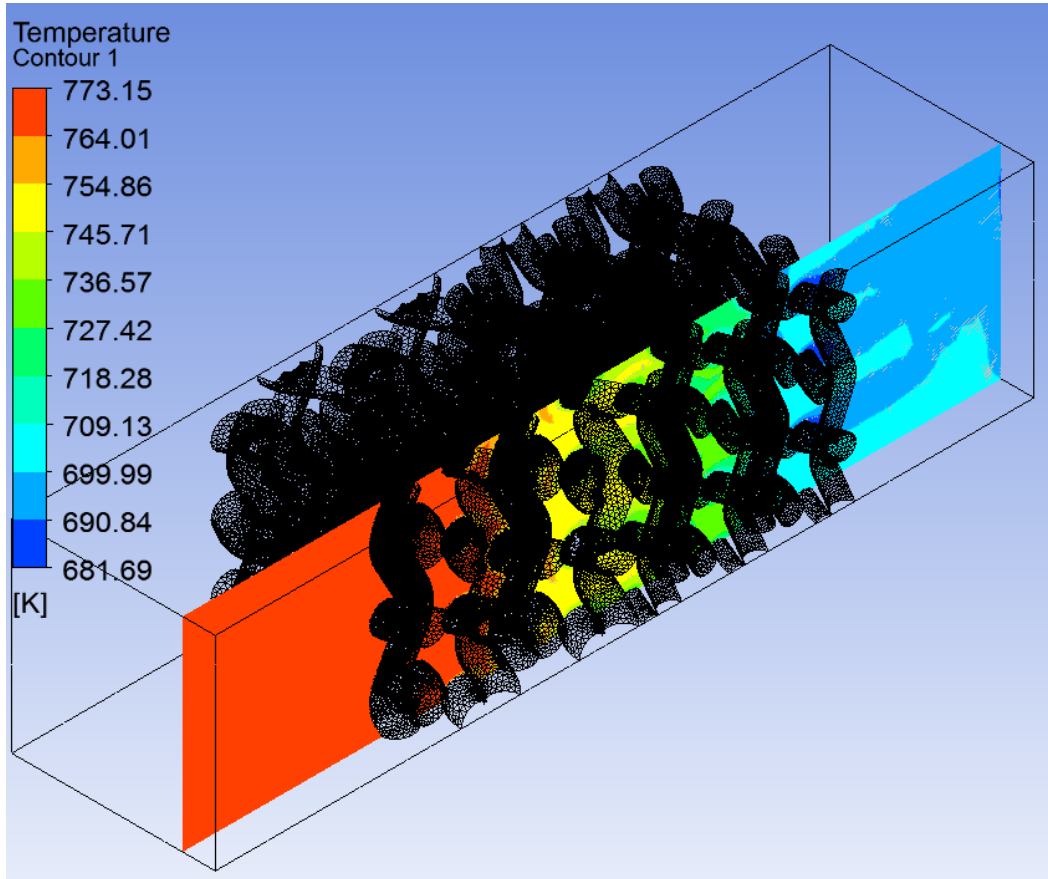


Figura 5.17: Gradiente de temperatura en un regenerador de porosidad variable, vista isométrica.

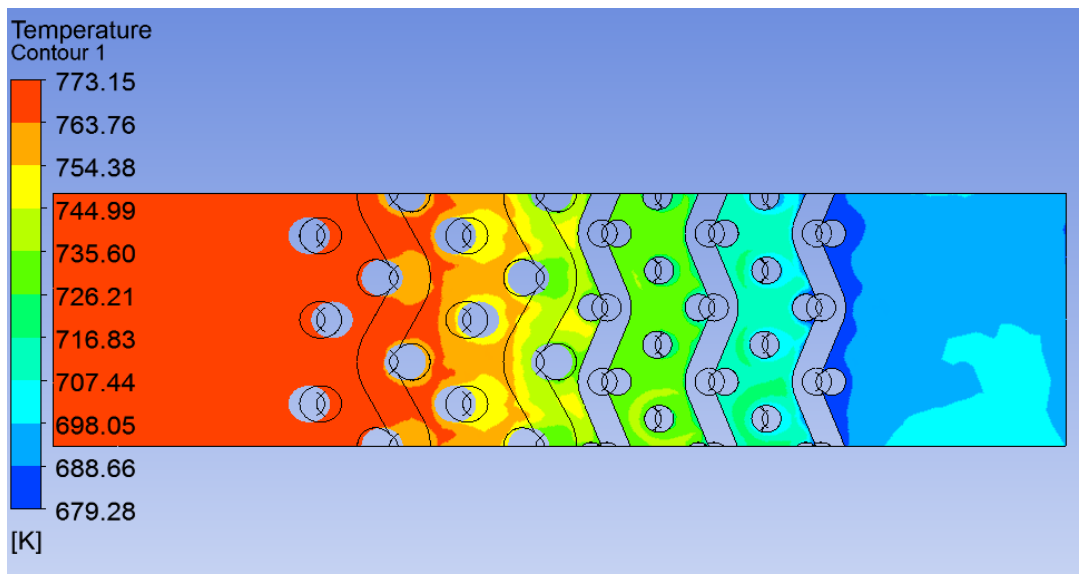
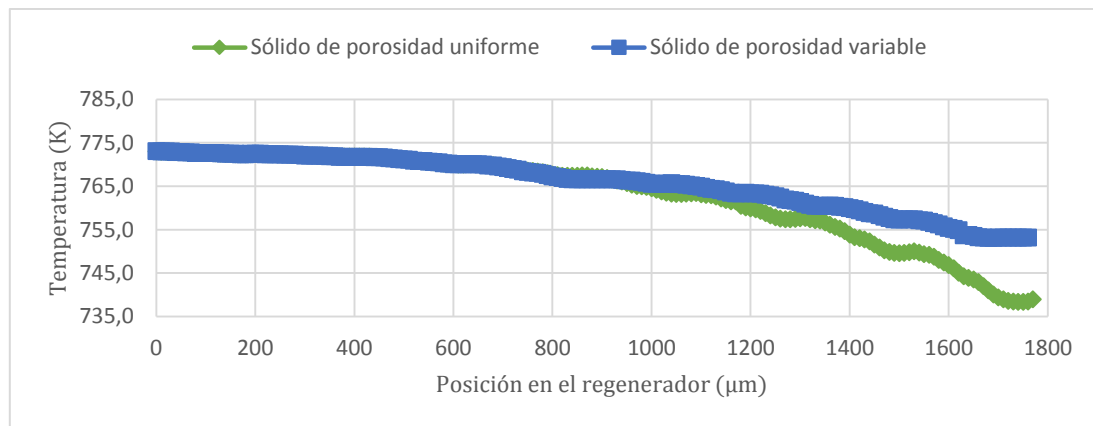


Figura 5.18: Gradiente de temperatura en un plano medio en el regenerador de porosidad variable $\Pi_v = 0.63$ y $\Pi_v = 0.69$ en $t=0.27(s)$

La Grafica 5.6 representa la temperatura del fluido, en función de la posición en el regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable, y en el instante de tiempo $t = 0.27(s)$. Las temperaturas de fluido, en ambos regeneradores coinciden en el punto de entrada, debido a la imposición de condición de contorno de temperatura constante. A medida que se avanza en la posición en los regeneradores, se observa una mayor temperatura en el regenerador de porosidad variable, que en el regenerador de porosidad uniforme. De lo que se deduce, que para el flujo unidireccional, el fluido en un regenerador cuya porosidad varía y aumenta, alcanza una mayor temperatura que el fluido en el regenerador de porosidad uniforme. Grafica 5.6: Temperatura media de fluido en $t=0.27(s)$



Grafica 5.6: Temperatura media de fluido en $t=0.27(s)$

El gradiente de presión en el regenerador de porosidad uniforme se representa en la Figura 5.19. La presión en los volúmenes añadidos en los extremos del regenerador, no presentan variación, ya que no contienen filamentos de la malla. La misma, se encuentra en el centro del regenerador, dificultando el paso del flujo, y creando con ello una caída de presión.

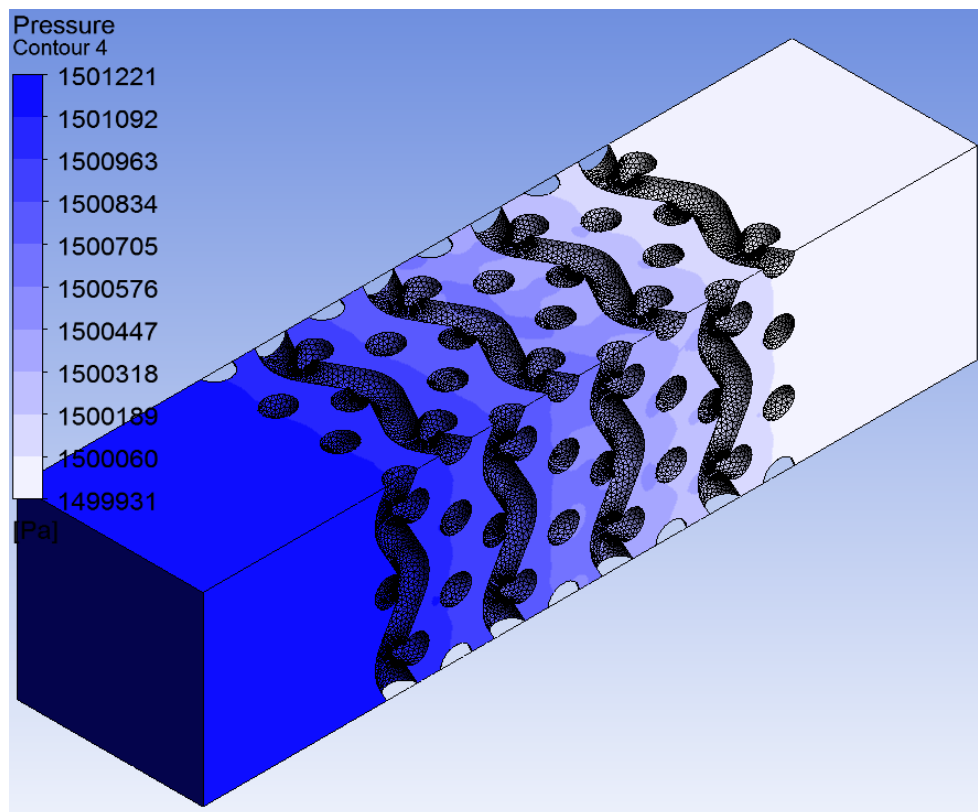


Figura 5.19: Caída de presión el regenerador de porosidad uniforme $\Pi_v = 0.63$

En la Figura 5.20 y Figura 5.21 se representa la caída de presión en un plano interior del regenerador, y ocasionado por la presencia de los filamentos en el regenerador. Se puede observar un mayor valor de porosidad en la entrada del regenerador, donde se ha impuesto la velocidad constante como la condición de contorno, y una presión menor en la salida del regenerador correspondiente con la condición de contorno de presión constante.

