



CENTRO POLITÉCNICO SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
INGENIERÍA INDUSTRIAL



DETERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES Y
DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CÁLCULO DE
TRANSFERENCIA DE CALOR Y PÉRDIDA DE CARGA
EN INTERCAMBIADORES PARA MACI

AUTOR: JULIO IGNACIO GONZÁLEZ BUESA
DIRECTOR: JOSÉ MARÍA MARÍN HERRERO



Valeo Térmico Motor
Zaragoza



Departamento de Ingeniería Mecánica
Área de Máquinas y Motores Térmicos

MENCIÓN: ENERGÍA Y TECNOLOGÍA DE CALOR Y FLUIDOS

ABRIL 2011; CURSO 10/11

A mi familia, amigos y a Coral por
todo el apoyo a lo largo de estos años.

Agradecer también a todo el
personal de Valeo su dedicación.

RESUMEN

Este proyecto se ha llevado a cabo en la empresa Valeo Térmico S.A. Al inicio del mismo se encontraba disponible un programa de cálculo de prestaciones para la tecnología Irene3 (tubos lisos) pero, como trabajo inicial, debía ser revisado ya que presentaba diversos fallos y también se debía traducir toda la interfaz al idioma inglés. Actualmente se ha desarrollado una nueva tecnología en intercambiadores de calor llamada Greco basada en tubos rectangulares con perturbadores de dos formas diferentes: Herringbone y Offset strip fin. Esto crea la necesidad de desarrollar otro programa informático de cálculo de prestaciones para esta nueva tecnología que permita aproximar parámetros como potencia, eficiencia o pérdidas de carga en el lado gas.

El objetivo principal del proyecto es desarrollar este programa de cálculo de prestaciones para la tecnología Greco, más concretamente, el trabajo se compone de varias partes:

- En un trabajo previo se traduce toda la interfaz del programa de cálculo Irene3 (tubos lisos) al idioma inglés y se modifican ciertas partes del programa existente que no calculan correctamente o lo hacen con excesivo error.
- Se clasifican los ensayos disponibles para su observación, se modifican y se adecúan desestimando los que no proporcionan datos coherentes y construyendo y ensayando nuevos prototipos, contando con la opinión tanto del taller de prototipos como del laboratorio de ensayos.
- Para la nueva tecnología, se revisa la bibliografía para obtener los sistemas de ecuaciones que determinan el intercambio de calor y pérdidas de carga en cuyo cálculo se basa el núcleo de éste proyecto. Se conocen como Greco (tubos con perturbador) y utilizan dos tipos de perturbadores diferentes que deben quedar perfectamente definidos: Herringbone y Offset strip fin.
- Se modifica el programa de cálculo de ensayos para adaptarlo a la tecnología Greco. Éste se encarga de recoger la información de los ensayos y calcular y extraer los datos necesarios para realizar los ajustes con el programa Mathcad.
- Se realizan los algoritmos para Mathcad que por iteración obtendrán los coeficientes que se han dejado libres para ajustar las ecuaciones de Nusselt y el factor de fricción que define las pérdidas de carga lineales.
- Con las ecuaciones completamente conocidas se procede a desarrollar el programa de cálculo de prestaciones para la tecnología Greco.
- Como punto final se elabora un manual de usuario, en español e inglés, que permita utilizar el programa de cálculo de prestaciones y que recoja la metodología para una futura actualización del mismo ante la aparición de nuevos ensayos o incluso nuevas tecnologías.

Para implantar el programa se ha utilizado programación en Visual Basic para Excel, ya que permite una fácil interpretación visual y el lenguaje de programación es muy utilizado. Para los ajustes de las correlaciones de las ecuaciones que determinan el comportamiento del intercambiador se ha utilizado el programa Mathcad, desarrollando las ecuaciones con el método de iteración por mínimos cuadrados.

Se incluye también un estudio de los errores del programa de cálculo respecto a los ensayos disponibles para las modificaciones introducidas en la tecnología Irene3 y para Greco.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen	3
Tabla de contenidos	5
1. Introducción	7
1.1 Definición de EGRC	7
1.2 Entorno y trabajo previo	7
1.3 Objetivo y alcance	8
1.4 Contenido de la memoria	9
2. Tratamiento de los resultados experimentales	10
2.1 Fabricación y ensayo de prototipos	10
2.2 Adecuación de los ensayos	12
2.3 Clasificación y filtrado de resultados	12
3. Caracterización de la tecnología Greco	14
3.1 Cálculo de la resistencia térmica	15
3.2 Perturbador Offset strip fin	17
3.3 Perturbador Herringbone	19
4. Programa de cálculo de ensayos Greco	22
5. Ajuste de correlaciones	25
5.1 Algoritmo de iteración para ajuste de coeficientes	25
5.2 Resultados obtenidos	26
6. Modificación del programa de cálculo de prestaciones Irene3	27
7. Programa de cálculo de prestaciones Greco	28
7.1 Procedimiento de construcción	28
7.1.1 Algoritmo	29
7.1.2 Simplificaciones y particularidades	30
7.2 Estructura en Visual Basic	30
7.3 Interfaz con el usuario y posibilidades de cálculo	31
7.3.1 Pestaña datos geométricos	32
7.3.2 Pestaña dimensionamiento del intercambiador	33
7.3.3 Pestaña gráfica de prestaciones	35
7.4 Errores del programa	37
7.4.1 Rango de validez	37
7.4.2 Errores programa de cálculo de prestaciones	38
8. Conclusiones y perspectivas	39
9. Bibliografía	40
10. Nomenclatura	41

11. Anexos	43
11.1 Tabla de normativa de emisiones contaminantes	43
11.2 Errores de modificación del programa de Cálculo de prestaciones Irene3	44
11.2.1 Eficiencia Irene3	44
11.2.2 Pérdidas de carga Irene3	46
11.3 Errores de programa de cálculo de prestaciones Greco	47
11.3.1 Eficiencia perturbador OSF	47
11.3.2 Pérdida de carga perturbador OSF	59
11.3.3 Eficiencia perturbador Herringbone	68
11.3.4 Pérdida de carga perturbador Herringbone	69
11.4 Manual de usuario	
11.4.1 Castellano	70
11.4.2 Inglés	94
11.5 Filtrado y comparación de ensayos	118
11.6 Cálculo de propiedades termodinámicas	121
11.7 Distribución de caudales y velocidades	125
11.8 Tablas para elección del coeficiente de pérdidas singulares	127
11.9 Algoritmos utilizados en Mathcad	130
11.9.1 Eficiencia	131
11.9.2 Pérdida de carga	134

NOTA: Las referencias a un texto concreto de la bibliografía aparecen reflejadas en el texto entre corchetes []

1. INTRODUCCIÓN

1.1 EGRC

En la actualidad se presta especial atención a las emisiones contaminantes a la hora de diseñar un automóvil. La Comunidad Europea impone normas cada vez más restrictivas al respecto (actualmente a punto de entrar en vigor la Euro6 [tabla 6 en anexo 11.1]) que limitan la cantidad de las sustancias contaminantes a la salida del escape. Los óxidos de nitrógeno (NO y NO_2) son uno de los más contaminantes ya que tienen serias repercusiones sobre el medio ambiente y la salud de las personas.

Una de las formas de reducir la producción de estos óxidos de nitrógeno, sobre todo en motores diesel en los que no son eliminados por catalizador, es la recirculación del gas de escape. Parte del volumen de gas que se expulsaría al exterior se deriva a un EGRC (exhaust gas recirculation cooler) como se aprecia en la figura 1. Este intercambiador de calor compacto enfriá el gas, consiguiendo así que ocupe menos volumen, para ser introducido de nuevo al motor junto con la mezcla tradicional en la admisión. Esto reduce la temperatura total alcanzada en la combustión y el nivel de oxígeno provocando una disminución del NOx producido y emitido a la atmósfera. Aunque influye negativamente en aspectos como potencia, la producción de partículas, etc. También tiene otros muchos aspectos positivos como la reducción de picos de temperatura en la combustión, detonaciones y precombustiones.

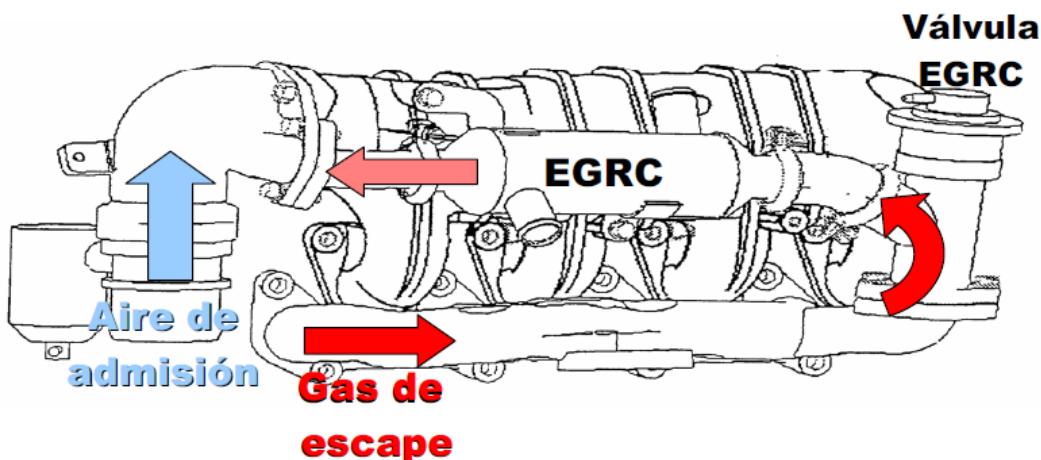


Figura 1. Ejemplo EGR en entorno motor

La cantidad de masa recirculada dependerá del régimen de funcionamiento del motor. En momentos como el arranque se deberá evitar la recirculación de gases refrigerados para que se produzca el encendido y calentamiento correctamente, en cambio en otras fases se deberá recircular parte de los gases de escape para conseguir el efecto descrito.

1.2 ENTORNO Y TRABAJO PREVIO

Ante la necesidad de conocer las prestaciones de estos intercambiadores para unas condiciones de caudal, presión y temperatura impuestas, y ante la imposibilidad de fabricar esa gran cantidad de prototipos, surge la necesidad de desarrollar un programa informático que simule los resultados. A nivel de diseño los valores más utilizados son la eficiencia y las

pérdidas de carga en el lado gas que se consiguen en función de unas condiciones de entrada. Al comienzo de este proyecto existía un programa de cálculo de prestaciones para la tecnología Irene3 (tubos lisos) que debe ser revisado debido a la existencia de errores no admisibles en muchos casos, mientras que para la tecnología que se está imponiendo actualmente, llamada Greco, se debe realizar el programa completo partiendo sólo de los ensayos realizados hasta ese momento.

La evolución constante de la normativa provoca la necesidad continua de actualizar la tecnología de los intercambiadores. Así, como se ha indicado, la utilizada en la actualidad en Valeo Térmico y base de este proyecto es la tecnología Greco (Figura 2) de tubos rectangulares con perturbador cuya configuración y geometría se puede consultar en el apartado 3.



Figura 2. Intercambiador Greco

1.3 OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO

El objetivo de este trabajo es actualizar los programas utilizados para la tecnología Irene3, así como desarrollar en Visual Basic un programa de cálculo de prestaciones para la tecnología Greco con dos tipos distintos de perturbadores. Para ello se estudia la bibliografía para obtener las ecuaciones que definen a estos perturbadores y que permitan el cálculo con unos errores menores del 5% para eficiencia y de 5mbar para pérdidas de carga. Para este programa también se elabora un manual de usuario que facilite la utilización del programa y que incluye una guía que permita la futura actualización de estas herramientas (Anexo 11.7). Este trabajo ha intentado ceñirse a una metodología que sea fácil de seguir para futuras actualizaciones del programa. Esto también se ha tenido en cuenta, como se expondrá posteriormente, a la hora de escribir las líneas de código y la agrupación de variables para facilitar el trabajo.

