



INSTITUTO UNIVERSITARIO AERONÁUTICO

Modelo CFD del Primer Prototipo del motor Stirling

Informe Técnico: DMA-020/13

Revisión:

Proyecto: Fonarsec INTIHUASI

Fecha: 20/03/13

Autor:

Ing. Carrasco Diego
Investigador – IUA

Ing. Esteban Gonzalez Garcia
Investigador - IUA

Revisó:

Ing. Gustavo Scarpin
Director de Proyecto



PROYECTO PIDDEF 037/12

Modelo CFD del Primer Prototipo del motor Stirling.

Por:

Diego Carrasco y Esteban Gonzalez Garcia

RESUMEN

Dentro del proyecto de desarrollo llevado a cabo por el Consorcio Público Privado Intihuasi, en el que el IUA es parte, patrocinado por el Fondo de Innovación Tecnológica Sectorial de Energía Solar 2010 que administra el Fondo Argentino Sectorial (FONARSEC), se desarrolló un modelo CFD del primer prototipo del motor Stirling en estudio para simular su funcionamiento y comparar los resultados con los obtenidos a partir del modelo matemático (Ref. [1], [2] y [3]).

Utilizando el programa computacional CFX se logró simular el funcionamiento de un modelo simplificado del motor en cuestión y a partir de las comparaciones con los modelos matemáticos mas simples se resolvieron casos modificados que ayudan a entender la sensibilidad de la eficiencia a ciertos parámetros de diseño.

Córdoba, 20 de Marzo de 2013



ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 4 |
| 2. MODELO BASE – ST1 | 5 |
| Determinación de la geometría del modelo..... | 5 |
| Mallado de la geometría..... | 8 |
| Modelo matemático..... | 8 |
| Convergencia..... | 9 |
| Resultados..... | 10 |
| 3. MODELOS MODIFICADOS | 11 |
| Modelo modificado – ST2 | 11 |
| Resultados..... | 12 |
| Modelo modificado – ST3 | 13 |
| Resultados..... | 13 |
| Modelo modificado – ST4 | 15 |
| Resultados..... | 15 |
| 4. RESUMEN | 17 |
| 5. CONCLUSIONES | 17 |
| 6. REFERENCIAS..... | 18 |

1. INTRODUCCIÓN

El modelo que se simuló corresponde a un motor tipo alfa, donde cada parte del motor se coloca detrás de otra, en un único cilindro, como se muestra en la *Figura 1.1*.

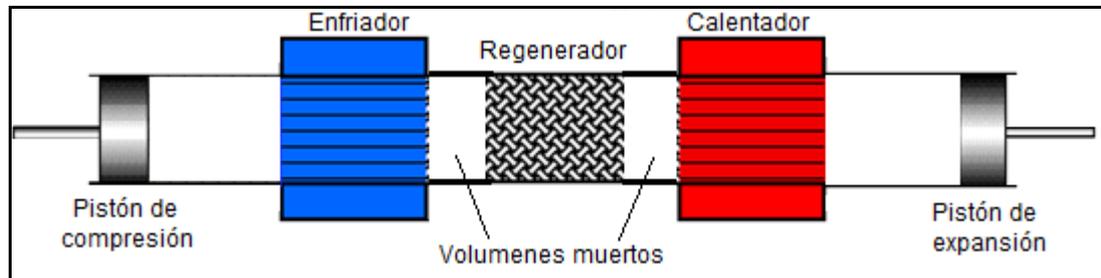


Figura 1.1 – Modelo del motor.

Además de su geometría, las características principales del modelo son:

- Pistones y cilindros, de compresión y de expansión, adiabáticos.
- Las temperaturas de la pared interna del calentador y enfriador están fijas.
- El movimiento de los pistones es sinusoidal.
- El enfriador, calentador y regenerador son volúmenes cilíndricos con una porosidad determinada.