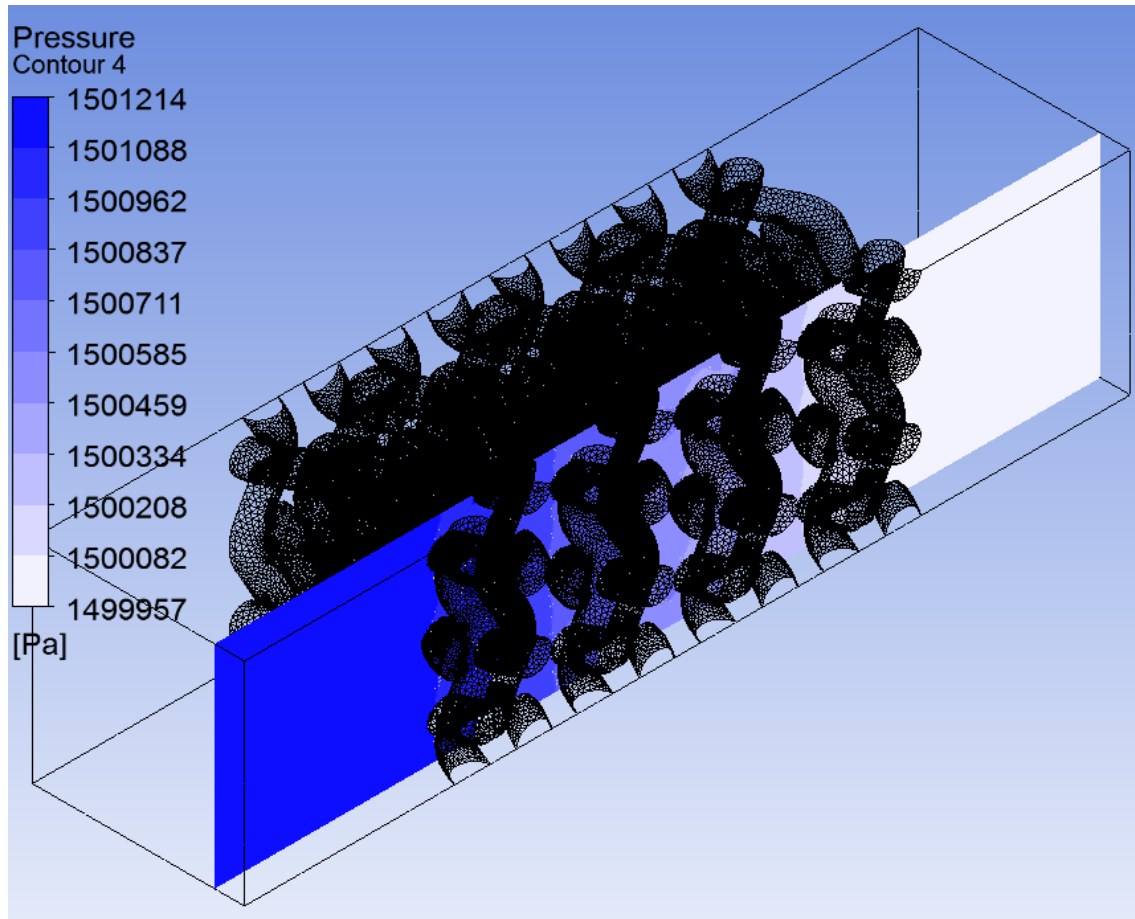


Figura 5.20: Caída de presión en un plano ZY en el regenerador de porosidad uniforme $\Pi_v = 0.63$

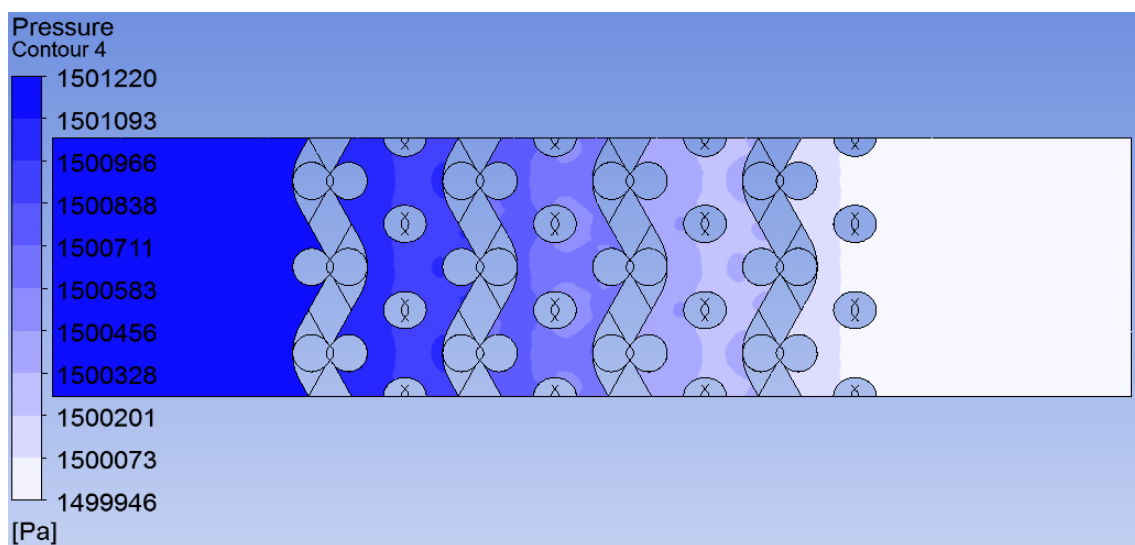


Figura 5.21: Caída de presión en un plano medio en el regenerador de porosidad uniforme $\Pi_v = 0.63$

En la Figura 5.22Figura 5.24 se representa la caída de presión en el regenerador de porosidad variable. El gradiente de presión está ocasionado por los filamentos de la malla. En los extremos del regenerador, los volúmenes de fluido adicionales permiten un correcto desarrollo de la corriente del fluido, y al no contener malla del regenerador, no impiden el paso del flujo. En la entrada del regenerador se observa una presión mayor que en la salida, debida a la imposición de velocidad constante de entrada como condición de contorno.

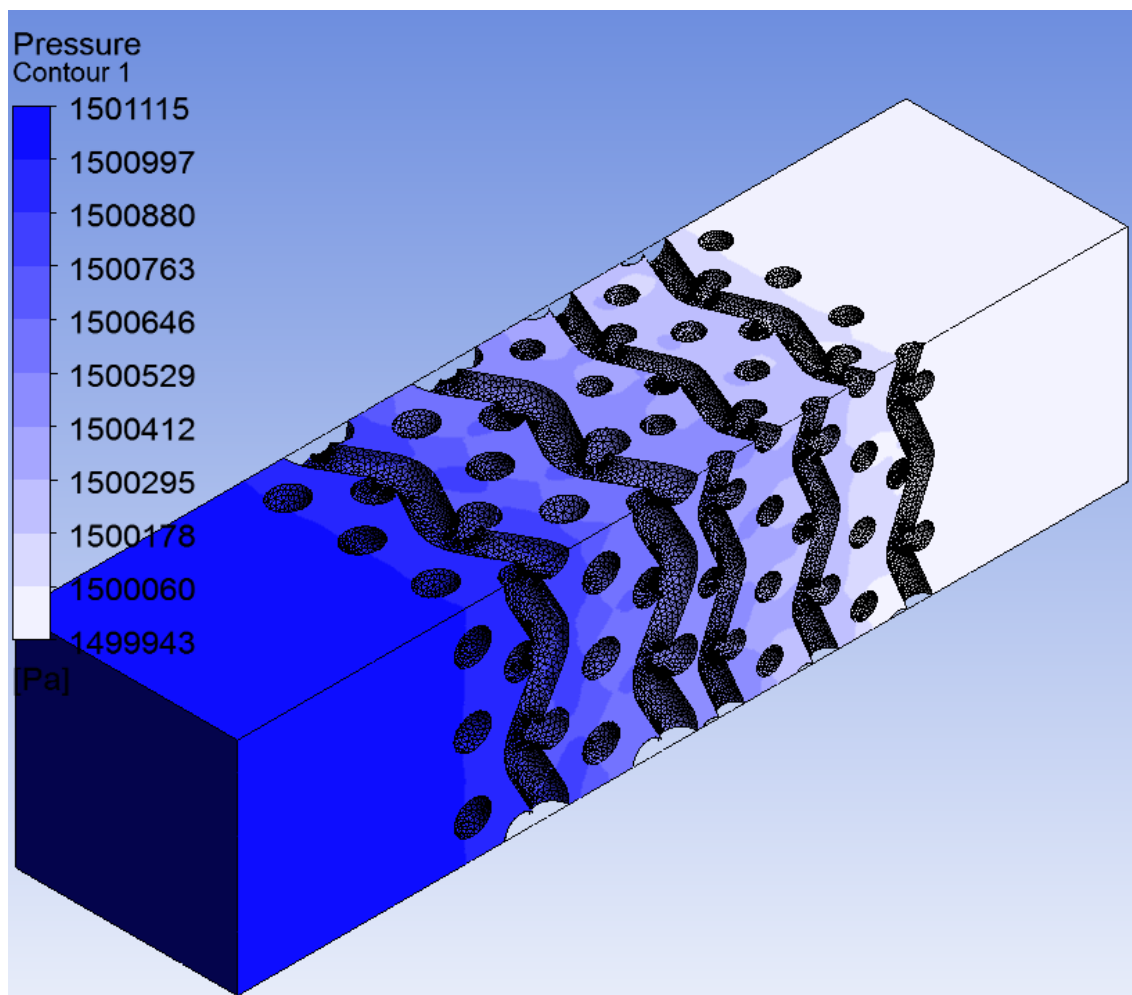


Figura 5.22: Caída de presión del regenerador de porosidad variable $\Pi_v = 0.63$ y $\Pi_v = 0.63$

La Figura 5.23 y Figura 5.24 representan la caída de presión en el fluido en el regenerador de porosidad variable, en un plano interior. La caída de presión, es ocasionada por los filamentos representados. A medida en que se avanza en la posición en el regenerador, se puede observar los valores de presión menores que en el regenerador de porosidad uniforme, debido a un mayor tamaño de los huecos entre los filamentos y mayor área de paso.