Para lograr los objetivos ha sido muy útil el contacto diario con el departamento de I+D de la empresa así como con el taller de prototipos y el laboratorio de ensayos para adquirir los conocimientos necesarios sobre esta tecnología.

El programa pretende tener validez para calcular cualquier intercambiador con distintas longitudes, número de tubos, geometría de perturbador, caudales de gas y refrigerante, condiciones de entrada,... Siempre que se trabaje dentro de los rangos de validez el error será

conocido, mientras que fuera de estos rangos, el programa se ha diseñado para realizar los cálculos pero el error no será conocido.

1.4 CONTENIDO DE LA MEMORIA

La memoria se estructura en varios apartados que representan los pasos seguidos para la realización del programa para la tecnología Greco, aunque como se verá para la modificación del programa disponible para Irene3 también se siguió esta metodología:

El apartado 2 se dedica al tratamiento de los datos provenientes de los ensayos que ha sido necesario tanto para la revisión del programa de cálculo Irene3 como para la realización del programa para Greco. Se organizan y observan los ensayos para observar las necesidades de nuevas solicitudes y estudiar los resultados para los programas existentes para ambas tecnologías y así detectar errores o incoherencias en los mismos.

En el siguiente apartado se realiza un estudio de la bibliografía tanto para definir el intercambiador y las ecuaciones que rigen el comportamiento del mismo como de los perturbadores utilizados y su geometría.

El apartado 4 se dedica a la modificación del programa de cálculo de ensayos para adaptarlo a la tecnología Greco. El objetivo es utilizarlo para obtener los documentos Excel que alimentarán al programa Mathcad para realizar las iteraciones de las correlaciones partiendo de los ensayos disponibles. La dificultad radica en obtener el menor error que calcula correctamente todos los parámetros como se verá.

En el siguiente apartado se exponen los algoritmos utilizados para obtener las correlaciones del número de Nusselt y el factor de fricción con el programa Mathcad y la metodología de trabajo seguida.

Posteriormente en el apartado 6, se comprueba el código de programación del programa de cálculo de prestaciones de Irene3 hasta detectar los fallos y se procede al cálculo de nuevas correlaciones en los casos en los que el error es excesivo.

En el séptimo apartado y con las ecuaciones completamente definidas se desarrolla el programa de cálculo de prestaciones para la tecnología Greco y, por último, se exponen los resultados y conclusiones obtenidas.

En los anexos se incluye por una parte un documento con la normativa de emisión de contaminantes, un documento Excel con el estudio de los errores que se obtienen con el programa respecto a los resultados de ensayo, el manual de usuario redactado en castellano e inglés y que incluye una guía para futuras actualizaciones, la metodología seguida para el filtrado y comparación de ensayos, las fórmulas y tablas para el cálculo de propiedades termodinámicas y coeficientes de pérdidas de carga singulares y los algoritmos utilizados en el programa Mathcad para ajustar las correlaciones.

2. TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

2.1 FABRICACIÓN Y ENSAYO DE PROTOTIPOS

Para conocer las prestaciones de un EGR es necesaria la fabricación y ensayo de prototipos. Estos prototipos se realizan con el mismo material que los de la producción en serie, pero con la salvedad de que el proceso de montaje y soldadura se realiza manualmente. Es necesario un estudio previo de los ensayos disponibles así como de las longitudes y tecnologías que van a ser más utilizadas para limitar al máximo las peticiones de los prototipos, debido a su alto coste.

Una vez el prototipo está terminado, para medir sus prestaciones se utiliza el banco del laboratorio de ensayos (Figura 3). Se introducen los fluidos de trabajo a la temperatura y presión seleccionadas haciendo variar gradualmente el caudal de gas, habitualmente, entre 5 y 25 g/s. y esperando a alcanzar condiciones estacionarias para realizar las medidas.

Las condiciones estándar de ensayo son:

-Fluido caliente: Aire

Temperatura: 280°C

Presión: 3 bar

-Fluido frío: Agua-Glicol (65-35 %)

Temperatura: 80°C

Caudal: 800 l/h

Las condiciones de ensayo pueden y deben variarse para tener un abanico de resultados lo más amplio posible, pero han de hacerlo en un rango determinado, ya que los compresores no pueden trabajar por encima o debajo de determinados valores de temperatura, presión o caudal. De esta forma se consigue aumentar el rango de validez de los resultados obtenidos e incluso que la simulación varíe correctamente fuera de estos rangos de estudio, aunque como se ha mencionado en ese caso el error no estará acotado.

La instalación está dotada de unos sensores que recogen las temperaturas y presiones de los fluidos a la salida. Estos datos quedan recogidos en un archivo Excel, asignando a cada fila un instante de medida, en el que se reflejan los datos captados a la entrada y salida del intercambiador. Los técnicos del laboratorio realizan un informe estandarizado a partir de estos datos, con un ajuste por representación gráfica que aproxima los puntos no medidos en el banco (Figura 4). De esta forma se consigue evitar pequeños errores originados por la precisión del instrumental pero como se explicará también estas aproximaciones gráficas pueden crear problemas a la hora de trabajar con los datos.



Figura 3. Banco de ensayos

De esta forma todos los ensayos están normalizados y se facilita el trabajo a la hora de extraer esos datos y trabajar con ellos. En este proyecto se ha creado una hoja Excel llamada: Programa de cálculo de ensayos Greco (apartado 5) que permite extraer directamente los datos que se necesitan para ajustar las correlaciones con el programa Mathcad (apartado 6).

Figura 4. Ejemplo de resultado de ensayo

2.2 ADECUACIÓN DE LOS ENSAYOS

Antes de comenzar a trabajar con los ensayos hay que asegurar que los mismos no van a introducir errores en los cálculos posteriores. En ocasiones puede ocurrir que aparezcan en la hoja de datos filas en blanco, datos claramente fuera de rango que no son coherentes con los demás o incluso que la interpolación de los puntos en los que no se realiza medida resulte errónea (por ejemplo pueden aparecer datos para caudales bajos con eficiencias superiores al 100% debido a estas interpolaciones).

El trabajo previo incluye detectar estos errores en los ensayos que, aunque no son muy comunes, pueden falsear todos los cálculos posteriores y subsanarlos incluso con el cálculo de las propiedades manualmente si es necesario.

2.3 CLASIFICACIÓN Y FILTRADO DE RESULTADOS

Se crea un archivo Excel con comparaciones de los ensayos en eficiencia y pérdida de carga en el lado gas. Se realizan diferentes gráficas con variaciones en número de tubos, longitudes, distintos caudales de refrigerante, condiciones de entrada, etc. Se puede consultar el resultado de alguna de estas comparativas en el anexo 11.5.

De ésta forma se pueden detectar a simple vista los ensayos que contienen algún tipo de error o con resultados que no resultan coherentes con el resto, como por ejemplo, aquellos que aumentando la longitud, con el resto de condiciones constantes, proporcionan valores de eficiencia menores. Es importante entender los fenómenos termodinámicos suceden en éstos intercambiadores y, si es necesario, revisar la bibliografía para conocer cómo debe variar una magnitud al modificar los valores de entrada.

Antes de descartar un ensayo se verifica con el taller de prototipos y el laboratorio de ensayos si ocurrió alguna anomalía en el proceso que justifique esas variaciones (perturbador defectuoso, mala soldadura, fallo del compresor durante el ensayo, etc.) Tras tomar las decisiones de aceptación-rechazo hay que decidir para cuáles se van a fabricar nuevos prototipos o se va a repetir el ensayo. Como se ha explicado se intenta cubrir el mayor rango posible de variaciones en las condiciones de entrada y en las geometrías.

Tras esto se repite el proceso con los nuevos ensayos para detectar errores. En la tabla 1 se pueden observar los ensayos que se encontraban disponibles en la base de datos y los que se consideró que debían ser realizados o repetidos, cuyos prototipos fueron pedidos al taller. Como se ha expuesto se intentó que en varios de los ensayos hubiera variaciones de caudal de refrigerante, condiciones de entrada, etc. y que hubiera una muestra suficiente de cambios en la geometría del perturbador para reducir el error al iterar para ajustar los coeficientes, por eso para alguna longitud se repitieron ensayos variando el perturbador o su geometría.

El perturbador OSF va a ser el más utilizado por lo que como es lógico el mayor número de ensayos solicitados fue con este perturbador.

Algunos de los ensayos que aparecen en la tabla 1 después fueron rechazados y no se incluyen en el estudio de errores del anexo 11.3.

		LONGITUD(mm)									
		100	125	130	140	150	170	174,4	180	200	220
Nº TUBOS	8	blue	orange				light green		orange	blue	orange
	10	blue	blue	orange			orange		orange	orange	orange
	12	orange	orange	orange		light green	orange	orange	blue	orange	orange
	16	blue	orange	blue	orange	red	orange	blue	orange	light green	orange
	18	blue	orange	orange		red	orange	orange	orange	orange	orange
	20	light green	orange	light green	orange	light green	orange	light green	light green	red	orange
	10+10		orange	orange	orange	light green	orange	orange	blue	orange	orange
	12+10				light green	orange	orange	orange	orange	orange	orange
	18+15				light green	pink	pink	pink	pink	pink	blue
█ ensayo repetido o por repetir █ disponible █ nuevo											

Tabla 1. Ensayos disponibles y solicitados

Hay casos en los que tras detectar los resultados anómalos y consultar con el taller de prototipos y el laboratorio de ensayos, es imposible detectar las razones de esos resultados e incluso la realización de nuevos ensayos no aclara las dudas. En esos casos no se podía descartar el ensayo y sólo más ensayos en el futuro permitirán reducir el error y detectar los ensayos no válidos.

3 CARACTERIZACIÓN DE LA TECNOLOGÍA GRECO

El intercambiador de tecnología Greco consta de una serie de tubos de sección rectangular introducidos en una virola, también rectangular, por la que circula el refrigerante. En el interior de estos tubos y para favorecer el intercambio térmico, se insertan perturbadores y una placa de Ni cuya función es evitar huecos que harían descender el rendimiento.

Como se ha mencionado la tecnología Greco utiliza dos perturbadores diferentes: el conocido como Offset strip fin (figura 5), en adelante llamado OSF, y el perturbador Herringbone o de aletas onduladas (figura 6).

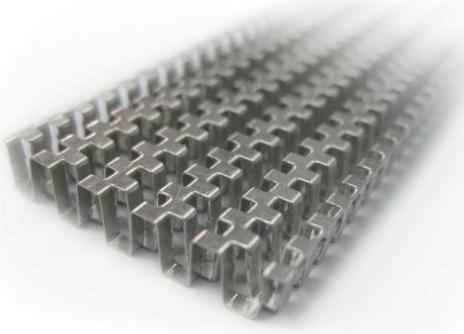


Figura 5. Perturbador OSF

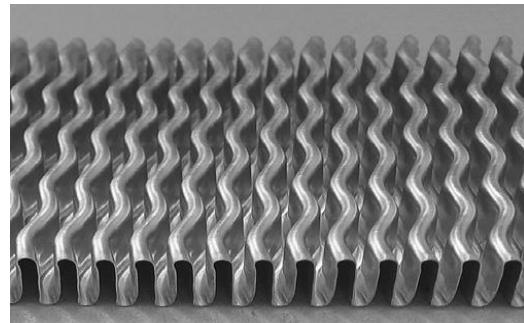


Figura 6. Perturbador Herringbone

Se trata de una evolución de las anteriores tecnologías Irene3 (tubos lisos) y Pegaso (placas apiladas con perturbador) que ya están en desuso debido a sus menores prestaciones.