Los motivos de la elección del modelo son:

- Es la geometría utilizada en los modelos simples (Ref. [1], [2] y [3]).
- Simplicidad de la geometría, lo cual disminuye el tiempo para realizar el dibujo CAD y sobre todo durante el mallado, ya que no será necesario utilizar numerosas herramientas para ello.
- Mayores facilidades para mallar. Es decir, se puede mallar la geometría con elementos de tamaños similares evitando cambios abruptos en el tamaño de los mismos. Esta geometría permite utilizar elementos más grandes, y en consecuencia, disminuye la cantidad de elementos produciendo análisis más rápidos.
- Dada la geometría de revolución, es posible analizar una porción de la sección transversal del motor y considerar que en el resto de las porciones el proceso es igual a la del análisis. Esto permitirá disminuir los tiempos de procesamiento.

Las consecuencias del uso de este modelo:

- No representa exactamente la geometría que se utiliza en los modelos matemáticos. En la geometría de éstos, los componentes del motor tienen diámetros y formas distintas, sobre todo la del regenerador ya que la configuración



real de este es totalmente distinta (Ver Ref. [3]) y la del conjunto pistón – cilindro que son curvos.

- Como las secciones de pasaje de fluido a través de cada uno de los componentes del motor son distintas a las del modelo matemático, es posible que las pérdidas de presión no sean cuantificadas correctamente.
- Este modelo, al igual que el modelo simple, no considera la transferencia de calor por conducción entre los componentes del motor.

2. MODELO BASE – ST1

Determinación de la geometría del modelo.

La geometría de cada una de las partes del modelo, se determina en base a las geometrías de los elementos del motor que se está estudiando, que a pesar de que sus configuraciones sean distintas, los volúmenes de las partes análogas entre ambos son iguales. Es decir, el volumen del calentador del modelo es igual al volumen del calentador del motor pero sus formas son distintas. Lo mismo para el enfriador, regenerador, etc.

A continuación, se muestran las dimensiones de cada parte del motor y el volumen de las mismas:

| Parte | Primer prototipo Stirling | | | |
|---|---------------------------|---------------|---------------|-----------------|
| | Longitud | Diámetro ext. | Diámetro int. | Volumen |
| | mm | mm | mm | mm ³ |
| Zona de compresión | 50,0 | 50,0 | 0,0 | 98174,8 |
| Vol. Muerto del pistón frío | 10,2 | 50,0 | 0,0 | 20110,1 |
| Enfriador | 7,0 | 60,0 | 0,0 | 19792,0 |
| Tubo frío | 36,1 | 12,0 | 0,0 | 4086,4 |
| Vol. Muerto Regenerador (zona fría) | 140,0 | 33,1 | 31,0 | 14624,7 |
| Matriz del regenerador | 140,0 | 31,0 | 17,0 | 73890,3 |
| Vol. Muerto Regenerador (zona caliente) | 140,0 | 17,0 | 0,0 | 15888,6 |
| Tubo caliente | 36,0 | 17,0 | 0,0 | 8171,3 |
| Calentador | 8,0 | 100,0 | 0,0 | 62831,9 |
| Vol. Muerto del pistón caliente | 21,3 | 50,0 | 0,0 | 41795,0 |
| Zona de expansión | 50,0 | 50,0 | 0,0 | 98174,8 |

Tabla 2.1 – Dimensiones del motor en estudio

Notar que el volumen calculado para el volumen muerto de la zona caliente del regenerador es la mitad del que corresponde de acuerdo a las dimensiones del mismo, ya que se ha considerado en su interior el volumen ocupado por el cono con variación lineal del área (Ver Ref. [3]). Por otro lado, en la tabla anterior se muestran los volúmenes máximos de las zonas de compresión y expansión, mientras que durante el funcionamiento del motor éstos volúmenes alternan entre cero y el valor mostrado, de manera desfazada entre ambos.

Con estos volúmenes, se calcula la longitud de cada componente para que el motor tenga un diámetro único de 50mm. Se adoptó éste diámetro ya que es el que tienen los cilindros de ambos pistones y, de esta manera, mantener el recorrido de deben hacer los pistones igual al del motor en estudio. En consecuencia el volumen de las zonas de compresión y expansión es igual en ambos modelos. En la siguiente tabla se muestran éstos cálculos:

| Parte | Modelo CFX | | |
|---|------------|----------|-----------------|
| | Longitud | Diámetro | Volumen |
| | mm | mm | mm ³ |
| Zona de compresión | 50,0 | 50,0 | 98174,8 |
| Vol. muerto del pistón frío | 10,2 | 50,0 | 20110,1 |
| Enfriador | 10,1 | 50,0 | 19792,0 |
| Tubo frío | 2,08 | 50,0 | 4086,4 |
| Vol. muerto Regenerador (zona fría) | 7,45 | 50,0 | 14624,7 |
| Matriz del regenerador | 37,6 | 50,0 | 73890,3 |
| Vol. muerto Regenerador (zona caliente) | 8,09 | 50,0 | 15888,6 |
| Tubo caliente | 4,16 | 50,0 | 8171,3 |
| Calentador | 32,0 | 50,0 | 62831,9 |
| Vol. muerto del pistón caliente | 21,3 | 50,0 | 41795,0 |
| Zona de expansión | 50,0 | 50,0 | 98174,8 |

Tabla 2.2 – Dimensiones del modelo CFD.

Como la geometría del modelo CFD debe ser la que corresponde en el momento inicial de simulación se adoptó por la siguiente configuración:

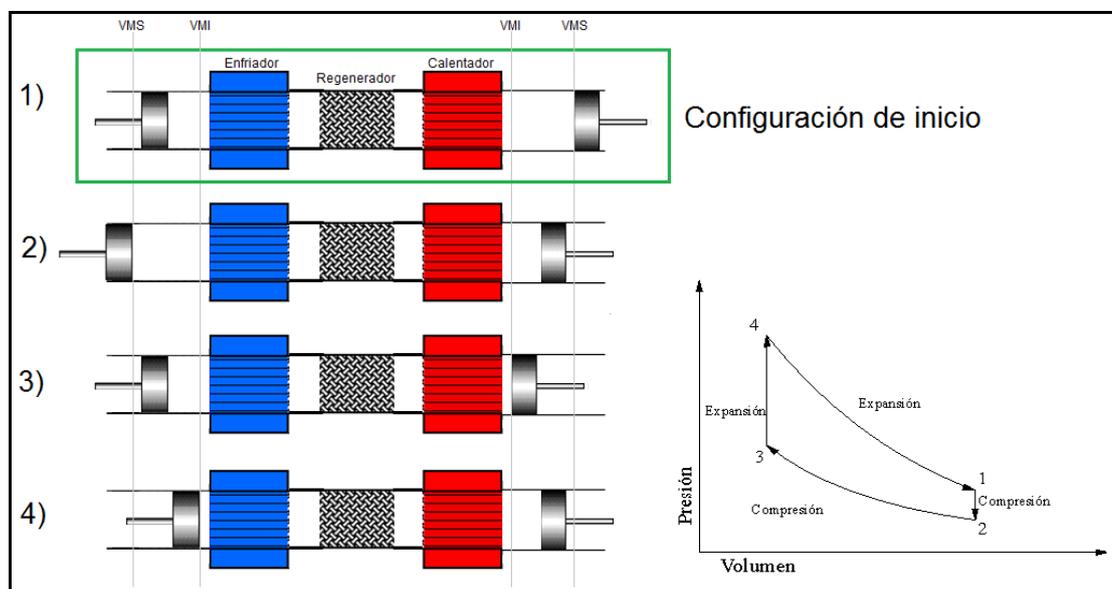


Figura 2.1 – Configuración del modelo para t=0 seg

Luego se dividió la geometría en dominios. Cada parte componente del motor puede ser un dominio fluido, sólido o poroso. Cuando dos partes adyacentes son del mismo tipo se agruparon en un solo dominio, como por ejemplo, el volumen de la zona de compresión se unió al volumen muerto adyacente del regenerador (igual en la zona de expansión). De esta manera, los dominios quedaron definidos de la siguiente manera:

| Parte | Geometría de los dominios | | |
|---|---------------------------|----------|-----------------|
| | Dominio N° | Longitud | Long. de inicio |
| | --- | mm | mm |
| Zona de compresión | 1 | 60,2 | 35,2 |
| Vol. muerto del pistón frío | | | |
| Enfriador | 2 | 10,1 | 10,1 |
| Tubo frío | 3 | 9,53 | 9,5 |
| Vol. muerto Regenerador (zona fría) | | | |
| Matriz del regenerador | 4 | 37,6 | 37,6 |
| Vol. muerto Regenerador (zona caliente) | 5 | 12,3 | 12,3 |
| Tubo caliente | | | |
| Calentador | 6 | 32,0 | 32,0 |
| Vol. muerto del pistón caliente | 10 | 71,3 | 71,3 |
| Zona de expansión | | | |

Tabla 2.3 – Dimensiones de los dominios.