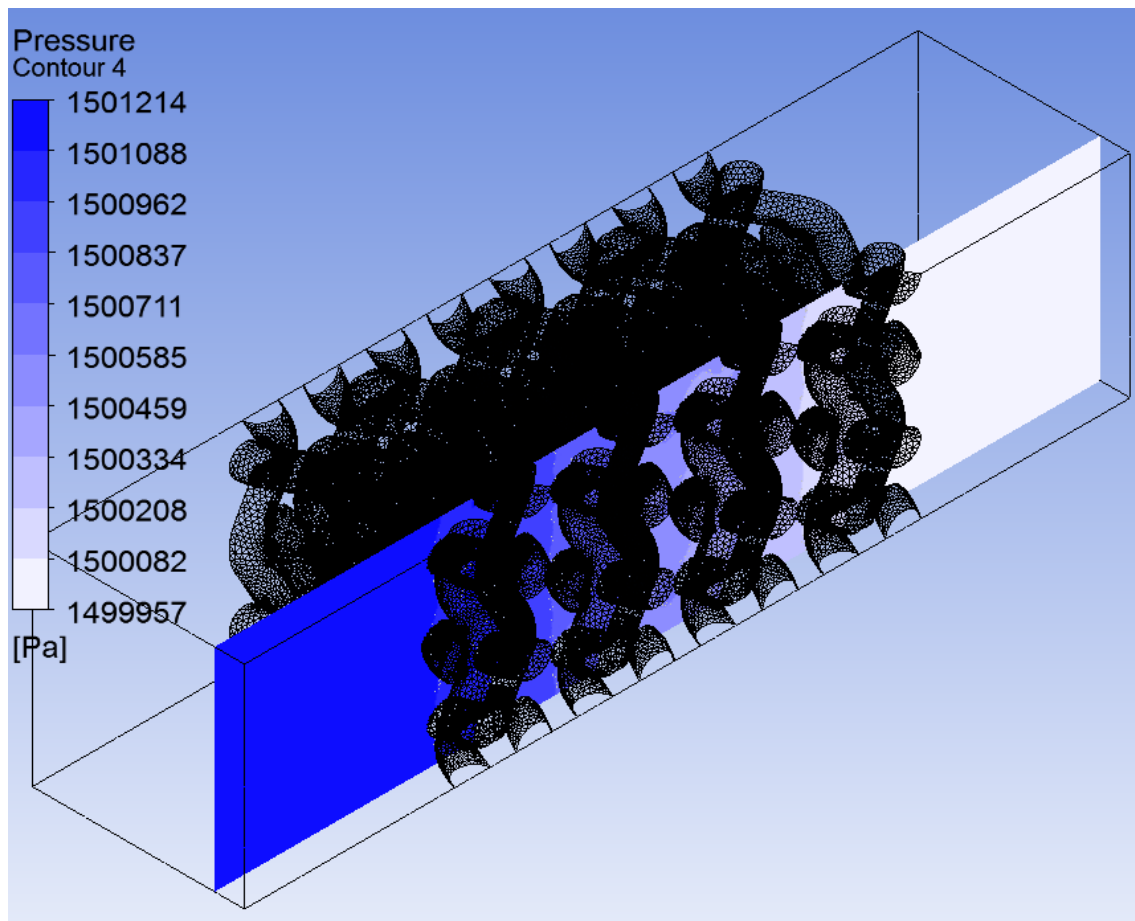


Figura 5.23: Caída de presión en un regenerador de porosidad uniforme vista isométrica

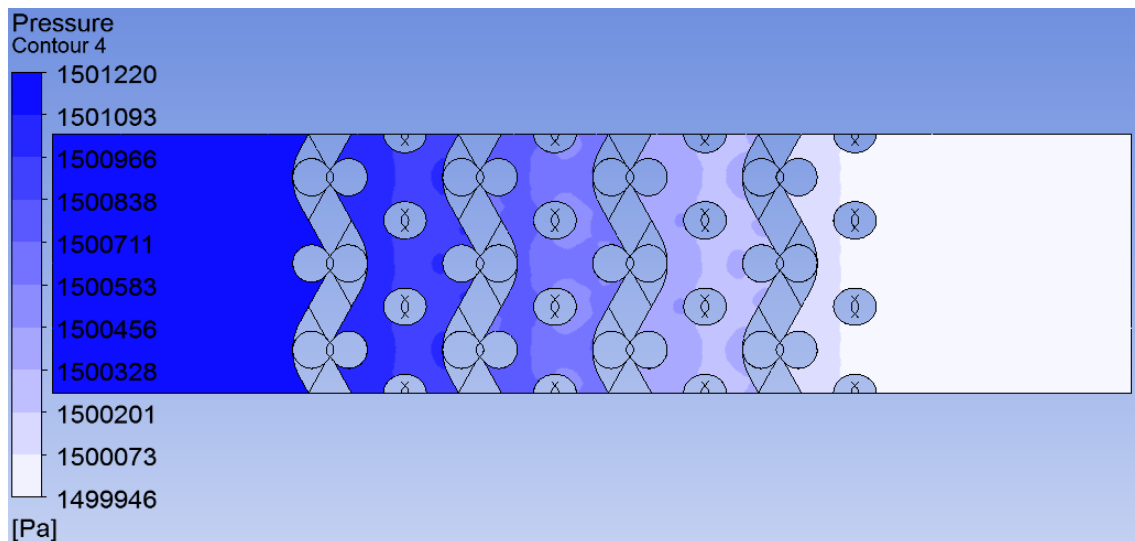
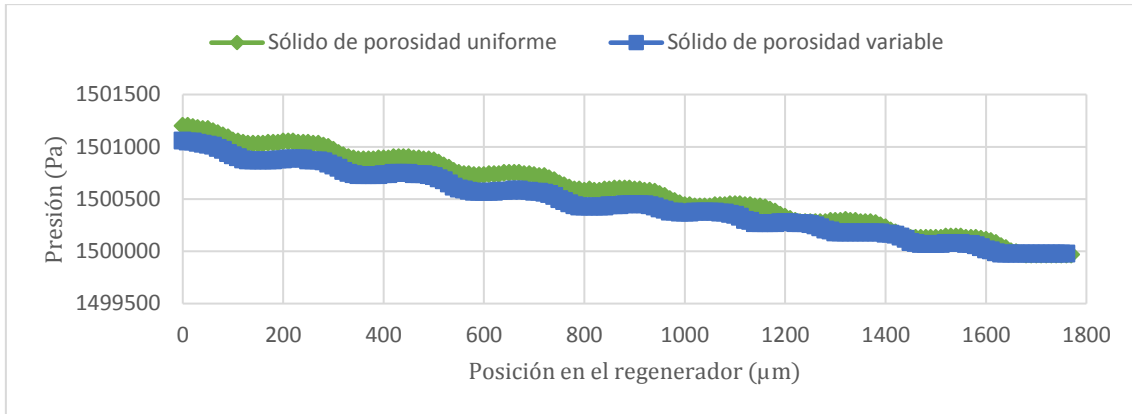


Figura 5.24: Caída de presión en plano medio del regenerador de porosidad variable $\Pi_v = 0.63$ y $\Pi_v = 0.69$ en $t=0.27(s)$

La Grafica 5.7 representa la presión en el fluido en el regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable en función de la posición en el sólido. Se observa una diferencia en la entrada de los regeneradores debido a la imposición de condición de contorno de entrada, una velocidad constante. Mientras que en la salida, la presión de ambos regeneradores coincide, debido a la condición de contorno de salida una presión constante. Se observa una mayor caída de presión en el sólido de porosidad uniforme, y menor en el sólido de

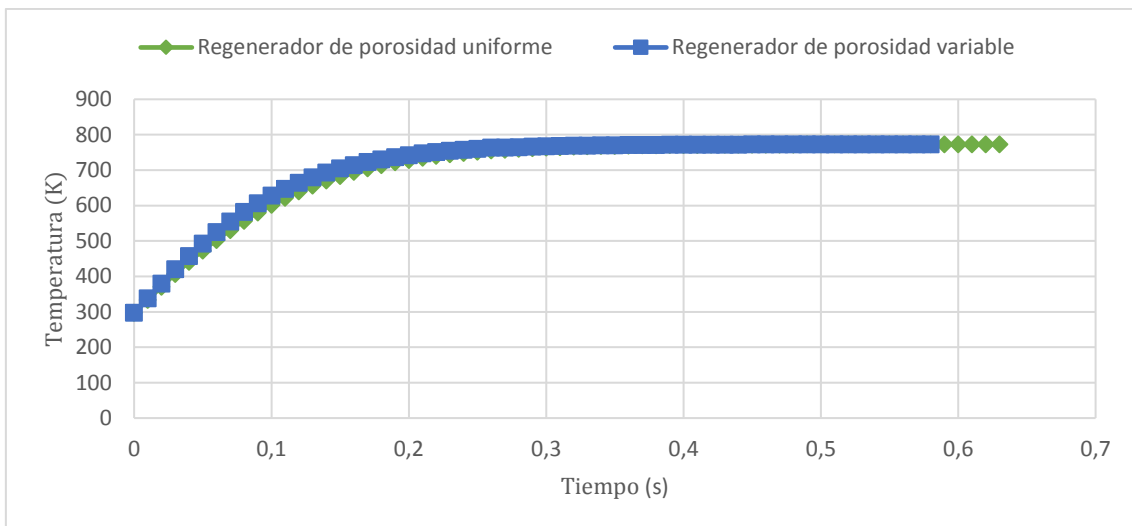
porosidad variable, cuya porosidad se ha aumentado, incrementado el tamaño de los huecos.



Gráfica 5.7 Presión de fluido en el regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable en el instante de tiempo $t=0.27(s)$.

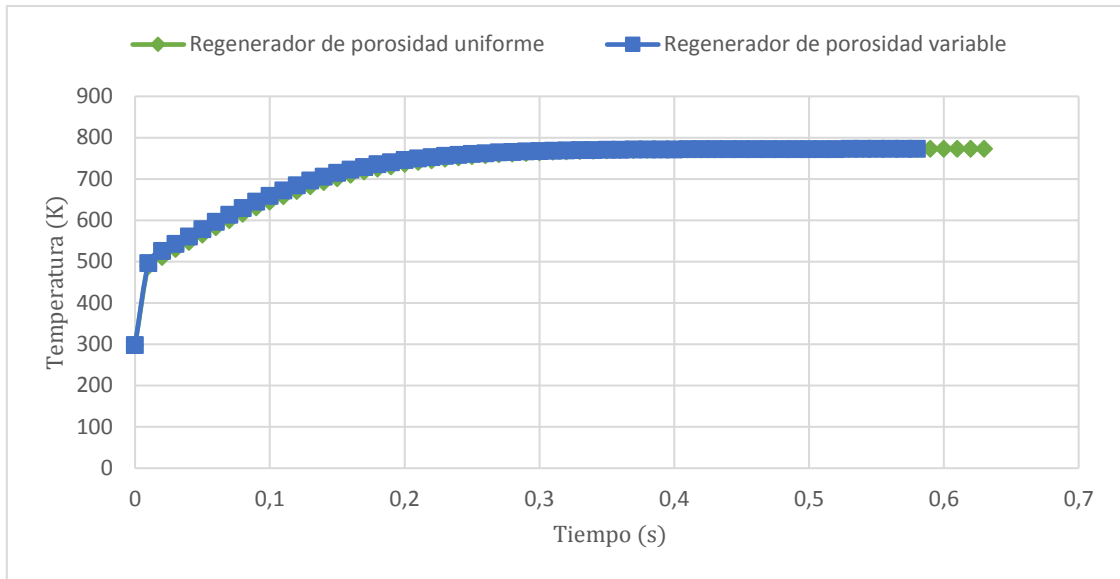
Se puede observar la similitud de caída de presión con la calculada en el apartado 5.2.4. En este caso la caída de presión se incrementa debido a la temperatura aplicada.

En la Gráfica 5.8 se representa la evolución de la temperatura de la malla en ambos regeneradores en función del tiempo. Se puede observar que en el instante inicial, la temperatura de los filamentos de ambos regeneradores es la misma. Esto se debe a la imposición de la condición inicial de temperatura para ambos regeneradores. Con la misma condición de contorno, de temperatura de entrada constante, se observa que el regenerador de porosidad variable alcanza la temperatura impuesta, antes que el regenerador de porosidad uniforme.