A su vez el intercambiador con esta tecnología puede tener la configuración clásica en I, con un paso para ambos fluidos y con los mismos circulando a contracorriente, o en U, en la que el gas realiza un paso mientras que el refrigerante realiza dos, uno a contracorriente y otro en paralelo. En esta última configuración se consigue evidentemente mayor eficiencia pero también se produce una gran pérdida de carga.

En este apartado se muestran las ecuaciones que definen el comportamiento de ambos. Conocidas la temperatura, presión y caudal de los fluidos de trabajo a la entrada, así como la geometría, dimensiones y materiales del intercambiador se debe determinar la temperatura y presión de los fluidos que obtendríamos a la salida. Esto se traduce en conocer la resistencia térmica que se ofrece a la transmisión de calor entre los fluidos y la pérdida de carga que se origina.

El objetivo primordial con el que se diseña un EGRC es conseguir unas determinadas prestaciones. Lo habitual es que el cliente solicite un diseño imponiendo unas condiciones de temperatura, presión y caudal en los fluidos a la entrada, y exige unas determinadas condiciones a la salida, que se traducen en eficiencia térmica, potencia y pérdida de carga:

- Eficiencia y Potencia Térmica:

La eficiencia térmica se calcula como la relación que existe entre la variación de temperatura que experimenta el fluido caliente al atravesar el intercambiador, y el máximo salto térmico que podríamos alcanzar: la diferencia de temperaturas de entrada entre fluido caliente y frío.

$$E = \frac{\dot{m}_{\text{gas}} * C_{p,\text{gas}} * \Delta T_{\text{gas}}}{\dot{m}_{\text{gas}} * C_{p,\text{gas}} * \Delta T_{\text{entrada}}} = \frac{T_{e,\text{gas}} - T_{s,\text{gas}}}{T_{e,\text{gas}} - T_{e,\text{agua}}}$$

Por eso se utiliza la eficiencia cuando se quieran definir las prestaciones de un intercambiador y de aquí en adelante se entenderá por prestaciones la eficiencia térmica y la pérdida de carga. La razón de utilizar el término de eficiencia en lugar de la potencia se debe a que la primera se mantiene prácticamente constante independiente de la T^a de entrada de gas que utilicemos en el intercambiador, lo cual resulta muy útil para comparar diferentes EGRC. La única dependencia notable de la eficiencia será con el caudal de gas.

- Pérdida de carga:

Los fluidos que atraviesan el intercambiador experimentan una disminución en su presión debida a la fricción con las paredes, cambios de sección en la entrada, codos, etc. La pérdida de carga (ΔP) se expresa como la diferencia entre la presión a la entrada y a salida del intercambiador.

Es interesante mencionar que pérdida de carga y eficiencia entran habitualmente en conflicto de intereses al modificar algunos parámetros del intercambiador. Tendremos que alcanzar un compromiso que consiga cumplir los requisitos establecidos para ambas.

3.1 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TÉRMICA

Para llegar a conocer la temperatura de salida hemos de calcular primero la resistencia total que el intercambiador ofrecerá a la transmisión de calor desde el gas de escape al líquido refrigerante. En este trabajo se ha supuesto que el caudal de gas se reparte de forma uniforme por todos los tubos al atravesar el intercambiador (ver anexo 11.7).

Despreciando la transferencia de calor longitudinal a lo largo del intercambiador podemos definir el modelo unidimensional descomponiendo el cálculo en varias resistencias térmicas en serie [1] y [2]. El gas de combustión cederá su calor por convección a las paredes del EGRC que estén en contacto con él (perturbador y tubo). La placa de Ni y las paredes metálicas (con la capa de hollín, si la hubiese) conducirán el calor hasta la parte exterior del tubo, donde se transmitirá el calor por convección al refrigerante.

El estudio de la bibliografía y la experiencia previa muestran que puede despreciarse la transmisión de calor desde el fluido refrigerante a la carcasa del intercambiador y desde ésta al exterior, así como la de resistencia de ensuciamiento en el lado refrigerante por tratarse de un circuito cerrado en condiciones normales de funcionamiento. Las relaciones de magnitud enseñan que la más determinante es la resistencia de convección del gas, por lo que se tratará a ésta con especial atención para reducir el error en el cálculo.

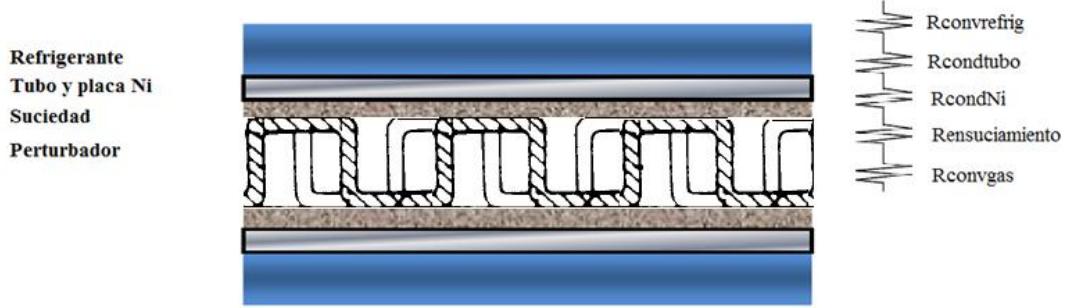


Figura 7. Sistema de resistencias con perturbador OSF.

$$R_{total} = R_{convgas} + R_{ensuciamiento} + R_{condplacaNi} + R_{condtubo} + R_{convrefrig}$$

Para el cálculo de las resistencias (Figura 7), que se ha hecho igual en ambos perturbadores, se ha tomado en consideración un tubo completo, teniendo en cuenta su geometría y todos los elementos en serie, para posteriormente hacer el cálculo del intercambiador completo con todos los tubos.

$$UA = \frac{1}{R_{total/ntubos}}$$

Para el cálculo de estas resistencias es necesario conocer el factor de convección (h) que a su vez puede expresarse en función del diámetro hidráulico, el número de Nusselt, el rendimiento total por la presencia del perturbador y la conductividad del gas:

$$R_{convgas} = \frac{1}{h * A} = \frac{Dh}{\eta_{total} * \lambda_{gas} * Nu_{gas} * A_{interc}}$$

El diámetro hidráulico es función de factores geométricos y por eso, como se mostrará más adelante, será diferente dependiendo del perturbador utilizado, aunque por definición será igual para un offset de la aleta o para un tubo si se definen las áreas correctamente:

$$Dh = \frac{4 * A_{paso}}{P_{hid}}$$

Lo mismo ocurre con la ecuación del rendimiento total, depende de parámetros geométricos y del rendimiento de la aleta por lo que será diferente según el perturbador utilizado:

$$\eta_{total} = 1 - \frac{A_{aleta}}{A_{total}} * (1 - \eta_{aleta})$$

$$\eta_{aleta} = \frac{\tanh(m * l)}{m * l}$$

El número de Nusselt será, junto con el factor de fricción, el factor cuya ecuación se dejará con coeficientes libres para ajustar y así reproducir el intercambio de calor y pérdida de

carga con mayor exactitud. También se obtienen diferentes ecuaciones según el tipo de perturbador.

Respecto a la resistencia de conducción se necesita el espesor del tubo o la placa de Ni que se utiliza con ésta tecnología, la conductividad del material y el área:

$$R_{cond} = \frac{\text{espesor}}{\lambda * A_{cond}}$$

Para la resistencia de ensuciamiento es necesario conocer el factor de ensuciamiento que para los valores predeterminados de ensayo se ha fijado en $0.002 \text{ m}^2 * \text{k/W}$ y el área de ensuciamiento:

$$R_{ensuciamiento} = \frac{f_{ens}}{A_{ens}}$$

Para la convección en el lado refrigerante se utiliza la ecuación de Gnielinski [2] y [4]:

$$R_{convagua} = \frac{1}{h * A} = \frac{Dh_{agua}}{\lambda_{agua} * Nu_{agua} * A_{interc}}$$

$$Dh_{agua} = \frac{4 * (A_{pasovirola} - A_{tubos})}{Ph_{virola} + Ph_{tubos}}$$

$$Nu_{agua} = 0.012 * (Re^{0.87} - 280) * Pr^{0.4} * [1 + (Dh/L)]^{\frac{2}{3}} * (Pr/Prs)^{0.11}$$

Los cálculos del número de Reynolds y el resto de propiedades pueden consultarse en el anexo 11.7.

Es importante mencionar que debido a la variación de temperaturas de los fluidos a lo largo del intercambiador, y tras consultar la bibliografía [1], [3]-[6] se ha trabajado a lo largo de todo este documento, por su sencillez para iterar, con el método de las temperaturas logarítmicas:

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

$$\Delta T_{1_contraflujo} = T_{egas} - T_{sagua}$$

$$\Delta T_{1_paralelo} = T_{egas} - T_{eagua}$$

$$\Delta T_{2_contraflujo} = T_{sgas} - T_{eagua}$$

$$\Delta T_{1_paralelo} = T_{sgas} - T_{sagua}$$

3.2 PERTURBADOR OFFSET STRIP FIN (OSF)

El perturbador que se encuentra dentro del tubo se comporta como una aleta a efectos del intercambio de calor. Las ecuaciones han sido extraídas de las referencias [7] y [13] de la bibliografía.

Para definir geométricamente este perturbador se utilizan las variables que se ven en la figura 8. Con la salvedad de que en el programa se introduce un paso completo = 2 *s +2 *t y el programa calcula el valor de s para realizar los cálculos.

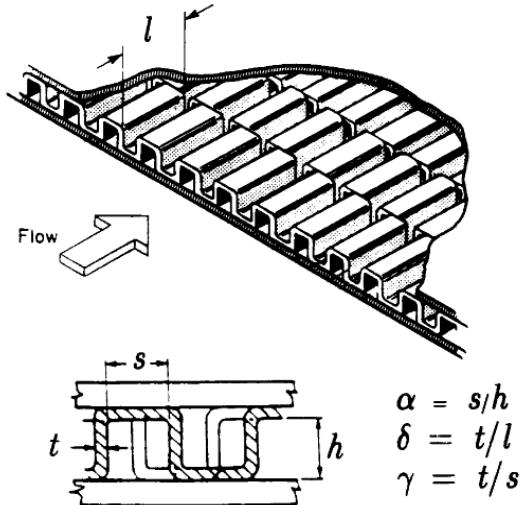


Figura 8. Geometría del perturbador OSF

A partir de éstas variables se puede proceder al cálculo del resto de variables necesarias. Para un “offset” aislado:

$$A_{\text{aleta}} = [(s * t) + (2 * h * t) + (2 * h * l) + (s * l)]$$

$$A_{\text{total}} = A_{\text{aleta}} + A_{\text{pared}} = A_{\text{aleta}} + s * l$$

Con las dimensiones del tubo se pueden conocer el número de celdas por tubo y calcular las áreas totales de un tubo.