Notar que el volumen del dominio N° 1 es la suma de la mitad del volumen de la zona de compresión y del volumen muerto adyacente, como consecuencia del momento de inicio de la simulación, como se explicó previamente.

Como consecuencia de la geometría de revolución del modelo adoptado, se propuso analizar solo una parte del mismo, para así disminuir el tiempo de simulación y postprocesamiento, aplicando condiciones de simetría axial. En la figura siguiente se muestra la parte analizada del modelo.

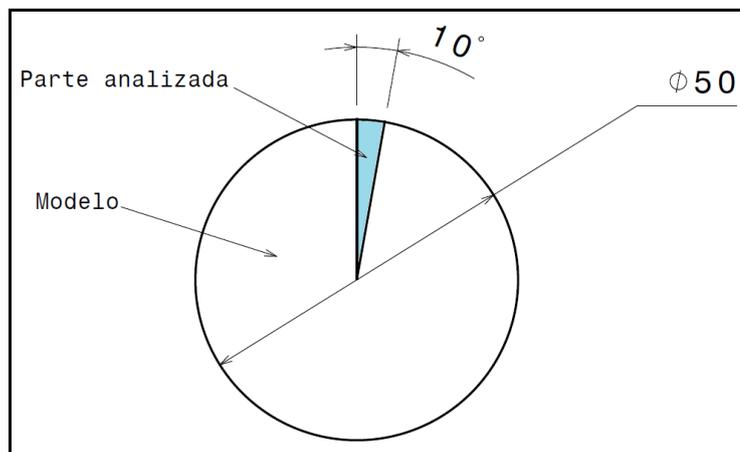


Figura 2.2 – Zona de simulación.

Mallado de la geometría

Se llevó la geometría al programa Ansys® Meshing donde se realizó la malla (ver Figura 2.3) teniendo en cuenta los siguientes puntos:

- El tamaño de los elementos debe ser lo más uniforme posible, evitando cambios abruptos del tamaño en la malla.
- Se busco el mayor tamaño de elementos dentro de lo posible, así se disminuye el tiempo de procesamiento. En futuros análisis, se refinará la malla y verificar la consistencia del método.
- Igual cantidad de elementos a lo largo de la longitud de las zonas de compresión y expansión.
- Utilizar solo un elemento a lo largo del espesor, dado que se utilizará condición de simetría axial (2D axialsimétrico).

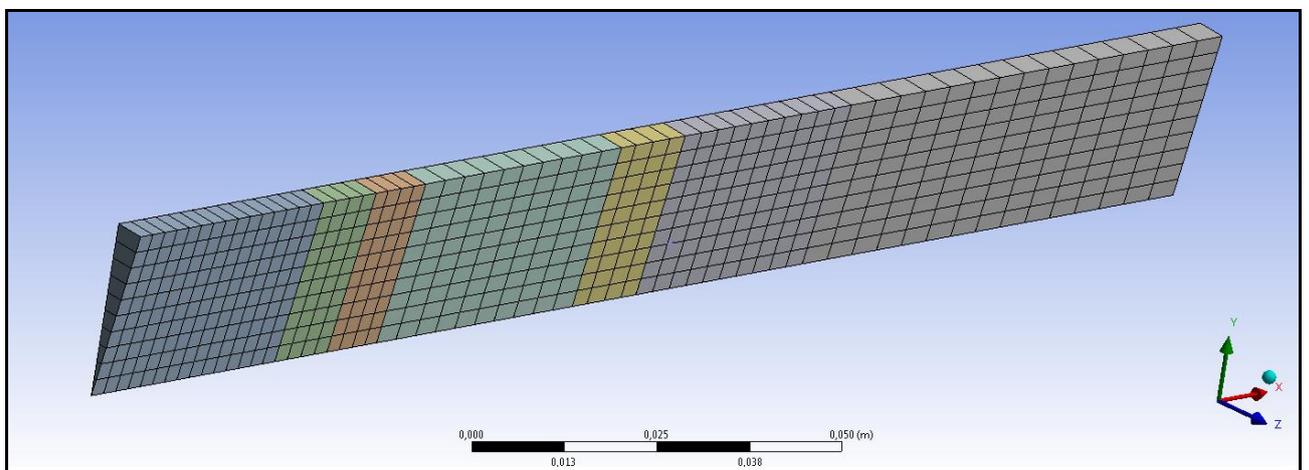


Figura 2.3 – Mallado

Modelo matemático

El modelo de CFD se configura en CFX 14.0 utilizando las siguientes hipótesis:

- El fluido de trabajo es aire que se comporta como gas ideal.
- Dado el bajo número de Reynolds, el flujo se asume laminar.
- El flujo es inestacionario con contornos con desplazamiento impuesto.
- La geometría se modela con condición de simetría axial (2D).
- No se modelan partes solidas ni transferencia de calor al exterior.
- Tanto regenerador, calentador como enfriador se modelan como dominios porosos con su correspondiente pérdida de carga y coeficientes de transferencia de calor a la matriz porosa.

Las condiciones de contorno utilizadas son:

- Pistones: Pared móvil con desplazamiento impuesto según la ley de movimiento del motor. La malla se deformará para acomodarse al desplazamiento.
- Enfriador, calentador y regenerador: Dominios porosos con pérdida de carga y transferencia de calor a la matriz porosa mediante un modelo de no-equilibrio.
- Paredes externas: Paredes con deslizamiento (velocidad libre) y adiabáticas.
- Paredes laterales: Simetría axial.

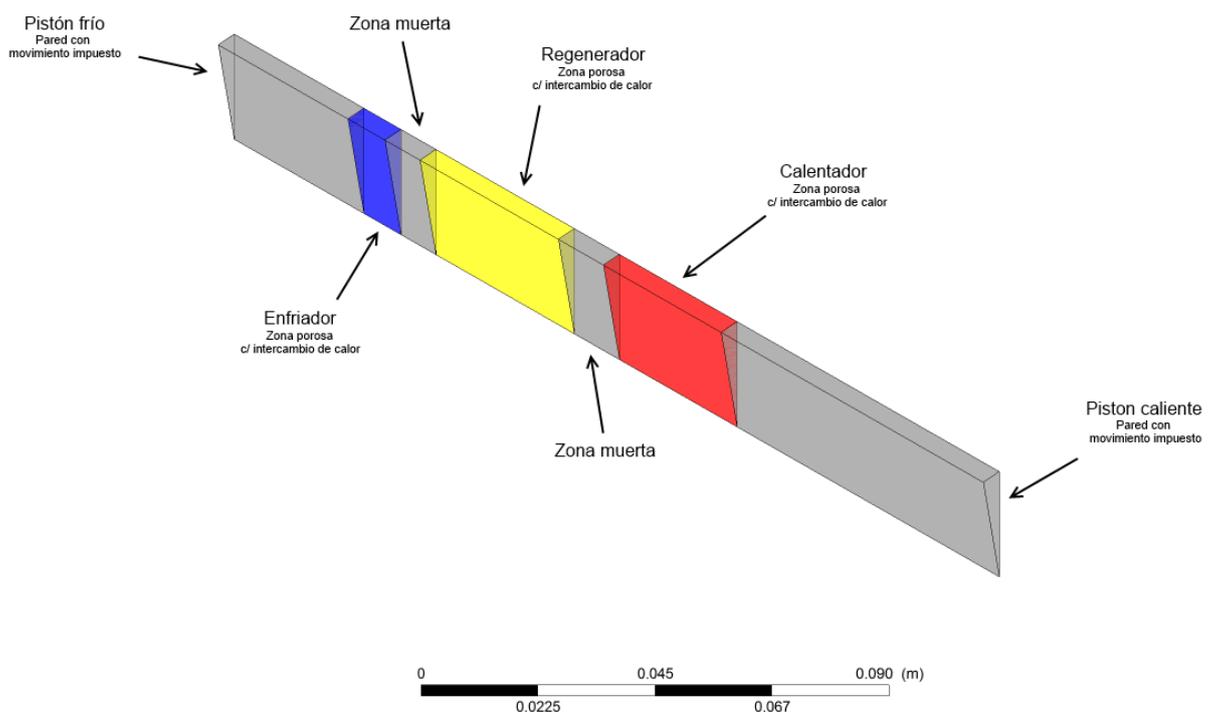


Figura 2.4 – Modelo Base – ST1

Cabe destacar que en todos los casos se ha impuesto que la masa total del sistema sea la misma que la del Modelo Simple. Esto es realizado mediante el ajuste de la presión y temperatura inicial, ya que al ser un sistema cerrado estas condiciones determinan la masa del sistema. De esta manera todos los sistemas tienen las mismas masas de gas involucradas.