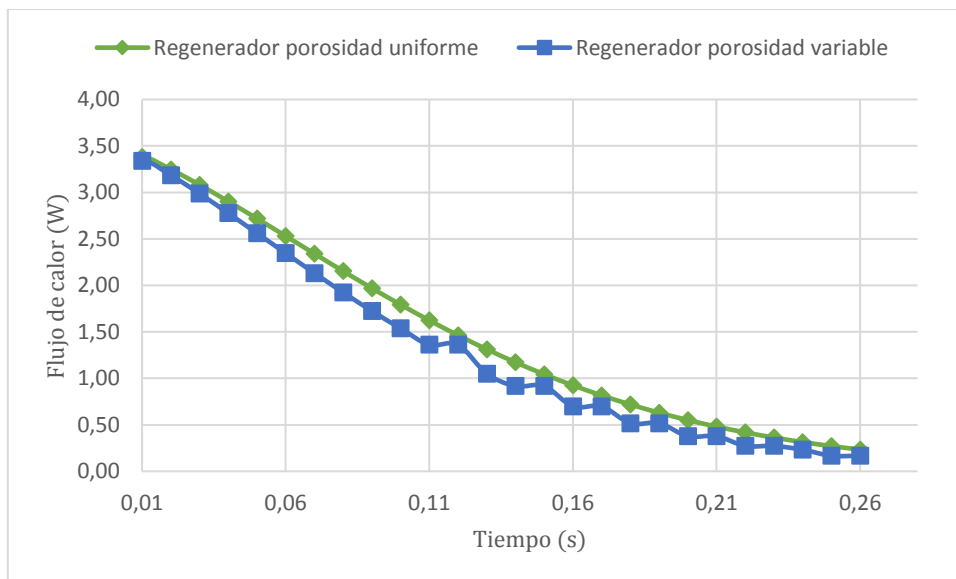
Gráfica 5.8: Temperatura de los filamentos en el regenerador de porosidad uniforme y regenerador de porosidad variable, en función del tiempo.

La temperatura del fluido de ambos sólidos sigue una tendencia parecida que la de los filamentos. La Gráfica 5.9 resume la variación de la temperatura del fluido, en función del tiempo, en ambos regeneradores. Al igual que en los filamentos, se impone la temperatura como condición inicial, es por ello que la temperatura del fluido de ambos regeneradores coincide en el primer instante de tiempo. Se puede observar que el fluido del regenerador de porosidad uniforme, alcanza antes el valor impuesto como condición de contorno, de temperatura constante.



Grafica 5.9: Temperatura de fluido de los regeneradores de porosidad uniforme y de porosidad variable, en función del tiempo

La Grafica 5.10 representa el flujo calor desde el fluido hasta los filamentos en función del tiempo, para ambos regeneradores. Se puede observar que la absorción de calor es mayor en el regenerador de porosidad uniforme que en el regenerador de porosidad variable. Aunque el calentamiento de los filamentos en el regenerador de porosidad variable, es más rápido que en el de porosidad uniforme, al tener los filamentos las mismas características, debido al mismo material utilizado para su fabricación, y la misma diferencia de temperatura, la malla de mayor grosor y por tanto mayor masa, necesita una cantidad de calor mayor que una malla de menor grosor, que es el caso del regenerador de porosidad variable. En la gráfica se observa como en los instantes iniciales el valor de calor absorbido es grande, y va disminuyendo con el paso de tiempo. Esto se debe a que en el instante inicial, el gradiente de temperatura entre el fluido y los filamentos es grande, y mientras pasa el tiempo, el fluido cede calor a los filamentos, que se calientan y se disminuye la diferencia de temperatura entre los ellos.



Grafica 5.10: Flujo de calor en el regenerador de porosidad uniforme y porosidad variable

La transferencia de calor en un regenerador del motor Stirling se caracteriza por el número de Nusselt, y por lo tanto por el coeficiente de transferencia térmica. En la Grafica 5.4 se

observa, que la correlación de número de Nusselt se ajusta bien para distintos tipos de mallas, de diferentes porosidades y diferentes configuraciones de colocación de las capas. De este modo, la ecuación (5.8) es utilizable para la caracterización de la transferencia térmica en las mallas de tipo *Stacked Wire Screen*.

5.4. Modelado del medio poroso

5.4.1. Introducción

Tras el modelado de la caída de presión y la transferencia térmica, el último paso en el estudio del regenerador de motor Stirling, es la adaptación del medio poroso, descrita en el apartado 5.1. Para ello, el software seleccionado dispone de la herramienta necesaria. Como se ha visto en el apartado 4.1, el modelado matemático de un medio poroso incluye un término adicional en la ecuación de la conservación de cantidad de movimiento. Dicho término precisa de dos coeficientes característicos para cada tipo de malla. En el caso de presente estudio, donde la porosidad es variable, será necesario el cálculo de los mismos para cada una de las porosidades que compongan el estudio.

5.4.2. Caracterización del medio poroso

Como se ha visto previamente, la caída de presión en un medio poroso se describe con la ley de Darcy y Forchheim según las ecuaciones (4.6.) y (4.7.). Usando la ecuación de Ergun (4.8.) la de Reynolds (3.8.), la caída de presión en un medio poroso se caracteriza por la ecuación (5.6.).

$$\Delta p = \frac{\mu \cdot a_1}{2} \frac{L}{d_h^2} u_{max} + \frac{a_2}{2} \frac{L}{d_h} \rho_f u_{max}^2 \quad (5.6.)$$

Donde el término a_1 es la constante de correlación relacionada con el área de paso del fluido y el término a_2 es la constante de correlación relacionada con el coeficiente de fricción. Los mismos términos junto con el número de Reynolds definen la ecuación de coeficiente de fricción para un medio poroso como la ecuación (4.10).

El modelado del medio poroso se caracteriza por dos coeficientes característicos para cada tipo de malla. Dichos coeficientes son el coeficiente de resistencia viscosa y el coeficiente de resistencia inercial. Operando con ecuación (4.9) y (5.2), la caída de presión en una malla de porosidad determinada se caracteriza por la ecuación (5.7).

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu \cdot u}{\alpha} + \frac{C_2 \cdot \rho \cdot u^2}{2} \quad (5.7)$$

Donde $\frac{1}{\alpha}$ es el coeficiente de resistencia viscosa y C_2 es el coeficiente de resistencia inercial. Operando ecuaciones (5.6) y (5.7) se llega a las ecuaciones (5.8) y (5.9).

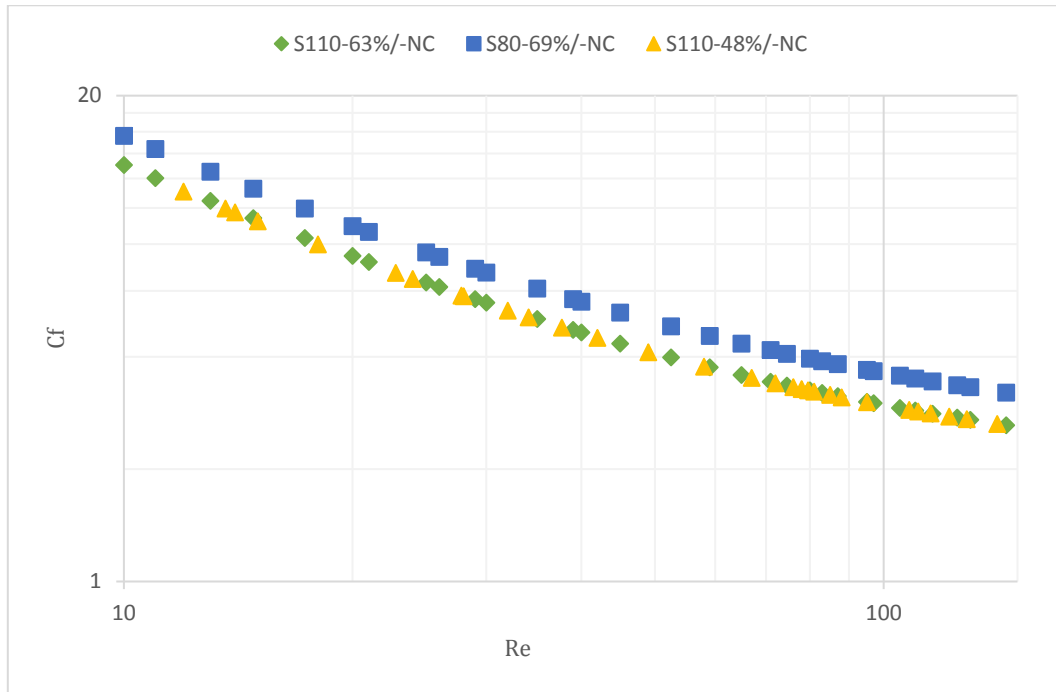
$$\frac{a_1}{2d_h^2 \cdot \Pi_v} = \frac{1}{\alpha} \quad (5.8)$$

$$\frac{a_2}{d_h \cdot \Pi_v^2} = C_2 \quad (5.9)$$

Los coeficientes de resistencia viscosa y resistencia inercial son característicos para cada geometría en concreto. Debido a que en este trabajo se estudia un regenerador de porosidad variable, es necesaria la definición de dichos coeficientes para cada una de las geometrías

estudiadas. Para la obtención de los términos a_1 y a_2 es necesario la obtención de la correlación del coeficiente de fricción característico de cada malla, explicado en el apartado 5.2.3. La caracterización del medio poroso del regenerador de porosidad variable se realiza en tantas partes en las que se divida la porosidad del regenerador.

La determinación de los coeficientes consiste en realización de simulaciones a distintas velocidades y constantes condiciones de contorno. Utilizando la caída de presión obtenida en cada uno de los experimentos y la ecuación (5.2) se obtiene la gráfica de coeficiente de fricción C_f en función de número de Reynolds.



Grafica 5.11: Coeficiente de fricción vs número de Reynolds

En la Grafica 5.11 se representa el resultado de las simulaciones para la obtención del coeficiente de fricción en función del número de Reynolds, para las mallas S110 – 63%/-NC , S80 – 69%/-NC y S110 – 48%/-NC.

Utilizando los resultados de las simulaciones, los valores obtenidos se aproximan a una ecuación de forma exponencial, obteniendo así las correlaciones para el coeficiente de fricción, para cada una de las mallas estudiadas. De esta forma, se determina la ecuación (5.10) de coeficientes de fricción para la malla S110 – 63%/-NC

$$C_f = \frac{111.8}{Re} + 1.85 \tag{5.10}$$

La ecuación (5.11) para la malla S80 – 69%/-NC

$$C_f = \frac{133}{Re} + 2.289 \tag{5.11}$$

Y la ecuación (5.12) para la malla S110 – 48%/-NC

$$C_f = \frac{110.3}{Re} + 1.86 \quad (5.12)$$

Se puede apreciar de la Grafica 5.11 y la Grafica 5.1 que la correlación del coeficiente de fricción en la malla *Staked Wire Screen* es ajustable con la ecuación (5.1) de Ergun de tres coeficientes, y con la ecuación de Ergun de dos coeficientes (4.10). Quedando definido el coeficiente de fricción para las mallas de tipo *Staked Wire Screen*, mediante la ecuación (5.10), se obtienen los coeficientes de resistencia viscosa e inercial, reunidos en la de siguientes mallas utilizadas en el análisis de porosidad variable.

Tabla 5.2: Coeficientes característicos de mallas estudiadas

	$\frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{m^2} \right)$	$C_2 \left(\frac{1}{m} \right)$
S80 – 68%/-NC	2695786995	23117.76638
S80 – 57%/-NC	8831602817	54522.27059
S110 – 39%/-NC	29890294540	177228.9398
S110 – 60%/-NC	3316719854	30938.12375
S80 – 49%/-NC	19103610410	100607.4309
S110 – 63%/-NC	2466203020	24795.33848
S110 – 71%/-NC	997053751.1	13177.657

Para el cálculo de la transferencia térmica del medio poroso existen dos posibilidades, equilibrio térmico local, y no equilibrio térmico local. Para la simulación de un medio poroso que se encuentra en equilibrio térmico local, se utiliza la conductividad térmica efectiva y el término transitorio que incluye inercia térmica del medio, descrito en el párrafo 4.4.1. En la simulación de un medio poroso en el cual no exista equilibrio térmico entre el fluido y el regenerador, virtualmente se crean dos zonas situadas en el mismo espacio del medio poroso. Una de ellas correspondiente con el fluido y otra con el regenerador, para una de las cuales se resuelve la ecuación de energía por separado. Posteriormente se acoplan para aportar una solución única.