De igual forma con este perturbador el diámetro hidráulico:

$$Dh = \frac{4 * A_{\text{paso}}}{Ph} = \frac{4 * A_{\text{paso}}}{A_{\text{total}}/l} = \frac{4 * s * h * l}{[(s * t) + (2 * h * t) + (2 * h * l) + (s * l)]}$$

Para la ecuación del rendimiento de la aleta necesaria para el cálculo del rendimiento total cómo se ha explicado:

$$l = \frac{h - t}{2}$$

$$m = \left(\frac{2 * h}{\lambda * t} * \left(1 + \frac{t}{l} \right) \right)^{\frac{1}{2}}$$

Falta definir las ecuaciones en las que se dejan los coeficientes libres y que posteriormente serán ajustadas para representar, con el menor error posible, el intercambio de calor y la pérdida de carga (α , δ y γ definidas en la figura 8). Para el ajuste del intercambio de calor:

$$Nu_{\text{gas}} = j * Re * Pr^{1/3}$$

$$j = A * Re^a * \alpha^b * \delta^c * \gamma^d$$

Y para la pérdida de carga, debido a que no se tiene el utilaje necesario para realizar ensayos a un tubo aislado y separar así las pérdidas lineales y singulares, la metodología seguida es calcular teóricamente las pérdidas singulares y después, a partir de los ensayos en los que se

miden las pérdidas de carga totales, obtener las pérdidas de carga lineales para ajustar los coeficientes como se indicará más adelante.

$$\Delta P_{lineal} = \Delta P_{totales} - \Delta P_{singulares}$$

$$\Delta P_{lineal} = 4 * f * (10/9.8) * \left(\frac{L}{Dh}\right) * \left(\frac{G^2}{2 * \rho}\right)$$

$$f = A * Re^a * \alpha^b * \delta^c * \gamma^d$$

$$\Delta P_{singulares} = k * \left(\frac{8 * \dot{m}^2 * 10}{9.8 * \pi^2 * Dh^4 * \rho} \right)$$

Tolva de entrada con cambio de sección, de tubo circular a virola rectangular:

$$tg(\alpha/2) = \left(\frac{2 * (a * b / \pi)^{1/2} - D}{2 * l} \right)$$

Con ese ángulo a partir de la tabla (anexo 11.8) se obtiene el valor de ϕ , después se puede calcular el coeficiente para el colector de entrada:

$$k = \phi * \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$$

En los giros de la configuración en U para producir las mínimas pérdidas de carga se necesita: radio de giro constante y sin aristas vivas (producen la mayor parte de las turbulencias sobre todo en la cara interior), pero esto raras veces se cumple debido a la asimetría del intercambiador en U que sí se ha tenido en cuenta en este trabajo. Sin aristas el criterio de mínima pérdida de carga es que $r_e = r_i + D$.

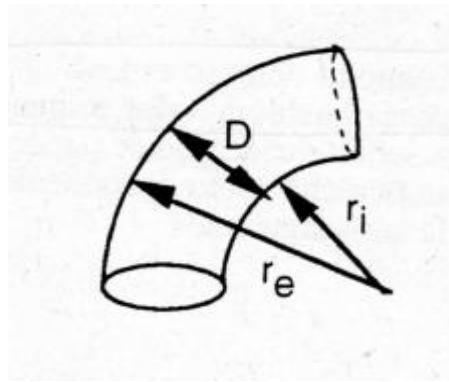


Figura 9. Giro de configuración en U

3.3 PERTURBADOR HERRINGBONE

Para el estudio de este perturbador se ha recurrido a las ecuaciones de los artículos [9], [10] y [12] de la bibliografía. Es posible aproximar la geometría sinusoidal de este perturbador por una triangular, mucho más fácil de definir y calcular, con un error pequeño [12].

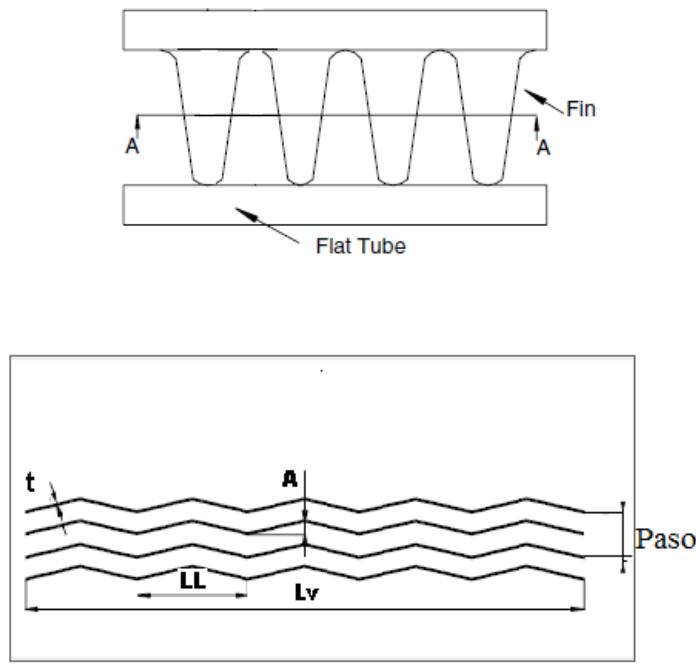


Figura 10. Geometría del perturbador Herringbone

Para simplificar los cálculos las variables geométricas, que se pueden observar en la figura 10, se han llamado igual para este perturbador. Para cada paso:

$$A_{aleta} = [(2 * h * long) + (s * long)]$$

$$A_{total} = A_{aleta} + A_{pared} = A_{aleta} + s * long$$

Como se menciona anteriormente con las dimensiones del tubo se pueden conocer el número de celdas por tubo y calcular las áreas totales de un tubo.

De igual forma con este perturbador el diámetro hidráulico:

$$D_h = \frac{4 * A_{paso}}{Ph} = \frac{4 * A_{paso}}{A_{total}/l} = \frac{4 * s * h}{[(2 * h) + (2 * s)]}$$

Para la ecuación del rendimiento de la aleta necesaria para el cálculo del rendimiento total cómo se ha explicado:

$$l = \frac{h}{2}$$

$$m = \left(\frac{2 * h}{\lambda * t} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Como en el apartado anterior para definir las ecuaciones con los coeficientes libres y para su posterior ajuste con el menor error posible el intercambio de calor y la pérdida de carga, se utiliza:

$$Nu = j * Re * Pr^{1/3}$$

$$j = A * Re^a * \alpha^b * \delta^c * \gamma^d$$

Con la salvedad de que ahora:

$$\alpha = \frac{s}{h} \quad \delta = \frac{s}{A} \quad \gamma = \frac{Lv}{LL}$$

Y para la pérdida de carga tanto las ecuaciones como la metodología de cálculo son las mismas que con el perturbador OSF.

4 PROGRAMA DE CÁLCULO DE ENSAYOS GRECO

Tras el estudio de la bibliografía para obtener las ecuaciones que regulan cada tecnología y con todos los ensayos disponibles que cubren el mayor rango de intercambiadores posibles se puede pasar a ajustar, con el programa Mathcad, los coeficientes que se han dejado libres en la ecuación de Nu y f. Para ello y ante la necesidad de insertar una serie de datos para comenzar a iterar, se crea un documento Excel que partiendo de los ensayos, y con una simple interfaz con el usuario para añadir geometría y número de tubos, permita extraer hojas Excel con los datos que alimentarán al programa Mathcad.

Para facilitar el trabajo, se ha desarrollado de tal forma que el mismo programa sirve para los perturbadores OSF y Herringbone y permite utilizar sin variaciones el mismo algoritmo en Mathcad para ambos perturbadores. Así únicamente habrá que cambiar el algoritmo de iteración según se vaya a ajustar la ecuación de Nusselt o la del factor de fricción. Para ello las variables que son iguales en ambos perturbadores se calculan directamente y las que difieren se han agrupado en forma de constantes (k1, k2, etc.). Con esto se consigue que al seleccionar el perturbador el programa directamente calcule las constantes adecuadas y se puede utilizar las mismas ecuaciones de intercambio de calor y pérdida de carga para ambos perturbadores, así como el mismo algoritmo de Mathcad.

Por tanto, se deben extraer con el programa datos diferentes en función de qué variable se vaya a ajustar (Figuras 11 y 12). Tras cargar los datos del ensayo, se introducen los datos del perturbador y se comienza el cálculo. La interfaz guía al usuario por los datos a introducir y alerta si falta alguno. Para extraer sólo hay que pulsar el botón creado para ello diferenciando cual es la ecuación que se va a ajustar para extraer los datos oportunos. En el anexo 11.5, dentro del manual de usuario, se puede consultar la estructura y utilización de esta herramienta.

Aunque en este trabajo no se incluyen los cálculos de pérdida de carga en el lado refrigerante el programa de cálculo de experimentos si está preparado para calcular y extraer los datos necesarios si se considera oportuno.

Mediante este programa se pueden actualizar las correlaciones existentes para estos perturbadores siguiendo los pasos indicados o insertar nuevas tecnologías mediante la modificación de la programación para realizar los cálculos y extraer las variables apropiadas.

Los datos calculados para ajustar la ecuación de Nusselt, ya en las unidades apropiadas, son:

resultados de ensayo + geometría del intercambiador

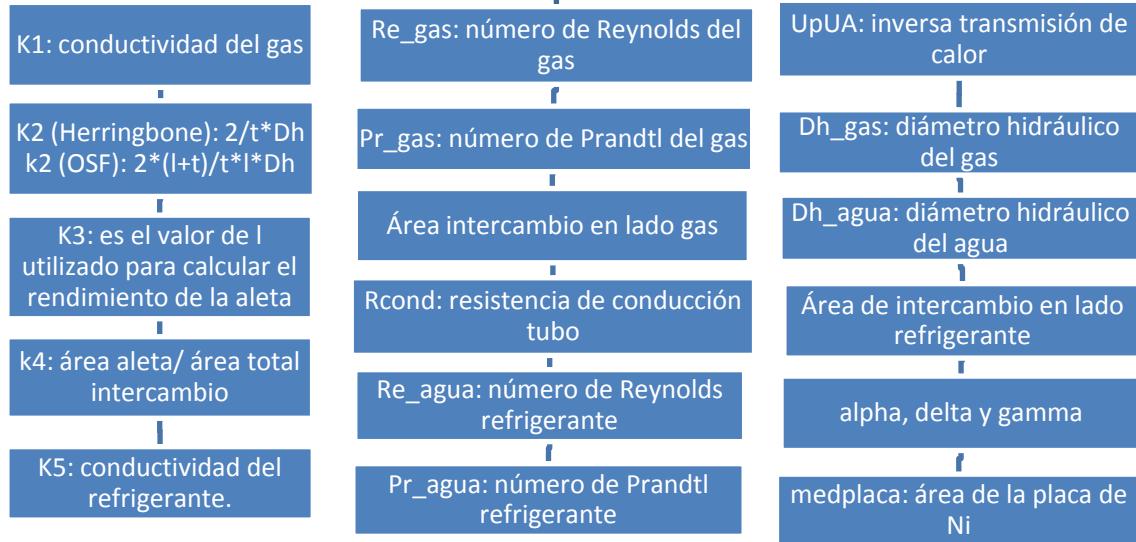


Tabla 2. Variables calculadas para ajuste de Nu

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	k1	k2	k3	k4	area	Re_gas	Rcond	K5	Re_agua	Pr_agua	1/UA	L1	Dh_agua	Dh_gas	
2	0,03729622	3891354,25		0,0023	0,86194072	0,02752441	35460,6201	0,00158564	0,48532027	1797,30015	34,4816791	0,02203682	0,2	0,00506574	0,01325365
3	0,03729622	3891354,25		0,0023	0,86194072	0,02752441	35541,6999	0,00158564	0,48532027	1802,04422	34,4816791	0,02198655	0,2	0,00506574	0,01325365
4	0,03729622	3891354,25		0,0023	0,86194072	0,02752441	35518,2315	0,00158564	0,48532027	1803,01453	34,4816791	0,02200108	0,2	0,00506574	0,01325365
5	0,03729622	3891354,25		0,0023	0,86194072	0,02752441	35622,5452	0,00158564	0,48532027	1802,22391	34,4816791	0,02193665	0,2	0,00506574	0,01325365
6	0,03729786	3891354,25		0,0023	0,86194072	0,02752441	35594,6858	0,00158564	0,48532027	1795,0952	34,4816791	0,02194863	0,2	0,00506574	0,01325365
7	0,03729622	3891354,25		0,0023	0,86194072	0,02752441	35604,5256	0,00158564	0,48532027	1791,54958	34,4816791	0,02194775	0,2	0,00506574	0,01325365
8	0,03701687	3891354,25		0,0023	0,86194072	0,02752441	26319,2399	0,00158564	0,48513037	1784,8293	34,5848619	0,02490269	0,2	0,00506574	0,01325365
9	0,03701687	3891354,25		0,0023	0,86194072	0,02752441	26319,2399	0,00158564	0,48513037	1784,8293	34,5848619	0,02490269	0,2	0,00506574	0,01325365
10	0,03701687	3891354,25		0,0023	0,86194072	0,02752441	26366,3436	0,00158564	0,48513037	1784,27668	34,5848619	0,0248582	0,2	0,00506574	0,01325365
11	0,03701813	3891354,25		0,0023	0,86194072	0,02752441	26398,3349	0,00158564	0,48513037	1784,56187	34,5848619	0,02482424	0,2	0,00506574	0,01325365
12	0,03701854	3891354,25		0,0023	0,86194072	0,02752441	26381,9778	0,00158564	0,48513037	1782,70838	34,5848619	0,02487257	0,2	0,00506574	0,01325365
13	0,03701679	3891354,25		0,0023	0,86194072	0,02752441	26301,4244	0,00158564	0,48513037	1782,22510	34,5848619	0,02465152	0,2	0,00506574	0,01325365