Convergencia

Es importante destacar que en todos los casos fue difícil alcanzar la convergencia del modelo y no se ha logrado hacer para todas las variables. Como se explicó antes, la presión y temperaturas iniciales condicionan la masa total del sistema, por lo cual existen restricciones en cuanto a las condiciones iniciales que se pueden imponer. Partiendo de las condiciones de temperatura media del Modelo Simple, se produce una evolución ciclo a ciclo de las variables y deben calcularse tantos ciclos como sean necesarios para estabilizar todo el sistema (motor en régimen). La presión media del sistema necesita al menos de 30 ciclos para estabilizarse, mientras que las temperaturas se estima que necesitarían entre 300 y 500 ciclos, cantidad que es impráctica



porque llevaría semanas de cálculo incluso para este modelo simplificado y de pocos elementos de malla.

Resultados

Los resultados de este primer modelo tienen diferencias sustanciales tanto en el comportamiento del ciclo como en la potencia total generada aunque las temperaturas medias se aproximan considerablemente. Las posibles causas de las diferencias se analizan en el siguiente apartado.

| Variable | Modelo Simple | Modelo Base – ST1 | Error |
|--|---------------|---------------------|-------|
| <i>Temperatura del gas en el enfriador</i> | 313,9 K | 356 K (valor medio) | 13,4% |
| <i>Temperatura del gas en el regenerador</i> | 557,3 K | 574 K (valor medio) | 3,0% |
| <i>Temperatura del gas en el calentador</i> | 902,5 K | 896 K (valor medio) | 0,7% |

Tabla 3.1 – Temperaturas medias para el modelo ST1

Por último, se determina la potencia generada con ambos modelos. En la Figura 2.5 se compara el ciclo obtenido con el Modelo Simple.

| | Modelo Simple | Modelo CFD ST1 | Error |
|-------------------------------|---------------|----------------|--------|
| <i>Trabajo neto por ciclo</i> | 2,77 J | 2,02 J | -27,0% |
| <i>Potencia</i> | 138,3 W | 101,0 W | -27,0% |