Un modelo de análisis numérico de un regenerador que intercambia calor con un fluido de trabajo implica el modelo de equilibrio no térmico. Los términos para su ajuste es el coeficiente de transferencia térmica de la ecuación (5.5) y el área específica de transferencia de calor de la ecuación (3.6).

Tras varias simulaciones se ha observado una diferencia de temperatura poco significativa entre la sección del regenerador y fluido, una vez alcanzado el régimen permanente. De este modo se asume equilibrio térmico como una aproximación del modelo y característica de futuros cálculos.

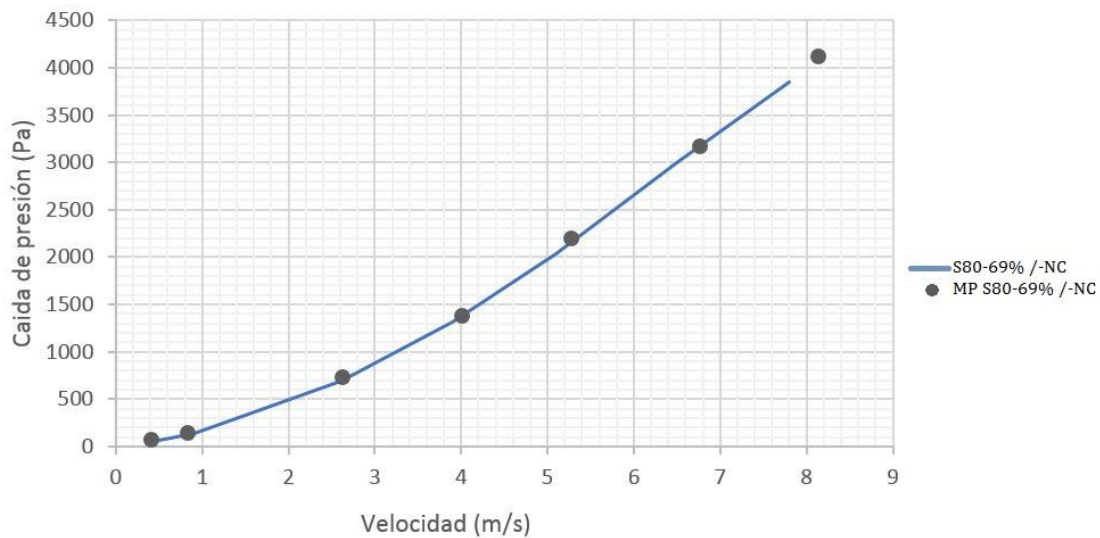
5.4.3. Validación del medio poroso

Para la simulación del medio poroso se ha considerado un flujo transitorio, unidireccional, a temperatura constante en la entrada, las propiedades constantes de fluido de trabajo y caracterizado por los coeficientes de la Tabla 5.2.

Tras las simulaciones para la obtención de la caída de presión en el regenerador S80 – 69%/-NC, se han obtenido los términos de coeficiente de resistencia viscosa y resistencia inercial. Dichos términos se han usado para la caracterización del medio poroso como un regenerador de tipo S80 – 69%/-NC.

La Grafica 5.12 representa la comparación de la caída de presión en un regenerador en 3D de características S80 – 69%/-NC, y un volumen uniforme, del mismo tamaño que el

regenerador en 3D, que se ha caracterizado como el medio poroso, con las resistencias viscosa, inercial y la porosidad de 69%



Gráfica 5.12: Caída de presión del regenerador vs caída de presión del equivalente medio poroso

5.4.4. Modelado de flujo oscilante

El flujo en medio poroso se considera incompresible, viscoso y Newtoniano. El modelo del medio poroso 3D es equivalente a una geometría real de la malla, y una simplificación 2D es equivalente al modelo 3D. De ese modo el estudio de flujo oscilante en la longitud total del regenerador se realizará en un modelo de dos dimensiones.

Condiciones y características de la simulación

Como condición de entrada se impone una velocidad, mediante una función UFD, de perfil senoidal de la forma

$$v = U \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot fe \cdot t)$$

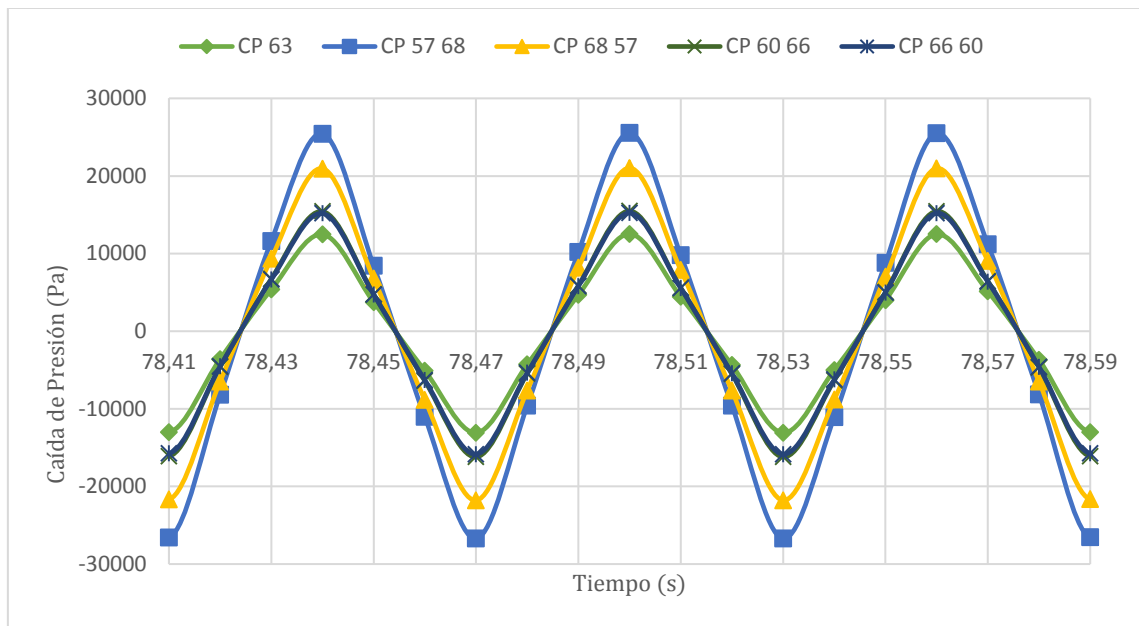
Donde fe es la frecuencia de giro del motor, 1000 rpm en el caso de presente estudio y U es la amplitud de la onda senoidal. La condición de contorno de entrada es a temperatura constante de 1000 (K), correspondiente con el foco caliente del motor. En la salida se impone una presión constante de 19 bar y una temperatura de 500 (K) equivalente al foco frío del motor. Las condiciones de contorno se consideran simétricas ya que no se simula la sección total del regenerador. Los ajustes para el medio poroso son: formulación de velocidad física, ya que, por defecto, el cálculo de la velocidad del medio poroso está basado en la formulación de velocidad superficial de la ecuación (4.14) y la porosidad y los coeficientes de resistencia viscosa e inercial se reflejan en la Tabla 5.2.

Porosidad media

El primer estudio se centra en observación de diferencias entre un regenerador de porosidad uniforme $\Pi_v = 63\%$ y un regenerador de porosidad variable, la media de las cuales equivale a la del regenerador de porosidad uniforme. A continuación, se indican las mallas seleccionadas para este estudio.

S80 – 68%/–NC
 S80 – 57%/–NC
 S110 – 60%/–NC
 S80 – 66%/–NC
 S110 – 63% – NC

En la Grafica 5.13 se indica la caída de presión de los regeneradores estudiados.



Grafica 5.13: Caída de presión en regeneradores con la misma porosidad media

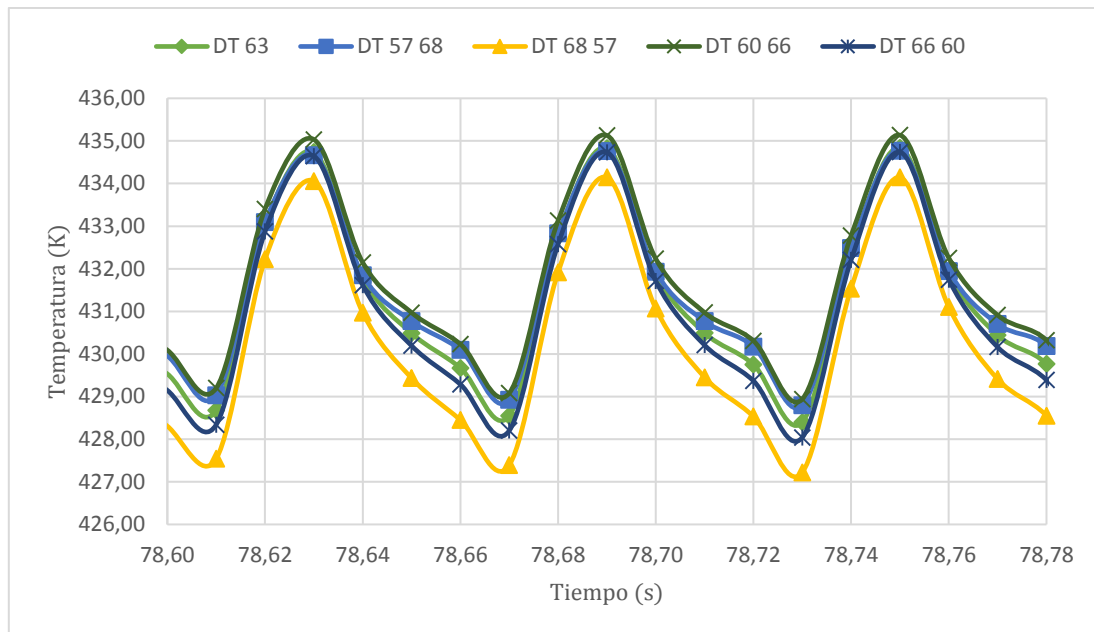
Se puede observar que la caída de presión es mayor en el caso de aumento de porosidad en el sentido positivo de valor de velocidad. De esta forma, la caída de presión en el regenerador compuesto por las porosidades ($\Pi_v = 57\%$; $\Pi_v = 68\%$), presenta una diferencia de 50.97%, con el regenerador de porosidad uniforme. En el caso del regenerador compuesto por las porosidades ($\Pi_v = 68\%$; $\Pi_v = 57\%$), la caída de presión aumenta un 40.45% respecto el regenerador de porosidad uniforme.

Los regeneradores compuestos por ($\Pi_v = 60\%$; $\Pi_v = 66\%$) y ($\Pi_v = 66\%$; $\Pi_v = 60\%$) presentan un aumento de caída de presión, de 21.72%, en cada caso, en comparación con el regenerador de porosidad uniforme.