Figura 11. Extracción de datos para ajustar Nu

Los datos extraídos, con las unidades ya transformadas, para ajustar el factor de fricción son:

resultados de ensayo + geometría del intercambiador

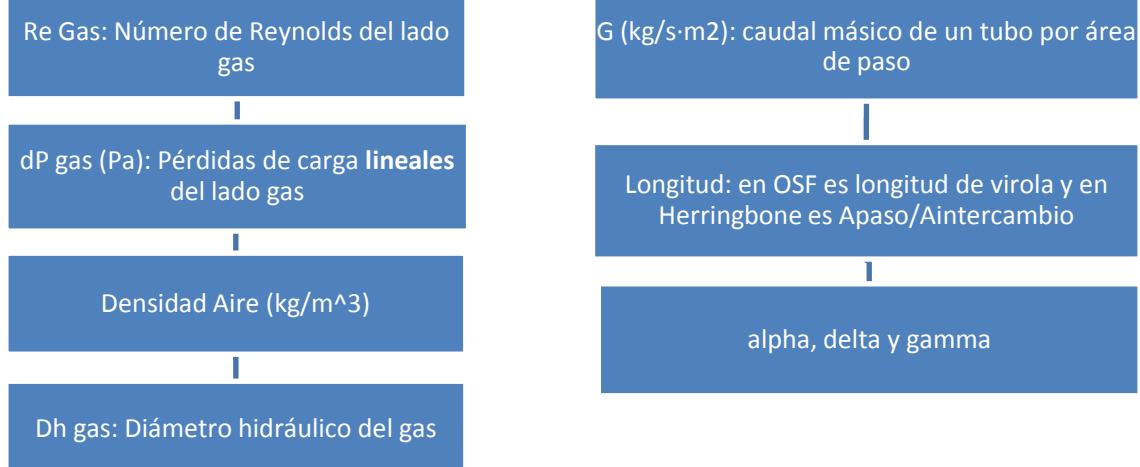


Tabla 3. Variables extraídas para ajuste de f

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "fg - Microsoft Excel" with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Longitud	G (kg/seg*m)	Dh_gas	inv_densidad	Re_gas	dP_lineal (Pa)	alpha	delta	gamma			
2	0,2	33,484901	0,00265074	0,43739102	35460,6201	3351,54998	0,39583334	0,03149606	0,10526316			
3	0,2	33,5614672	0,00265074	0,43739102	35541,6999	3407,24813	0,39583334	0,03149606	0,10526316			
4	0,2	33,539306	0,00265074	0,43739102	35518,2315	3394,20712	0,39583334	0,03149606	0,10526316			
5	0,2	33,6378091	0,00265074	0,43739102	35622,5452	3394,71649	0,39583334	0,03149606	0,10526316			
6	0,2	33,6131805	0,00265074	0,43741195	35594,6858	3386,22345	0,39583334	0,03149606	0,10526316			
7	0,2	33,6207882	0,00265074	0,43739102	35604,5256	3397,85684	0,39583334	0,03149606	0,10526316			
8	0,2	24,6426051	0,00265074	0,43022634	26319,2399	1913,97777	0,39583334	0,03149606	0,10526316			
9	0,2	24,6426051	0,00265074	0,43022634	26319,2399	1913,97777	0,39583334	0,03149606	0,10526316			
10	0,2	24,6867089	0,00265074	0,43022634	26366,3436	1910,81024	0,39583334	0,03149606	0,10526316			
11	0,2	24,7176021	0,00265074	0,43022634	263900,2240	1912,47202	0,39583334	0,03149606	0,10526316			

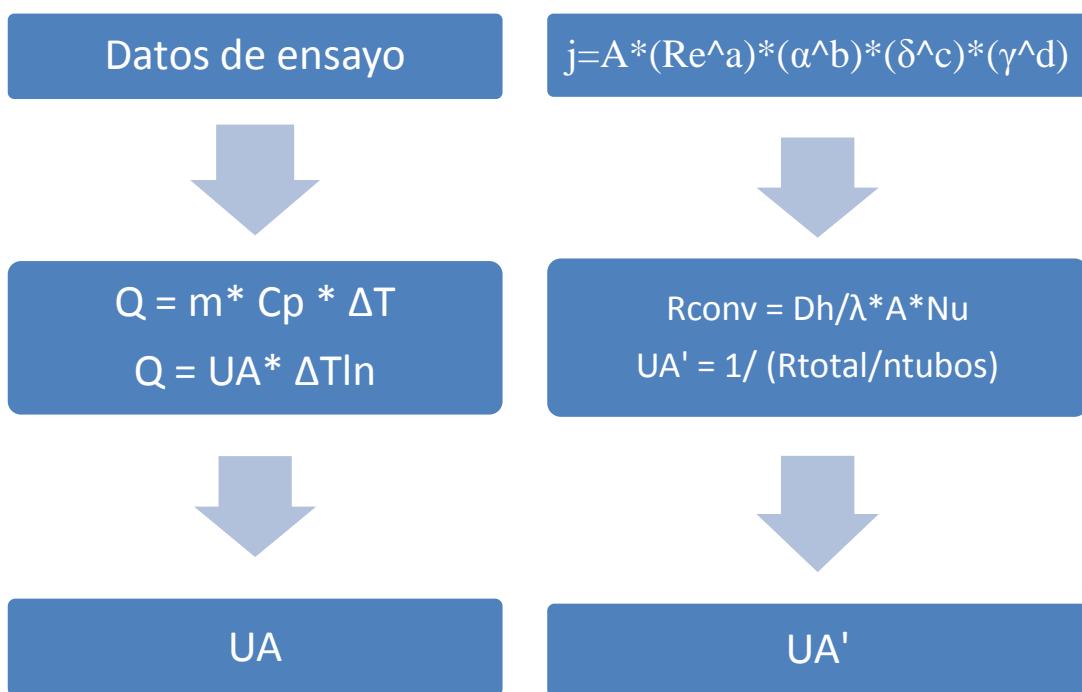
Figura 12. Extracción de datos para ajuste del factor de fricción

5. AJUSTE DE LOS COEFICIENTES CON EL PROGRAMA MATHCAD

5.1 ALGORITMO DE ITERACIÓN PARA AJUSTE DE LOS COEFICIENTES

En este apartado se muestra el proceso de cálculo de los coeficientes para las correlaciones de Nusselt y el factor de fricción para la pérdida de carga lineal en el lado gas. Con ayuda del software Mathcad se construyen dos algoritmos, para ambas correlaciones, que como se ha explicado son válidos para los dos perturbadores. Cada uno de los algoritmos calcula el valor de los coeficientes que minimicen el sumatorio de los errores cometidos por el sistema de ecuaciones propuesto respecto a los valores reales extraídos de los de los ensayos.

En el Anexo 11.9 se pueden consultar los algoritmos completos para Mathcad, a modo de ejemplo veremos una síntesis del modo en que se calculan para la Resistencia térmica ya que la iteración para obtener la ecuación de las pérdidas de carga seguiría el mismo esquema:



Con el archivo proveniente del programa de cálculo de ensayos se han obtenido, a partir de los ensayos, todos los valores de las variables necesarias para el cálculo. Los valores desconocidos son los coeficientes que determinan la ecuación del número de Nusselt y por tanto la resistencia de convección.

Mathcad procede entonces a iterar, a partir de unos valores iniciales, los valores de los coeficientes A, a, b, c y d comparando los valores reales obtenidos de los ensayos con los calculados a partir del sistema de ecuaciones.

Los coeficientes obtenidos son los que, por mínimos cuadrados, minimizan el sumatorio de los restos de esta diferencia para cada uno de los puntos de medida tomados en cada uno de los ensayos:

$$UA - UA' = 0$$

En el algoritmo para el cálculo de las pérdidas de carga lo que se obtiene de los ensayos son las pérdidas de carga lineales que, de la misma forma, se iteran hasta reducir el error respecto a los cálculos con las ecuaciones ajustadas.

Es probable que la solución que proporcione el mínimo error no sea la óptima. Se debe tener mucho cuidado a la hora de seleccionar los valores iniciales de las variables ya que puede que dos soluciones den un error similar y sean muy diferentes entre sí a la hora de comportarse ante cambios de alguna otra variable. Antes de comenzar hay que observar los ensayos y la bibliografía citada para cada perturbador y ver cómo varían para así saber cómo será, más o menos, nuestra solución. Por ejemplo, si se observa que al incrementar un espesor t otra variable r se reduce, entonces se sabe que la relación será de la forma: $r = t^{-a}$ y se deben buscar los valores iniciales que nos den esta relación.

5.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Este método de ajuste tiene como objetivo la reducción del error, utilizando unos coeficientes propios para cada perturbador. Se ha observado que para el cálculo del número de Nusselt, una misma correlación puede ser utilizada para un rango determinado de números de tubo y para todas las longitudes. Esto es debido a que al aumentar el número de tubos la distribución del caudal es cada vez más desigual como ya se ha comentado, mientras que en las ecuaciones se ha supuesto una distribución igual para todos los tubos.

Sin embargo, para las pérdidas de carga y con el objetivo de reducir el error, se ha utilizado una correlación para cada número de tubos e incluso en algún caso se ha introducido un factor corrector según la longitud que se esté calculando. La medición de las pérdidas de carga en el laboratorio de ensayos ha demostrado ser muy complicada, por lo que los resultados presentan mayor variabilidad.

Los coeficientes obtenidos se omiten en este documento por motivos de confidencialidad.

6. MODIFICACIÓN DEL PROGRAMA DE CÁLCULO DE PRESTACIONES PARA IRENE3

La metodología de trabajo expuesta hasta este punto es la que se ha seguido para la elaboración del programa para la tecnología Greco. Como se ha comentado, antes de comenzar a trabajar con esta nueva tecnología, era necesario revisar el programa disponible para la tecnología Irene3, con la que también se siguió esta misma forma de trabajo.

De esta forma, tras la familiarización con el lenguaje de programación de Visual Basic y el estudio de su geometría y ecuaciones, se pasó a revisar el programa de cálculo de prestaciones de Irene3. Se detectó en la empresa la necesidad de ajustar esta programación ante la aparición de errores que impedían una parte de los cálculos para los que estaba diseñado el programa, así como la necesidad de traducirlo a inglés debido al carácter internacional de la misma.

Se comenzó por repasar toda la programación para las tecnologías Irene3 y Pegaso. A partir de ahí se observó algún error en la definición de la geometría y áreas, así como la utilización de una ecuación del número de Reynolds incorrecta. Por otra parte se revisó la opción de cálculo sin refrigerar los gases de escape, mediante el cual, se calculan solamente las pérdidas de carga. Al intentar este cálculo el programa daba un error y no permitía llevarlo a cabo. Tras la revisión del código se detectó un fallo de programación al cargar los valores antes de realizar los cálculos y se solucionó.