Tabla 3.2 – Potencia para el modelo ST1

Ciclo Stirling - Modelo CFD

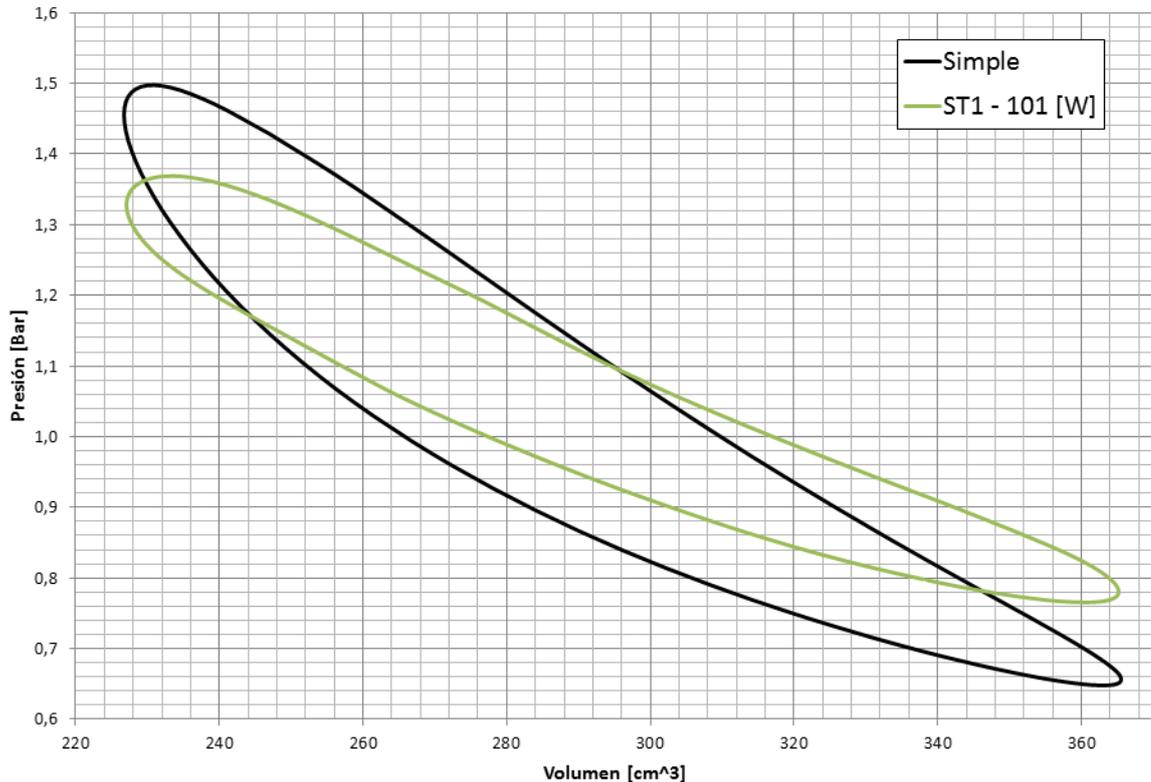


Figura 2.5 – Ciclo motor para el modelo ST1

3. MODELOS MODIFICADOS

Modelo modificado – ST2

Dadas las marcadas diferencias entre el trabajo total obtenido por el modelo CFD y el Modelo Simple, se considera una modificación geométrica al modelo. En el Modelo Simple los volúmenes muertos entre Calentador/Enfriador y Regenerados son considerados al ser sumados a los volúmenes muertos resultantes del despeje de final de recorrido de los pistones. En el modelo CFD esto fue tenido en cuenta de manera distinta y más realista, al considerar la ubicación de los volúmenes muertos en el lugar físico que realmente ocupan. Como el objetivo de este modelo de simulación por CFD no es estimar la performance real del motor, sino que validar la metodología mediante el contraste de resultados con el Modelo Simple, se procede a modificar el caso y ubicar los volúmenes muertos juntos a los despejes de final de pistón, de la misma manera que en el Modelo Simple (ver Figura 3.1).

A priori se estima que esta modificación puede tener un impacto importante ya que el aire en zonas muertas impone una resistencia al flujo de calor que no es considerado en el Modelo Simple, ya que en este modelo el regenerador recibe las temperaturas de Enfriados/Calentador sin pérdidas.

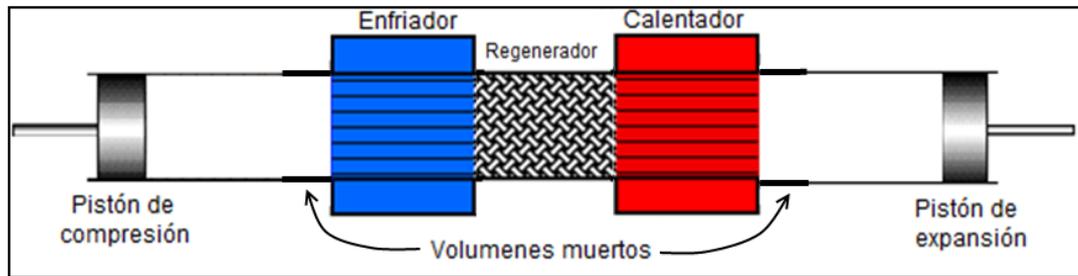


Figura 3.1 – Modelo motor modificado

El modelo CFD es alterado simplemente intercambiando dominios, pero sin ninguna alteración en las condiciones de contorno. También se encuentra que aunque las condiciones iniciales (extraídas del modelo simple para una mejor aproximación) sean cercanas a la final, el modelo debe ser dejado evolucionar por al menos 50 ciclos para llegar a un valor estable de trabajo realizado. Para verificar esta convergencia se monitorean las presiones máximas y mínimas en el tiempo y la temperatura media (en el tiempo) del regenerador. Hasta tanto estas variables no se estabilizan la simulación no se detiene.