Se puede observar que a pesar de tener la misma porosidad media, el incremento de caída de presión aumenta en el regenerador que presenta una diferencia mayor entre las porosidades que lo componen.

La diferencia de la temperatura del fluido de trabajo, entre la entrada y salida del regenerador, se representa en la Grafica 5.14. Al igual que en la caída de presión, se observa una mayor diferencia en el caso de aumento de porosidad en el sentido positivo de valor de velocidad. La diferencia de la temperatura también es mayor en el regenerador cuyo gradiente de porosidad es menor. En el caso del regenerado compuesto por porosidades de ($\Pi_v = 60\%$; $\Pi_v = 66\%$), se presenta un aumento de la diferencia de temperatura de

0.089%. En los regeneradores compuestos por porosidades ($\Pi_v = 57\%$; $\Pi_v = 68\%$), y ($\Pi_v = 66\%$; $\Pi_v = 60\%$), la diferencia de las temperaturas coincide con el regenerador de porosidad uniforme. Y en el caso del regenerador de porosidades ($\Pi_v = 68\%$; $\Pi_v = 57\%$), se observa una disminución de 0.135% de diferencia de temperatura.



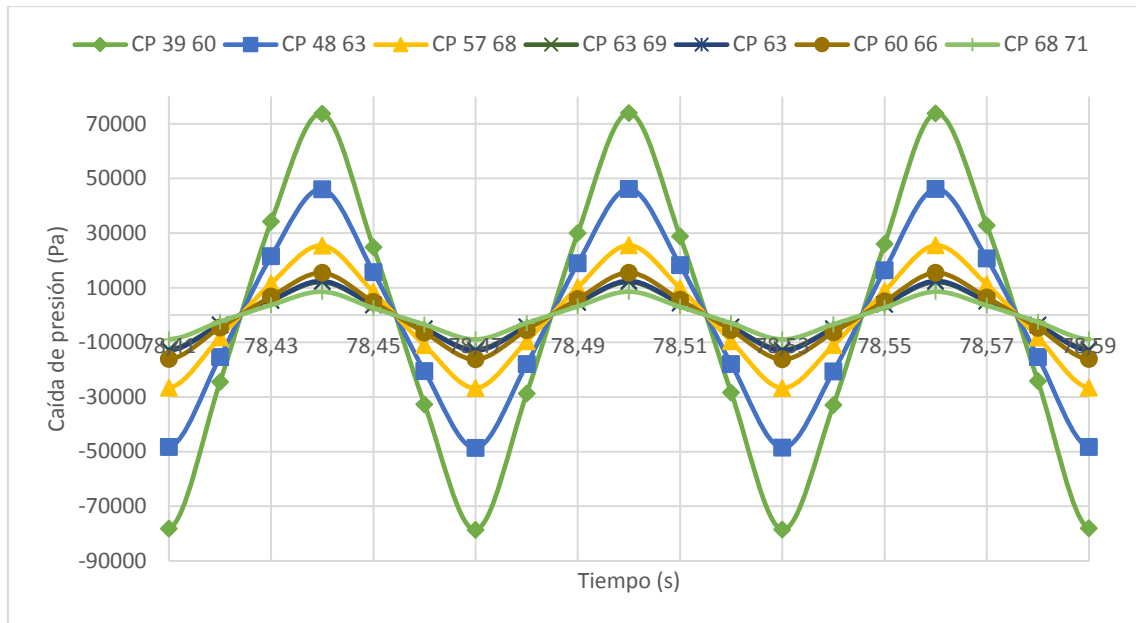
Grafica 5.14: Diferencia de temperatura en regeneradores con la misma porosidad media

Porosidad creciente y decreciente

Se ha observado la diferencia entre aumento y disminución de porosidad en el sentido positivo de valor de velocidad. Para su estudio, se analizan los regeneradores compuestos de siguientes características y porosidades:

- S80 – 68%/-NC
- S80 – 57%/-NC
- S110 – 60%/-NC
- S80 – 66%/-NC
- S110 – 63% – NC
- S110 – 39%/-NC
- S80 – 48%/-NC
- S110 – 71%/-NC

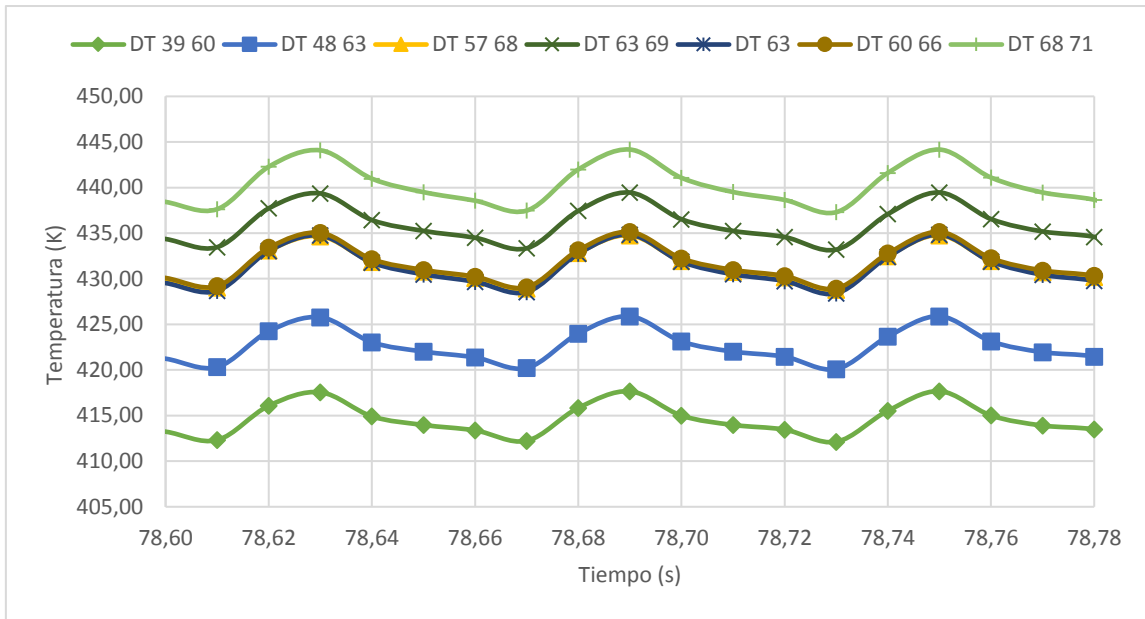
En el caso de aumento de porosidad en el regenerador, la caída de presión se representa en la Grafica 5.15



Grafica 5.15: Caída de presión en regeneradores de porosidad creciente

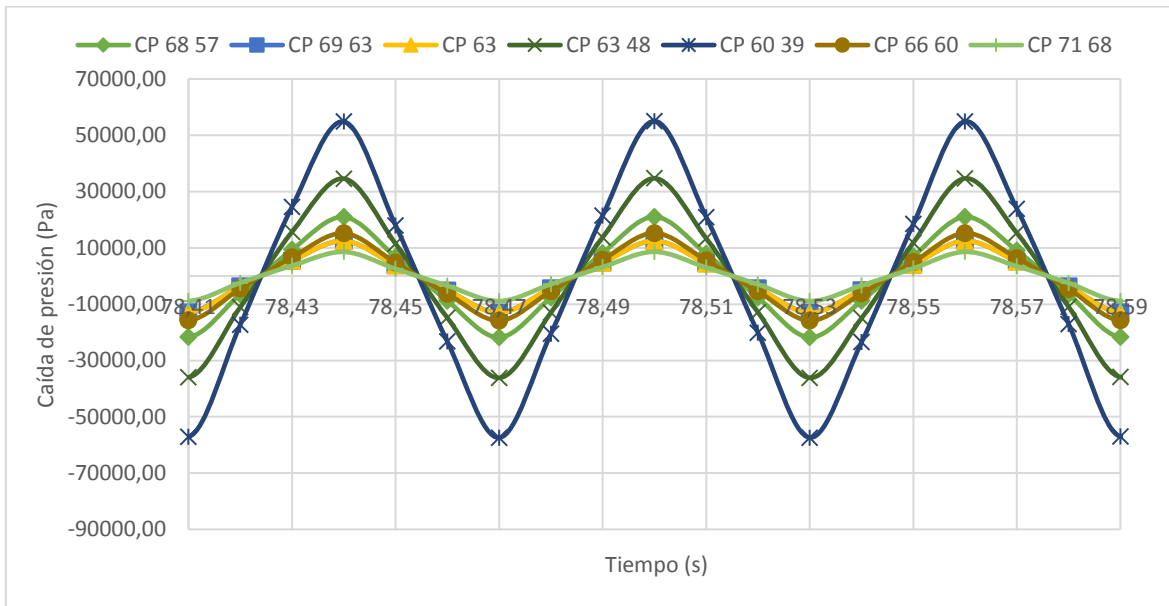
Se observa que el regenerador compuesto por las porosidades ($\Pi_v = 39\%$; $\Pi_v = 60\%$), cuya porosidad media es 48% , presenta una caída de presión de $73712.12 (Pa)$. La diferencia entre sus porosidades es del 21% . El regenerador compuesto por las porosidades ($\Pi_v = 48\%$; $\Pi_v = 63\%$), y de porosidad media 55% , tiene un valor de caída de presión de $46055.62 (Pa)$, que ha disminuido un 37.51% , respecto del regenerador de mayor caída de presión. La diferencia entre sus porosidades es del 15% . Una disminución del 65.48% en la caída de presión, presenta el regenerador compuesto por las porosidades ($\Pi_v = 57\%$; $\Pi_v = 68\%$) y porosidad media del 62.5% , cuya diferencia es del 11% . La caída de presión en el regenerador de porosidades ($\Pi_v = 60\%$; $\Pi_v = 66\%$) y porosidad media del 63% , es un 79.07% respecto el regenerador de mayor caída de presión, y las porosidades del cual varían un 6% . La caída de presión del regenerador compuesto por las porosidades ($\Pi_v = 63\%$; $\Pi_v = 69\%$), cuya media se sitúa en 66% , y el regenerador de porosidad constante ($\Pi_v = 63\%$), presentan una caída de presión similar, y un 82.7% menor que el regenerador de mayor caída de presión. Y finalmente, el regenerador que se compone de las porosidades ($\Pi_v = 68\%$; $\Pi_v = 71\%$), y una media de 69.5% , presenta la menor caída de presión entre los regeneradores calculados. La diferencia con el regenerador que presenta la mayor caída de presión es del 88.38% .

La Grafica 5.16 representa la diferencia de la temperatura del fluido de trabajo, entre la entrada y salida, de los regeneradores cuya porosidad es creciente en el sentido positivo del valor de velocidad. El regenerador compuesto por las porosidades ($\Pi_v = 68\%$; $\Pi_v = 71\%$), presenta la mayor diferencia de temperatura, cuyo valor es del $444.08(K)$. Le sigue el regenerador de porosidades ($\Pi_v = 63\%$; $\Pi_v = 69\%$), con una disminución de 1.06% . La diferencia de la temperatura en el regenerador de porosidades ($\Pi_v = 60\%$; $\Pi_v = 66\%$), ($\Pi_v = 57\%$; $\Pi_v = 68\%$) y ($\Pi_v = 63\%$), es similar, con la disminución de 2.03% respecto al regenerador de mayor diferencia de temperatura. El regenerador ($\Pi_v = 48\%$; $\Pi_v = 63\%$), y ($\Pi_v = 39\%$; $\Pi_v = 60\%$), presentan una disminución de 4.29% y 5.97% respectivamente.