Como se ha indicado, parte del trabajo realizado en este programa incluía la traducción de toda la interfaz al idioma inglés. Se aprovechó también para añadir información que los ingenieros de Valeo Térmico necesitaban tener visible al hacer los cálculos. En la hoja de resultados se incluyó el refrigerante utilizado, errores aparecidos durante el cálculo, geometría utilizada, etc. También se añadieron alertas por si se estaba calculando fuera del rango para el que el programa se había diseñado y en los que el error no es conocido.

Tras esto, ante la realización de nuevos ensayos desde la elaboración del programa, se observó que el error para el cálculo de la tecnología Irene3 en el caso de 22 tubos y con longitudes de virola entre 150 y 180 mm. era demasiado elevado por lo que se procedió al ajuste de una correlación específica para estas longitudes con la metodología que se explica en los apartados 2 (modificación de ensayos), 4 (extracción de datos pero en este caso con el programa de cálculo de ensayos Irene3) y 5 (ajuste Mathcad):

Media error previa	Media error obtenido con modificación
5,32 %	2,175 %

Tabla 4. Errores tras modificación Irene3

Se puede consultar en el anexo 11.2 los errores concretos obtenidos y en el anexo 11.7, dentro del manual de usuario, una guía con la metodología seguida para la actualización de correlaciones o inclusión de nuevas tecnologías.

7. PROGRAMA DE CÁLCULO DE PRESTACIONES GRECO

7.1 PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN

Una vez calculados los coeficientes ya se tienen todas las ecuaciones para proceder a construir el programa de cálculo que simule el comportamiento de los intercambiadores con la tecnología Greco. El problema se reduce a conocer los valores de las variables a la salida a partir de unos determinados datos de entrada.

Aunque se ha tratado a lo largo de este documento el cálculo de resistencias térmicas y pérdida de carga de forma paralela, ya que el procedimiento para obtener sus ecuaciones es similar, la realidad es que es necesario calcular siempre la primera para poder conocer la segunda, y para ello es esencial conocer las temperaturas a la salida del intercambiador.

La bibliografía técnica especializada utiliza la temperatura media de los fluidos para el cálculo de las propiedades de gas y refrigerante, por tanto, es necesario conocer la temperatura de salida de ambos fluidos antes de poder iniciar los cálculos. Así, se ha diseñado el programa para calcular por iteración estas temperaturas de salida a partir de un valor inicial y cumpliendo siempre el principio de que el calor absorbido por el refrigerante será igual al cedido por el gas.

7.1.1 Algoritmo

- *Paso 0 (INICIO):* Se estiman unas temperaturas de salida de los fluidos.

- *Paso 1:*

Con ellas se calcula la variación de temperatura logarítmica. Al mismo tiempo se obtiene UA a través de las resistencias térmicas (el cálculo de las resistencias se ha expuesto en el apartado 2): con éstas Tm se calculan las propiedades de los fluidos que intervienen en las resistencias de convección.

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

$$\Delta T_{1,contraflujo} = T_{egas} - T_{sagua}$$

$$\Delta T_{1,paralelo} = T_{egas} - T_{eagua}$$

$$\Delta T_{2,contraflujo} = T_{sgas} - T_{eagua}$$

$$\Delta T_{1,paralelo} = T_{sgas} - T_{sagua}$$

$$UA = 1 / \left(\sum R / n_{tubos} \right)$$

- *Paso 2:*

Se obtiene la potencia por la transferencia de calor producida, debida a la resistencia térmica que separa los fluidos y el salto térmico que se produce entre ellos, con las temperaturas de salida supuestas:

$$Q = UA * \Delta T_{ln}$$

- *Paso 3:*

Esta potencia deberá ser igual a la calculada por variación de entalpia de cualquiera de los dos fluidos. Se sustituye la potencia y se obtienen los valores de Tsgas' y Tsagua':

$$Q = \dot{m}_{gas} * Cp_{gas}(T_{mgas}) * \Delta T_{gas'}$$

$$Q = \dot{m}_{refrig} * Cp_{refrig}(T_{mrefrig}) * \Delta T_{refrig'}$$

Estas temperaturas quedan determinadas a partir de los parámetros calculados con las Ts establecidas inicialmente.

- *Paso 4:*

Comparación de las temperaturas estimadas Ts con las obtenidas Ts'

- *Paso 5:*

Si las temperaturas Ts y Ts' se diferencian entre sí más de una tolerancia fijada, se redefinen las Temperaturas de salida consideradas en el paso 0 y se comienza de nuevo a iterar.

- *(FIN):*

En la iteración en que la diferencia entre Ts y Ts' sea menor a la tolerancia, se han conseguido las temperaturas de salida que proporcionaría el intercambiador, dadas sus características dimensionales y geométricas, al trabajar con los fluidos en unas determinadas condiciones a la entrada.

En el caso de la configuración en U se aplica este algoritmo para obtener la solución del primer paso a contracorriente y con los datos de estas variables de salida ya se conocen los valores de entrada del segundo paso en paralelo.

7.1.2 Simplificaciones y particularidades

Hay que resaltar las particularidades del algoritmo de cálculo visto en el apartado anterior.

La mayor eficiencia se obtiene en la configuración a contracorriente [1] y [2], por lo que por defecto se supone que el intercambiador tendrá esta configuración. Por otra parte, como se ha indicado para la configuración en U y debido a la situación de las tomas del refrigerante se considera el primer paso a contracorriente y el segundo en paralelo. Pero no lo es en las mismas condiciones que en un intercambiador en I ya que el refrigerante es compartido y simultáneo para ambos tramos, contracorriente y paralelo. Por ello se utiliza un factor corrector (referencia [2]) para corregir este hecho, que para esta tecnología se ha cifrado en $f = 0.9$.

Aunque debido a la geometría de los perturbadores los flujos no son exactamente a contracorriente o paralelo, los errores por tomar esta aproximación, como se indica en la bibliografía [7] y [13], son despreciables.

7.2 ESTRUCTURA EN VISUAL BASIC

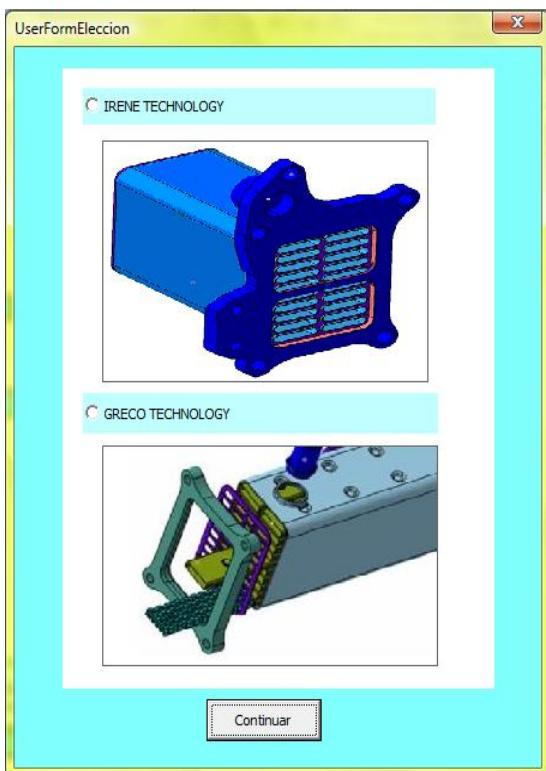


Figura 13. Selección de tecnología.

Para la realización del programa se ha utilizado programación en Visual Basic. Ésta es sencilla de comprender y permite realizar una interfaz que permita al usuario modificar datos y realizar los cálculos de manera cómoda e intuitiva.

Por sencillez y compactidad, tras la realización del programa de cálculo de prestaciones Greco, éste se unió al disponible para el cálculo de la tecnología Irene3. De esta forma, mediante una ventana al iniciar el programa se selecciona la tecnología (Figura 13) y se accede al programa apropiado.

El programa desarrollado se ha estructurado en (Figura 14):

- Hojas Excel, visibles si muestran los resultados al usuario (tablas y gráficos) u ocultas y protegidas con contraseña si contienen datos y correlaciones que el programa carga al hacer alguna selección. Aquí se pueden modificar las correlaciones para una futura actualización o variar los datos si hay cambios geométricos o se generalizan geometrías no usadas hasta el momento.

- Formularios: contienen las ventanas que van apareciendo para interactuar con el usuario y permitir la introducción de datos. Proporcionan un soporte al programa, guían al usuario pidiendo todos los datos necesarios y asignan los mismos para los cálculos.

- Módulos: Contienen todo lo necesario para realizar los cálculos y las iteraciones. Se dividen en funciones y procedimientos. La principal diferencia es que mientras las funciones realizan los cálculos y devuelven un valor, los procedimientos realizan los cálculos asignando valor a variables pero sin devolver una solución concreta.

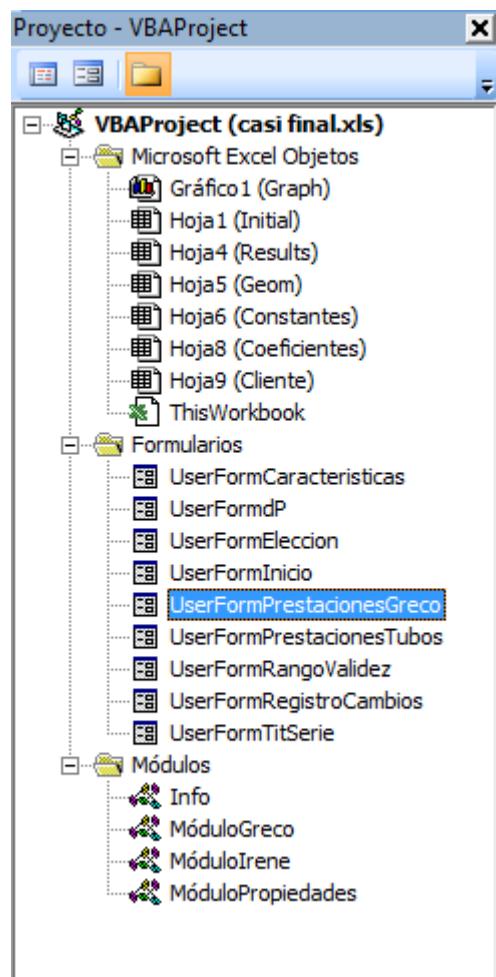


Figura 14. Estructura en Visual Basic

7.3 INTERFAZ CON EL USUARIO Y POSIBILIDADES DE CÁLCULO

La programación con Visual Basic permite crear una serie de formularios desde los que introducir datos o proponer al usuario valores predeterminados, creando de esta forma, la estructura del programa y guiando al usuario con los datos a introducir.

En el inicio del programa son tres las posibilidades existentes: consultar el rango de validez o el control de cambios y comenzar los cálculos. Al comenzar el cálculo la primera acción a realizar es la selección de la tecnología con la que se desea trabajar: Irene3 o Greco, ya que ambos programas se han implantado en un documento común.

Ya dentro del programa de cálculo para la tecnología greco, la información se reparte en tres pestañas: cálculo de gráficas, datos geométricos y dimensionamiento del intercambiador.

En primer lugar se debe completar la pestaña de datos geométricos. En ella se seleccionan el número de tubos y el tipo de perturbador y automáticamente se cargan los datos que dependen de éstos parámetros, apareciendo en una ventana en forma de código (OFFSET 8T, HERRINGBONE 20T, etc.) que sirve para identificar el intercambiador. Es importante señalar que todos los campos deben ser correctamente completados para poder realizar el cálculo, de lo contrario un error advierte de la ausencia de algún dato, así como del cálculo fuera de rango de error conocido.

Tras cargar los datos, las dos siguientes pestañas realizan tareas diferentes. Si lo que se busca es calcular la longitud necesaria para que el intercambiador proporcione una determinada potencia, temperatura de salida de gas, eficiencia o pérdida de carga se debe acudir a la pestaña de dimensionamiento del intercambiador, la pestaña de cálculo de gráficas permite mostrar variaciones de unos parámetros en función de otros mediante la realización de gráficas.