Grafica 5.16: Diferencia de temperatura en regeneradores de porosidad creciente

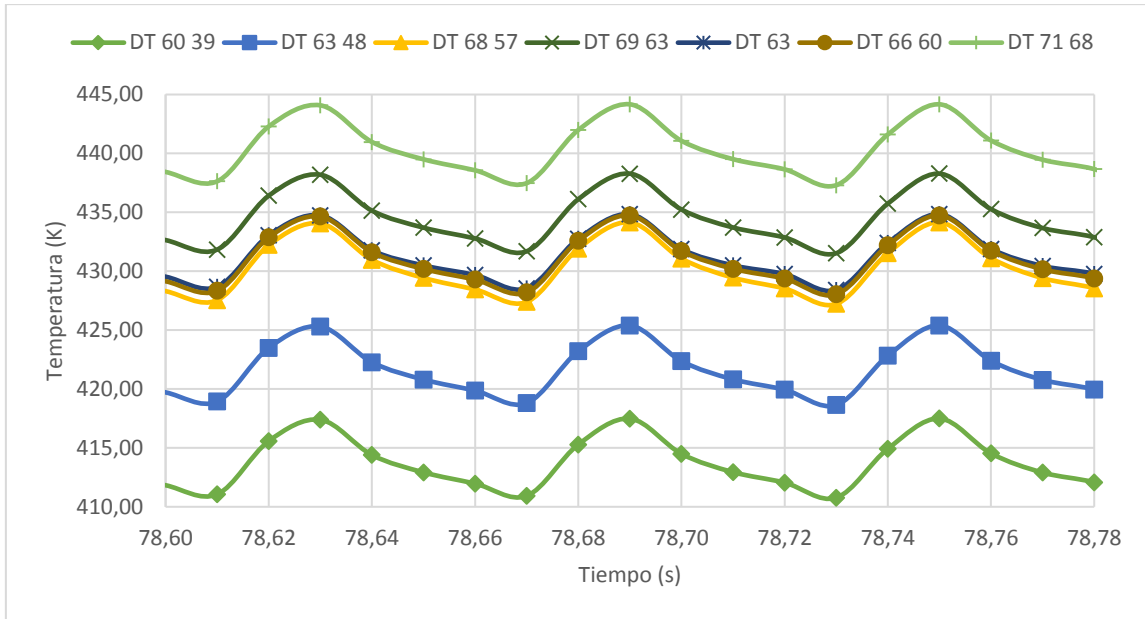
El siguiente caso estudiado es del regenerador de porosidad decreciente en el sentido de valor positivo de velocidad. Su caída de presión se representa en la Grafica 5.17.



Grafica 5.17: Caída de presión en regeneradores de porosidad decreciente

La mayor caída de presión, del valor de 54841.12 (Pa), se observa en el regenerador de porosidades ($\Pi_v = 60\%$; $\Pi_v = 39\%$), con una media entre ellas, del 49.5%. La caída de presión disminuye en el regenerador de porosidades ($\Pi_v = 63\%$; $\Pi_v = 48\%$) y media 55.5%, en un valor de 36%. Una disminución en la caída de presión del 61.79% presenta el regenerador de porosidades ($\Pi_v = 68\%$; $\Pi_v = 57\%$) y una media del 62.5%. El regenerador de porosidades ($\Pi_v = 66\%$; $\Pi_v = 60\%$), y ($\Pi_v = 69\%$; $\Pi_v = 63\%$), presentan una caída de presión similar, cuyo valor es un 72.31% menor que el del regenerador con mayor caída de presión. El regenerador de porosidad uniforme presenta una caída de presión un 77.25% menor que el regenerador de menor porosidad media. Y por último, el regenerador de mayor porosidad media del 69.5%, y compuesto por las porosidades ($\Pi_v = 71\%$; $\Pi_v = 68\%$), presenta una caída de presión del 84.39% respecto del regenerador con mayor caída de presión.

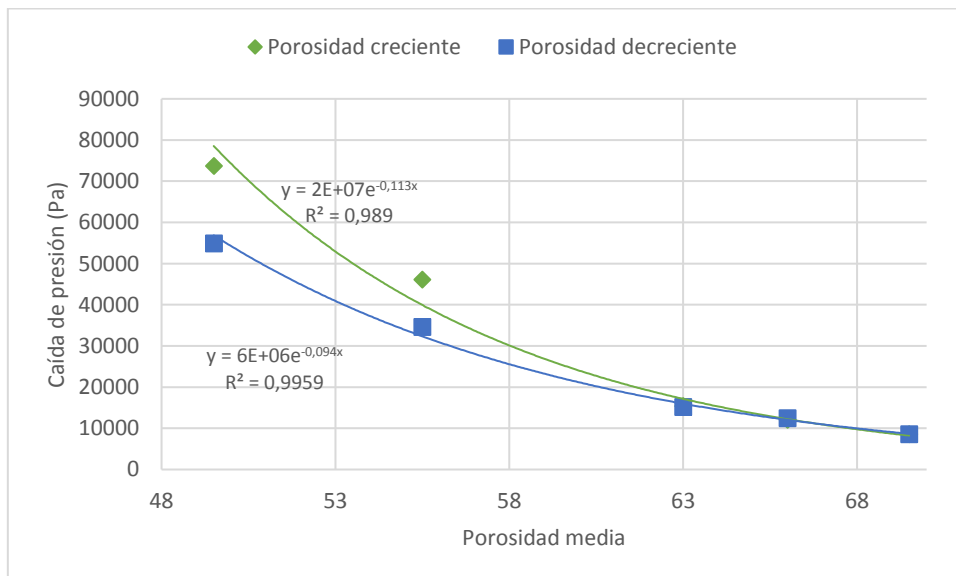
La diferencia de temperatura de los regeneradores de porosidad decreciente en el sentido de valor positivo de velocidad, se representa en la Grafica 5.18



Grafica 5.18: Diferencia de temperatura en regeneradores de porosidad decreciente

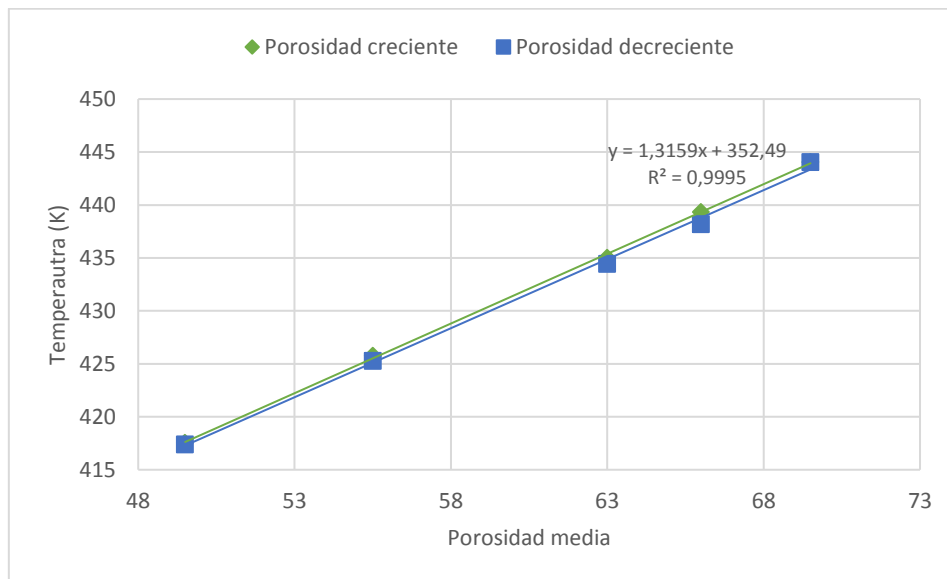
La mayor diferencia de temperatura del fluido de trabajo, entre la entrada y salida del regenerador se observa en aquel que presenta una mayor porosidad media de 69.5%, compuesto por porosidades ($\Pi_v = 71\%$; $\Pi_v = 68\%$), y tiene un valor de 444.08(K). El regenerador de porosidades ($\Pi_v = 63\%$; $\Pi_v = 63\%$), tiene una disminución de diferencia de temperatura de 1.32%. Los regeneradores de porosidad ($\Pi_v = 66\%$; $\Pi_v = 60\%$), y ($\Pi_v = 63\%$), tiene una diferencia de temperatura similar, con un valor 2.12% menor que el regenerador de mayor porosidad. La diferencia de temperatura disminuye un 4.22% en el regenerador compuesto por las porosidades ($\Pi_v = 63\%$; $\Pi_v = 48\%$), y un 6% en el regenerador compuesto por las porosidades ($\Pi_v = 60\%$; $\Pi_v = 39\%$).

En Grafica 5.19 se observa la tendencia de la caída de presión en función de las diferentes porosidades medias. Se observa una tendencia exponencial mayor en el caso de porosidad creciente en el sentido de valor positivo de velocidad. También se observan la similitud para una porosidad media alta.



Grafica 5.19 Tendencia de la caída de presión en regeneradores de porosidad creciente y decreciente

En la diferencia de la temperatura para el caso de porosidad creciente y decreciente no se observa una diferencia significativa. La tendencia de la misma se representa en la Grafica 5.20.



Grafica 5.20 Tendencia de la diferencia de temperatura en regeneradores de porosidad creciente y decreciente

De este modo se observa que la variación de porosidad en un regenerador incrementa la caída de presión y la diferencia de la temperatura, aunque en una medida diferente.

Capítulo 6

Conclusiones y desarrollos futuros

6.1. Conclusiones

Al realizar este estudio se han adquirido las siguientes habilidades:

- Diseño mediante la herramienta de CAD DesignModeler de software Ansys.
- Creación del mallado mediante la herramienta Mesh del software Ansys.
- Creación de UDF mediante lenguaje de programación C++ y lenguaje de programación propio de la herramienta Fluent del software Ansys.
- Simulación de un sistema multifísicos mediante la herramienta Fluent del software Ansys.
- Obtención de datos con la herramienta Results del software Ansys.

Para la realización de los cálculos cuyos resultados se han presentado en este proyecto, se ha necesitado un número aproximado de 598 horas de computación y utilización de dos equipos, el primero con el procesador Intel® Core™ i7, con una memoria RAM de 8 GB, y el segundo con el procesador Intel® Core™ i7, y una memoria RAM de 24 GB.

Se ha realizado un estudio de un regenerador de motor Stirling de porosidad variable. La primera conclusión tras la creación del modelo y realización de los cálculos para la correlación del coeficiente de fricción y el número de Nusselt, es la similitud con los estudios previos y por tanto, la validación del modelo.

Tras su estudio, se ha determinado que un regenerador creado a partir de los filamentos tejidos en forma rectangular, y con una colocación ordenada de sus capas, es equivalente a un medio homogéneo, y es posible su modelado como tal. Para ello se necesitan cuatro valores característicos: el coeficiente de resistencia viscosa, coeficiente de resistencia inercial, coeficiente de transferencia térmica y la porosidad. Los dos primeros términos se obtienen a partir de la ecuación de correlación para el coeficiente de fricción. Es importante destacar que todas las mallas del tipo descrito, se ajustan a una única ecuación de correlación para el coeficiente de fricción. Y de la misma forma, el coeficiente de transferencia térmica para este tipo de mallas, se obtiene a partir de una ecuación común.

Para el estudio de un regenerador de porosidad variable, se ha analizado un regenerador de dos porosidades diferentes. Para dichas porosidades se han utilizado nueve tipos de mallas con sus porosidades correspondientes, combinándolas entre sí de diferentes maneras.

Se ha realizado una comparación entre tres regeneradores cuya característica común es la porosidad media. Las variables analizadas han sido la caída de presión en el regenerador y la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida. El primer regenerador, es de porosidad uniforme. Los otros dos regeneradores analizados, se caracterizan por una porosidad media igual a la del regenerador de porosidad uniforme, pero una configuración distinta de las mallas. Uno de los regeneradores de porosidad variable, se compone de dos

tipos de mallas cuya diferencia es del 11%. La caída de presión en este primer regenerador, de porosidad creciente para el valor positivo de valor de velocidad, es un 50,97% mayor que el sólido de porosidad uniforme. El análisis del mismo sólido, en el sentido decreciente de porosidad para el valor positivo de velocidad, representa una disminución de la caída de presión, aun así, superior a la del regenerador de porosidad uniforme en un 40.45%. En el caso de segundo regenerador de porosidad variable, cuya media comparten, y cuya diferencia entre las porosidades es del 6%, la caída de presión es un 17,84%. En ambos casos las diferencias en las temperaturas del fluido de trabajo, entra la entrada y salida, no superan en 1%. De esta forma se concluye que la porosidad variable aumenta la caída de presión, que aumenta a su vez en función de diferencia entre las porosidades. Y tiene un efecto mínimo en la diferencia de la temperatura del regenerador. Se consigue una disminución de la caída de presión con una diferencia menor entre las porosidades que lo componen. La mejora se presenta con la tendencia del regenerador de porosidad variable a un regenerador de porosidad uniforme.

También se han analizado trece regeneradores de porosidad variable, compuestos por nueve porosidades diferentes. La porosidad media de los regeneradores tiene como mínimo valor el 49.5% y como valor máximo, el 69.5%. Las variables analizadas son la caída de presión y la diferencia de la temperatura en el fluido entre la entrada y la salida del regenerador. Se ha observado una mayor caída de presión en el caso de aumento de porosidad en el sentido de valor positivo de la velocidad, y una menor caída de presión en el caso de porosidad decreciente en el sentido de valor positivo de velocidad. De la misma forma se ha observado una tendencia exponencial en la caída de presión, para el caso de porosidad creciente y decreciente. En la diferencia de la temperatura, no se ha observado una reacción con la porosidad creciente y decreciente. Se llega a la conclusión de que una porosidad decreciente en el sentido positivo de valor de velocidad, presenta un valor menor de la caída de presión, que una porosidad creciente. La caída de presión disminuye de forma exponencial, con el aumento de porosidad, y la diferencia de temperatura aumenta con el aumento de porosidad media.

Se ha observado una caída de presión similar, en regeneradores de porosidad variable y uniforme de diferentes porosidades medias. Indicando con ello la existencia de la relación entre la porosidad media del regenerador, la variación de las mismas, y la diferencia de la porosidad media con la porosidad de un regenerador distinto y de porosidad uniforme. Abriendo con ello una línea de desarrollos futuros.

Para aumentar el rendimiento de un motor Stirling, es necesario disminuir la caída de presión y aumentar la diferencia de la temperatura del fluido de trabajo entre la entrada y salida del regenerador. Dado que la conclusión de presente estudio, es contraria al objetivo para el aumento del rendimiento, no se recomienda el uso de regenerador de porosidad variable, con dos porosidades diferentes.

6.2. Desarrollos futuros

Las necesidades para el aumento de rendimiento del regenerador de motor Stirling incluyen una disminución de caída de presión y un aumento de la diferencia de temperatura el fluido de trabajo. Debido a la obtención de resultados cuya variación depende de numerosos factores se proponen las siguientes líneas futuras:

Aumento de número de porosidades en un mismo regenerador. De esta forma se creará un perfil de porosidades deseado. Algunas de las posibilidades serían un perfil lineal, polinómico, exponencial, etcétera.

Estudio se los distintos perfiles de porosidades con aplicación de valor positivo de velocidad en diferentes sentidos.

Una configuración simétrica de distintas porosidades y distintos perfiles de las mismas.

Estudio de relación entre regeneradores de porosidad uniforme y variable, de diferentes porosidades medias, que presentan unas caídas de presión y diferencia de temperaturas, similares.

Estudio de comportamiento de distintas porosidades, número y su configuración ante diferentes condiciones de contorno.

Para un aumento de diferencia de temperatura se propone, además de una variación de porosidad, la utilización de distintos materiales en la construcción de la malla.

Con las combinaciones propuestas se pretende aumentar la diferencia de la temperatura y disminuir la caída de presión, aumentando con ello el rendimiento del regenerador.

Como último objetivo se propone, en vista de las numerosas posibilidades, un análisis adimensional de las porosidades y distribuciones de la malla del regenerador.

Bibliografía

- [1] S. C. Costa Pereira, *Numerical characterization study of pressure drop and heat transfer phenomena in woven wire matrix of a Stirling engine regenerator*, 2014.
- [2] D. Gedeon y J. G. Wood , «Oscillating-Flow Regenerator Test Rig: Woven Screen and Metal Felt Results.» NASA-CR-190689, Ohio, 1992.
- [3] M. Planelles, «Las emisiones de gases de efecto invernadero seguirán creciendo,» EL PAIS Internacional, Madrid, 2015.
- [4] M. Planelles, «¿Se acabó la gasolina?,» EL PAIS, 2017.
- [5] L. Abellan, «Europa pacta reducir un 40% las emisiones en 2030 y más renovables,» El PAIS Internacional, Bruselas , 2014.
- [6] P. Guimón, «Reino Unido vive su primer día sin carbón desde la Revolución Industrial,» EL PAIS, Londres, 2017.
- [7] J. A. Montañez, «Las energías renovables son la segunda revolución industrial,» EL PAIS, Barvelona , 2009.
- [8] K. Suleng, «Escocia pone en marcha el primer parque eólico flotante del mundo,» EL PAIS Tecnología, 2017.
- [9] «La energía solar: la gran conquista del 2017,» Economía, 2016.
- [10] M. Pérez Oliva, «El Gobierno no ama las energías renovables,» EL PAIS Opinion, 2017.
- [11] M. V. O Jea, «¿Es la energía solar suficiente para iluminar el mundo?,» EL PAIS Internacional, Buenos Aires, 2017.
- [12] S. d. e. d. energía, «www.minetad.gob.es,» 2015. [En línea]. Available: http://www.minetad.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/Energia_2015.pdf. [Último acceso: Noviembre 2017].
- [13] S. D. Wison , R. W. Dyson, R. C. Tew y M. Ibrahim, «Multi-D CFD Modeling of a Free-Piston Stirling Convertor at NASA,» NASA/TM-2004-213351, Ohio, 2004.
- [14] M. B. Ibrahim, Z. R. Tew, D. Gedeon y T. Simon, *CFD Modelling of Free Piston Stirling Engine*, Ohio, 2001.
- [15] T. Knowles, «Composite-MATRIX Regenerator for Stirling Engines,» USA:NASA, 1997.
- [16] K. Wang, S. R. Sanders, S. Dubey, F. . H. Choo y F. Duan, «Stirling cycle engines for recovering low and moderate temperature heat,» *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, pp. 89-108, 2016.
- [17] M. H. Almadi, M. A. Ahmadi, F. Pourfayaz, A. Mellit y M. Feidt, «Thermodynamic analysis and multi objective optimization of performance of solar dish Stirling engine by the centrality of

- entransy and entropy generation,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, pp. 88-95, 2016.
- [18] P. H. Ceperley, «A pistonless Stirling engine-The raveling wave heat engine,» *Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 1508-1513, 1979.
- [19] W. A. Steyert, «Stirling-cycle rotating magnetic refrigerators and heat engines for use near room temterature,» *Journal of Applied Physics*, pp. 1216-1226, 1978.
- [20] C. Cinar, S. Yucezu, T. Topgul y M. Okur, «Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure,» *Applied Energy*, pp. 351-357, 2005.
- [21] M. H. Ahmadi, M.-A. Ahmadi y F. Pourfayaz, «Thermal models for analysis pf performance od Stirling engine: A review,» *Renewable & Susainable Energy Review*, pp. 168-184, 2016.
- [22] G. J. Wood, *Status of free-piston Stirling technology at sunpower*, 2003.
- [23] «tecmotor.wordpress.com,» 26 marzo 2012. [En línea]. Available: <https://tecmotor.wordpress.com/2012/03/26/motores-stirling-tipos-raros/>.
- [24] Z. Wu, G. Yu, L. Zhang, W. Dai y L. Ercang, «Development of a 3kW double-acting thermoacoustic Stirling electric generator,» *Applied Energy*, pp. 866-872, 2014.
- [25] «www.certificadosenergeticos.com,» [En línea]. Available: <http://www.certificadosenergeticos.com/micro-cogeneracion-viviendas-generar-agua-caliente-electricidad>. [Último acceso: 13 Noviembre 2017].
- [26] H. Dang, «Development of high performance moving-coil linear compressor for space Stirling-type pulse tube cryocoolers,» *Cryogenics*, pp. 1-18, 2015.
- [27] J. Sauer y H.-D. Kuehl, «Numerical model for Stirling cycle machines including a differential simulation of the appendix gap,» *Applied Thermal Engineering*, pp. 819-833, 2016.
- [28] V. Punnathanam y P. Kotecha, «Multi-objective oprimization of Stirling engine system using Front-base Yin-Yang-Pair Optimization,» *Energy Conversion and Management*, pp. 332-348, 2016.
- [29] A. C. Ferreira, M. L. Nunes, J. C. Teixeira, L. A. Martins y S. F. Teixeira, «Thermodynamic and economic optimization of a solar-poweres Stirling engine for micro-cogeneration purposes,» *Energy*, pp. 1-17, 2016.
- [30] J. Prieto, «Dimencionamiento del motor Stirling y revisión de sus aplicaciones marinas,» *Ingeniería Naval*, pp. 365-372, 2003.
- [31] A. Organ, «The Regenerator and the Stirling Engine,» *Mechanical Engineering Publication*, 1997.
- [32] «EHE Efficient Home Energy,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.ehe.eu/>.
- [33] M. Tanaka, I. Yamashita y F. Chisaka, «Flow and Heat Transfer characteristics of the Stirling Engine Regenerator in an Oscillating Flow,» *JSME International Journal*, pp. 283-289, 1990.
- [34] R. Gheith, F. Aloui, M. Tazerout y S. B. Nasrallah, «Experimental investigations of a gamma Stirling engine,» *International Journal of Energy Research*, pp. 1175-1182, 2012.

- [35] B. Wischnewski, «www.peacesoftware.de,» [En línea]. Available: http://www.peacesoftware.de/einigewerte/luft_e.html. [Último acceso: Noviembre 2017].
- [36] Z. J. Hu, Z. Y. Li, Q. Li y Q. Li, «Evaluation of thermal efficiency and energy conversion of thermoacoustic Stirling engines,» *Energy Conversion and Management*, pp. 802-812, 2010.
- [37] S. Ovidiu, «www.greenoptimistic.com,» 2008. [En línea]. Available: <https://www.greenoptimistic.com/deka-revolt-stirling-engine-car-20081111/#.Wgm6SkgZPIU>. [Último acceso: octubre 2017].