El programa acepta una gran variedad de unidades a la entrada, proporcionando diferentes opciones mediante cuadros desplegables y está diseñado para transformarlas automáticamente a las utilizadas en las ecuaciones.

Se incluyen a modo de ejemplo imágenes de cálculo con el perturbador OSF.

7.3.1 Pestaña datos geométricos

Como se ha comentado en una ventana aparece el código del intercambiador con el perturbador seleccionado y el número de tubos (Figura 15), así como una imagen con el perturbador seleccionado para ayudar a insertar los datos geométricos correctamente. Si se inserta un número de tubos para los que no hay correlaciones y datos específicos en el programa, automáticamente se cargan los valores que proporcionan la mejor aproximación. El programa está diseñado para permitir incluso el cálculo con un número de tubos impar, lo que en la configuración en U conlleva la asimetría del mismo.

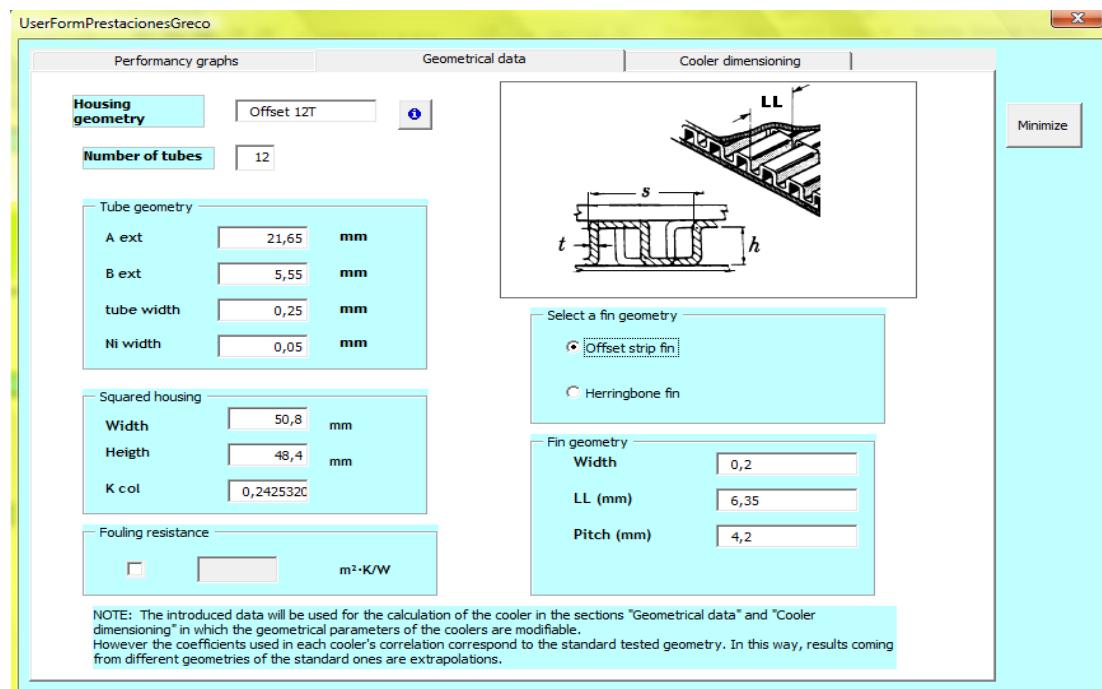


Figura 15. Pestaña de datos geométricos

Los siguientes apartados representan la geometría del tubo, la geometría de la carcasa, la resistencia de ensuciamiento y la geometría del perturbador. En todos los casos el programa muestra los valores por defecto o que dependen de la selección hecha. En el caso de la resistencia de ensuciamiento inicialmente el cálculo se realiza sin ella y al marcar la opción se carga el valor por defecto, que en Valeo Térmico y debido a que el banco de ensayos es un circuito cerrado, se obtiene enviando prototipos a ensayar externamente. Sin embargo este valor se puede variar si el cliente proporciona un valor diferente que permite mayor exactitud.

Cualquiera de los datos geométricos que se cargan por defecto pueden ser variados para realizar los cálculos dentro del rango de validez que se puede ver en el apartado siguiente.

Como se ha expuesto en el desarrollo de las ecuaciones, los datos que caracterizan el perturbador son diferentes según la geometría del mismo. Así en el perturbador offset los datos a completar son: paso, espesor, altura y lance length (Figura 8). Mientras que en el perturbador Herringbone (Figura 10) los datos son algo diferentes ya que al espesor, paso y la altura hay que añadir la amplitud de la onda y el lance length, que aquí se refiere a la longitud de una onda completa.

Todas las longitudes deben ser insertadas en milímetros o las unidades indicadas en su defecto. Los números decimales de insertarán con comas y el programa está diseñado para convertirlos para su uso en Excel.

7.3.2 Pestaña dimensionamiento del intercambiador

Como se ha mencionado anteriormente esta pestaña permite calcular dimensiones de intercambiador a partir de datos de entrada que se quieren obtener: potencia, eficiencia, temperatura de salida de gas o pérdida de carga total (Figura 16).

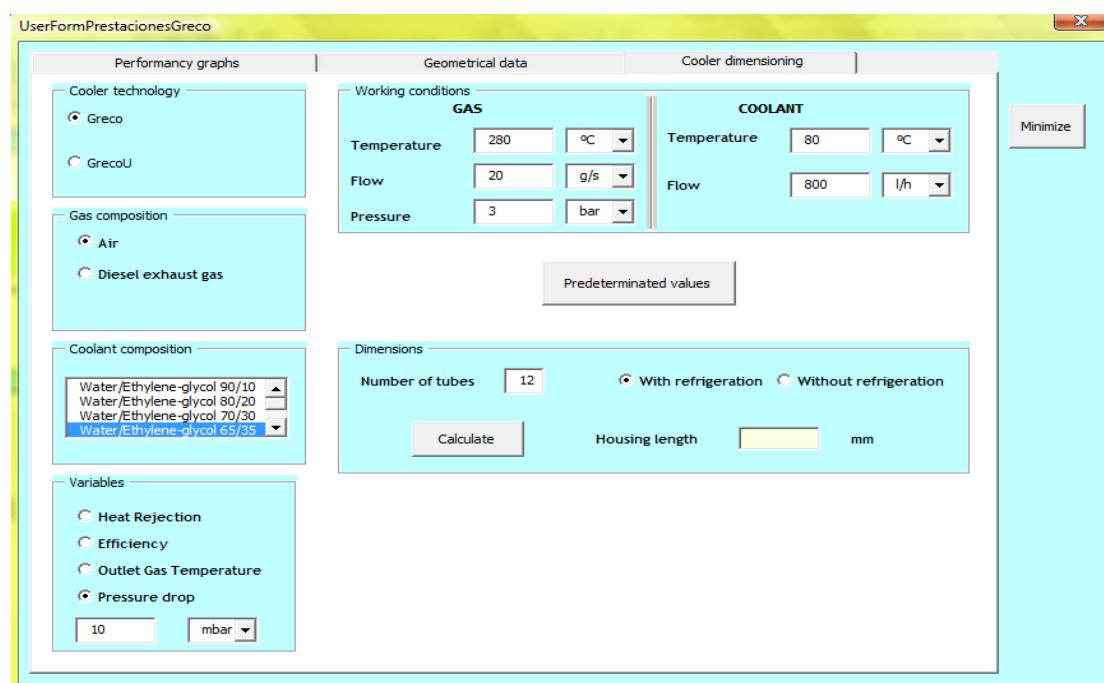


Figura 16. Pestaña de dimensionamiento.

Con los datos geométricos cargados inicialmente hay que indicar si la configuración del intercambiador es en I (un paso para ambos fluidos) o en U (dos pasos de gas y uno de refrigerante, con los flujos de agua y gas a contracorriente y paralelo respectivamente). Hay que recordar que en la disposición en U hay que introducir también el número de tubos del segundo paso, aunque se puede hacer en esta pestaña ya que se modifica en la pestaña datos geométricos automáticamente.

A continuación se debe introducir el tipo de gas que circula por los tubos: aire, gases escape o en el caso de que el dato introducido sea la potencia requerida para el intercambiador el programa permite introducir un calor específico dado por el cliente y así ajustar mejor el resultado.

El siguiente paso lleva a la elección del refrigerante. El más común en los ensayos de Valeo es la mezcla 65% agua y 35% ethylene-glycol. Al seleccionar uno el programa carga valores de densidad, viscosidad dinámica, conductividad,... necesarios en los cálculos.

Después se elige la variable de entrada (que es la que se busca que proporcione el intercambiador), con los decimales separados por punto, y sus unidades.

Se puede optar por introducir las variables de entrada con sus unidades una a una pero el botón “valores predeterminados” introduce por defecto los valores predeterminados de los ensayos, que después pueden ser modificadas por el usuario. Como en todo el programa se puede trabajar con cualquiera de las unidades que aparecen en los menús desplegables y el programa acepta y transforma cualquiera de ellas.

Si la variable de entrada es la pérdida de presión total existe la posibilidad de que el programa calcule sin refrigerante, igualando temperatura de entrada y salida del gas, mediante la selección del botón que aparece a la derecha, en el cuadro opciones de gráfica.

El botón “calcular” comenzará la iteración y el resultado se muestra en la ventana junto a él.

7.3.3 Pestaña gráfica de prestaciones

Los primeros cuadros, como se aprecia en la figura 17 y al igual que en la pestaña de dimensionado, son para:

- Selección disposición del intercambiador en I o en U. Con la precaución de que si se trata de disposición en U hay que introducir también el número de tubos del segundo paso, aunque se puede hacer en cualquiera de las pestañas y el programa lo modifica por sí mismo.

- Introducción del tipo de gas que circula por los tubos: aire, gases escape o en el caso de que el dato introducido sea la potencia requerida para el intercambiador, el programa permite introducir un calor específico dado por el cliente para así ajustar mejor el resultado.

- El siguiente paso lleva a la elección del refrigerante. El más común en los ensayos es la mezcla 65% agua y 35% ethylene-glycol. Al seleccionar uno el programa carga valores de densidad, viscosidad dinámica, conductividad,... necesarios en los cálculos.

Al seleccionar el tipo de gráfica que se quiere representar el programa ya carga unos valores predeterminados que pueden ser modificados en cualquier momento por el usuario. Las opciones de gráfica son:

- Potencia vs flujo de gas.
- Pérdidas de presión vs flujo de gas.
- Eficiencia vs flujo de gas.
- Eficiencia vs flujo de refrigerante.
- Eficiencia vs temperatura de refrigerante.
- Eficiencia vs longitud.

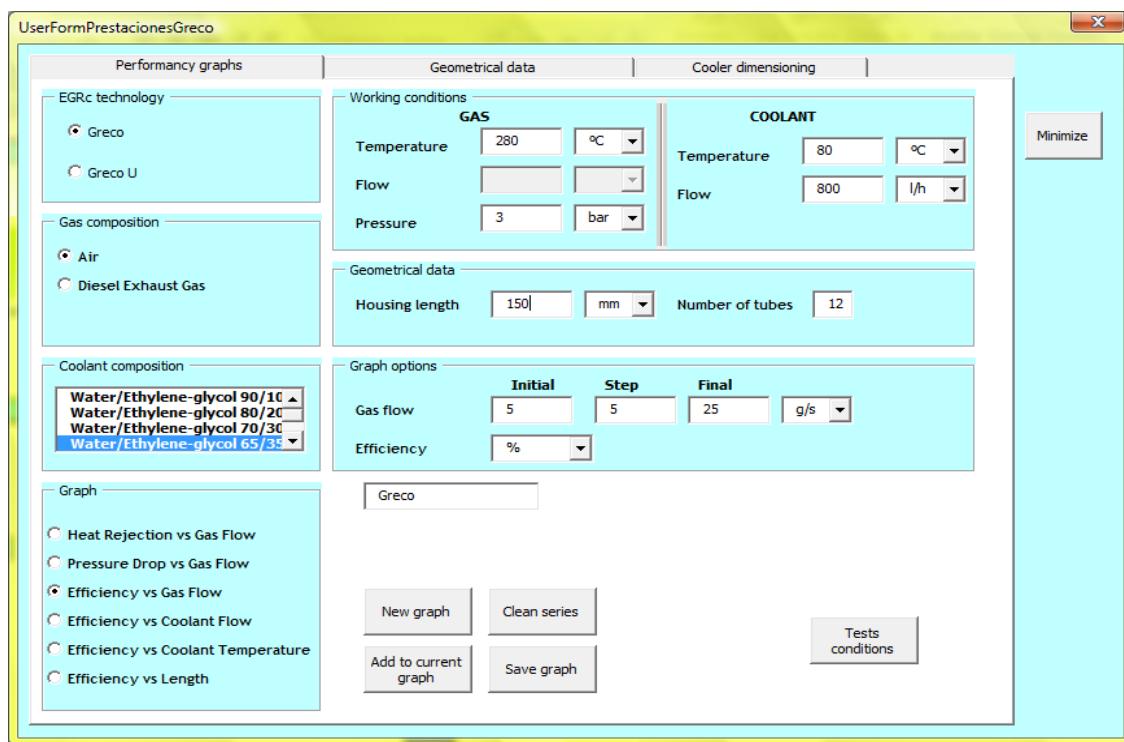


Figura 17. Gráfica de prestaciones

La selección de la opción de cálculo de caída de presión ofrece la posibilidad de calcular sin refrigerante con el botón que aparece en el apartado opciones de gráfica.

Tras esto se introduce la longitud de virola y se modifican los datos cargados por defecto si así se requiere y ya se está en condiciones de calcular.

En el apartado opciones de gráfica se pueden modificar los pasos de la gráfica a dibujar. Como se cita a lo largo del documento las unidades deben ceñirse a las que el programa da como opción en los menús desplegables.

Para realizar el cálculo hay cuatro botones:

- El primero realiza la gráfica seleccionada y se debe minimizar (botón superior derecho) para su visualización en la hoja “gráfica”. También se pueden consultar los resultados en formato tabla en la hoja “resultados”.
- El segundo de los botones añade una gráfica a la calculada anteriormente y también una tabla en la hoja resultados sin borrar los cálculos anteriores.
- El tercero limpia la gráfica por completo para comenzar de nuevo.
- El último de los botones permite guardar la gráfica realizada tras darle un nombre.

7.4 ERRORES DEL PROGRAMA Y RANGO DE VALIDEZ

Como se ha comentado hay ensayos que claramente eran erróneos y otros en los que, por distintos motivos, no podía asegurarse. Debido a esto en esos casos el error se veía aumentado. En algunos casos fue imposible distinguir en un grupo de ensayos cual era el erróneo debido a la dispersión de los valores.

Los rangos de validez expresados han de respetarse para poder asegurar que el error se encuentra por debajo de los establecidos. Fuera de estos límites se desconoce como evolucionaría el error pero el programa está diseñado para calcular igualmente.

Las condiciones de los fluidos tienen diferente rigidez, mientras que subir de los 30g/s de caudal de gas o bajar de los 600 l/h de refrigerante produce errores notablemente mayores a los establecidos, sobrepassar los rangos de temperatura o presión no introduce errores tan importantes.

7.4.1 Rango de validez del programa

- Longitudes y número de tubos:
 - o I: 100 - 220 mm ; 8 - 22 tubos
 - o U: 100 – 220 mm; 10+10 hasta 18+15 tubos
- Perturbadores OSF: - Perturbadores Herringbone:
 - o s: 4,2 mm.
 - o LL: 3,175 – 6,35 mm.
 - o t: 0,1 – 0,2 mm.
 - o Ni: 25-50 μm .
 - o s: 4,1 mm.
 - o LL: 9,5 mm.
 - o t: 0,1 – 0,2 mm.
 - o A: 0,1 mm.
 - o Ni: 35-50 μm .
- Condiciones de entrada del aire:

- o Caudal: 5 a 30 g/s
- o Temperatura: 220 a 450 °C
- o Presión: 1.05 a 3 mbar
- Condiciones de entrada del refrigerante:
 - o Caudal: 600 a 1500 l/h
 - o Temperatura: 80 a 90 °C

7.4.2 Tabla de errores del programa de cálculo de prestaciones Greco

<i>Perturbador OSF eficiencia %</i>	<i>Perturbador OSF pérdida de carga %</i>	<i>Perturbador Herringbone eficiencia %</i>	<i>Perturbador Herringbone pérdida de carga %</i>
1,68 %	9,07 % (0,67 mbar)	2,2 %	3,75 % (0,13 mbar)

Tabla 5. Errores medios cálculo Greco

Cabe destacar que el número de ensayos para el perturbador OSF, ya que es el más utilizado, es mucho mayor que para el perturbador Herringbone y por ello el error es mayor.

Como se ha comentado, existen ensayos que aún proporcionando valores extraños o de mayor dispersión se han tenido en cuenta ya que no se podía asegurar que fueran erróneos, de ésta forma el error se ve aumentado. En un futuro la realización de más ensayos podría demostrar su incorrección y podrían ser eliminados en una futura actualización reduciendo el error de cálculo.

8. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La aproximación a los resultados experimentales lograda con el programa de cálculo de prestaciones ha sido muy satisfactoria. El programa responde bien ante la variación de parámetros: cambio de perturbador, geometría, condiciones de entrada o resistencia de ensuciamiento y las simulaciones fuera del rango de validez proporcionan valores lógicos. En ambos casos, cálculo de eficiencia y pérdida de carga, el error obtenido ha sido menor al esperado, pero en el caso del cálculo de la pérdida de carga resulta si cabe más resaltante debido a la dificultad en su medida que provoca gran dispersión en los ensayos.

Esta precisión se ha conseguido con el estudio detallado de las ecuaciones y su posterior ajuste para reducir la desviación al mínimo. Muchas veces a la hora de realizar los ajustes de las correlaciones sólo la experiencia adquirida con el trabajo diario y la colaboración del equipo de I+D, talleres y ensayos ayudaron a encontrar los valores que respondían bien ante cualquier cambio en los parámetros de entrada, siendo muchas veces la solución óptima una que no proporcionaba el error mínimo.

También la gran cantidad de ensayos realizados, unidos a los ya disponibles y su realización con distintos valores de entrada y geometrías han permitido alcanzar este objetivo. Sin duda el hecho de realizar tantos ensayos ha sido uno de los inconvenientes de éste método de trabajo pero es imprescindible si se quiere validar el trabajo realizado. La selección de los ensayos a realizar es por tanto clave.

La variación obtenida en el programa por el hecho de haber realizado aproximaciones como el reparto equitativo del flujo gas por los tubos o el intercambio de calor con la carcasa es pequeña como demuestran los resultados.

En el manual de usuario, que se puede consultar en anexos, se ha incluido una guía con la metodología a seguir en un futuro para actualizar las correlaciones ante la aparición de nuevos ensayos o incluso para desarrollar un programa con nuevas tecnologías.

A nivel personal el nivel alcanzado en el manejo de programación en Visual Basic, así como en el programa Mathcad ha sido muy satisfactorio. También quiero destacar el trato recibido por todo el personal de Valeo que ha ayudado a que hayan sido unos meses muy intensos y de gran aprendizaje. El contacto con el taller de prototipos y el laboratorio de ensayos me ha ayudado a familiarizarme con el trabajo diario y el funcionamiento de un departamento de I+D.

La dispersión de los datos medidos para la pérdida de carga en el lado del refrigerante así como el hecho de que el cliente rara vez imponga restricciones sobre el mismo deja fuera de este proyecto su cálculo. Otro aspecto útil sería la inclusión de un presupuesto estimado del intercambiador, aunque la variabilidad de los precios de los materiales obligaría a la constante actualización del programa.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] RAMESH K.SHAH, DUSAN P.SEKULIC. Fundamentals of Heat Exchanger Design. Ed: John Wiley (2003).
- [2] MARÍN J.M, MONNÉ C. Transferencia de Calor. Universidad de Zaragoza (1998).
- [3] SADIK KALAÇ, HONGTAN LIU. Heat Exchangers: selection, rating and thermal design. Ed: CRC Press (1998).
- [4] Kays and London. Compact heat exchangers. ED: Mcgraw-Hill (1964).
- [5] RAMESH K. SHAH. Compact Heat Exchangers. Ed: ETS (2002).
- [6] E.M. Smith. Thermal design of heat exchangers. Ed: Wiley (1997).
- [7] M. MANGLIK, ARTHUR E. BERGLES. Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for the Rectangular Offset Strip Fin. (1994).
- [8] BRAVO Y. Engine cooler Product Engineer, Specific features for EGR cooler design. Valeo Engine Cooling. (2004).
- [9] Applied thermal engineering; Heat transfer and pressure drop correlations for the wavy fin and flat tube heat exchangers. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai (2006).
- [10] JIEHAI ZHANG, JAYDEEP KUNDU, RAJ M. MANGLIK. Effect of fin waviness and spacing on the lateral vortex structure and laminar heat transfer in wavy-plate-fin cores. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47 (2004).
- [11] HU AND HEROLD. Prandtl number effect on offset fin heat exchanger performance. International journal of heat and mass transfer, vol 38 (1995).
- [12] DONG, CHEN, ZHANG AND HU. Experimental and numerical investigation of thermal -hydraulic performance in wavy fin heat exchangers. Applied Thermal Engineering, 30 (2010).
- [13] H. BHOWMIK, KWAN-SOO LEE. Analysis of heat transfer and pressure drop characteristics in an offset strip fin heat exchanger. International Communications in Heat and Mass Transfer, 36 (2009).
- [14] J. M. CORBERÁN, E. CUADROS, K. GONZÁLEZ. Pressure drop characterization of compact heat exchanger channels. 5th European thermal-sciences conference, the Netherlands (2008).
- [15] MIGUEL HENRIQUE TERUEL, CELSO YUKIO, PEDRO PAGLIONE. Rectangular offset strip-fin heat exchanger lumped parameters dynamic model. 2009 Brazilian Symposium on Aerospace Eng. & Applications.

10. NOMENCLATURA

La nomenclatura utilizada a lo largo de este documento, para mayor claridad, se muestra a continuación:

\dot{m} : Caudal (kg/s)

C_p : Calor específico a presión constante (J/kg*K)

T : Temperatura (K, C°)

Δ : Intercambio finito

h : Altura del perturbador (mm)

s : Paso de la celda básica perturbador (mm)

LL : Longitud de offset del perturbador (mm)

t : Espesor del perturbador (mm)

R : Resistencia térmica (K/W)

A : Áreas (mm², m²)

λ : Conductividad térmica (W/m*K)

h : Coeficiente de convección de calor (W/m²*K)

Nu : Número de Nusselt (adimensional)

Re : Número de Reynolds (adimensional)

Pr : Número de Prandtl (adimensional)

b : Anchura de tubo (mm)

L : Longitud de tubo (mm)

Dh : Diámetro hidráulico (mm)

Ph : Perímetro hidráulico (mm)

η : Rendimiento (adimensional)

f : Factor de fricción (adimensional)

ρ : Densidad (kg/m³)

A, a, b, c, d Coeficientes genéricos de las correlaciones (adimensionales)

v : Viscosidad dinámica (kg/m*s)

G : Caudal (kg/m²s)

*U: Coeficiente global de transferencia de calor (W/m^2*K.)*

q: Potencia debida al intercambio térmico (W)

P: Presión (mbar, bar, Pa)

E: Eficiencia térmica del intercambiador (adimensional)

F: factor corrección respecto a circulación contracorriente