Resultados

| Variable | Modelo Simple | Modelo Base – ST1 | Error |
|---------------------------------------|---------------|---------------------|-------|
| Temperatura del gas en el enfriador | 313,9 K | 406 K (valor medio) | 29,3% |
| Temperatura del gas en el regenerador | 557,3 K | 584 K (valor medio) | 4,8% |
| Temperatura del gas en el calentador | 902,5 K | 861 K (valor medio) | -4,6% |

Tabla 3.3 – Temperaturas medias para el modelo ST2

| | Modelo Simple | Modelo CFD ST1 | Error |
|------------------------|---------------|----------------|-------|
| Trabajo neto por ciclo | 2,77 J | 2,82 J | 1,8% |
| Potencia | 138,3 W | 140,8 W | 1,8% |

Tabla 3.4 – Potencia para el modelo ST2

En la Figura 3.2 se compara el ciclo obtenido con el Modelo Simple.

Ciclo Stirling - Modelo CFD

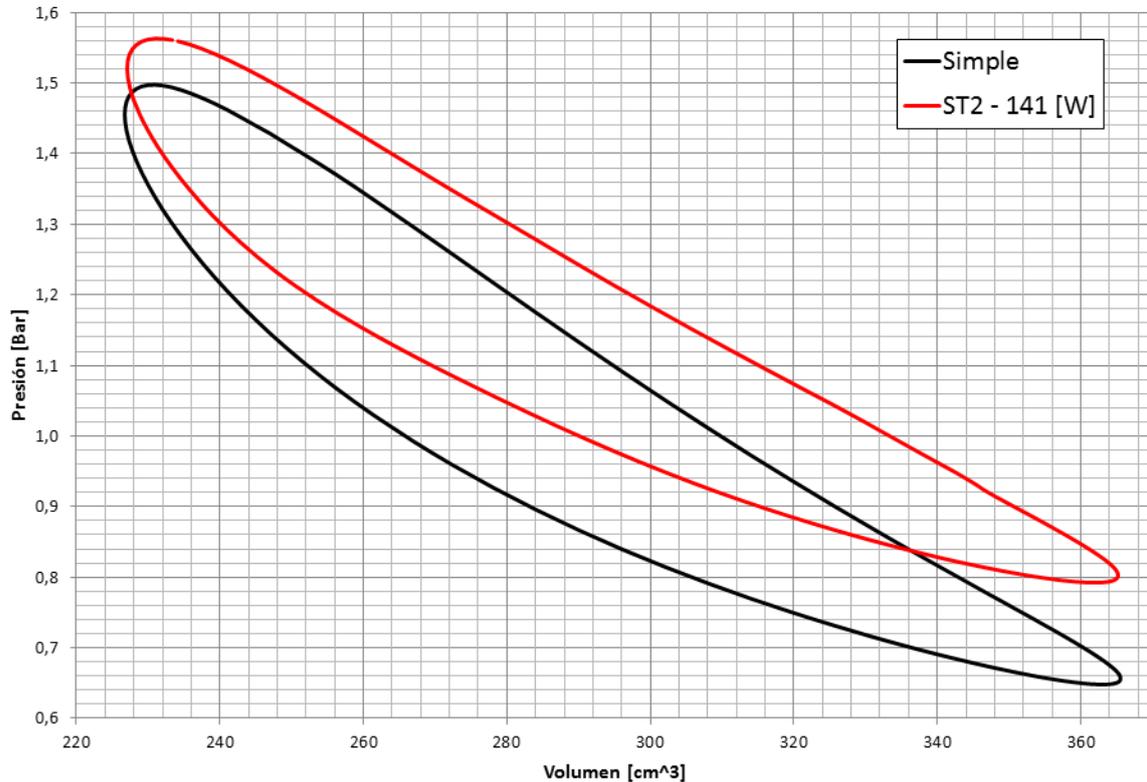


Figura 3.2 – Ciclo motor para el modelo ST2

Modelo modificado – ST3

Si bien el modelo ST2 aproxima razonablemente el ciclo calculado con el Modelo Simple, aún existen diferencias en los abordajes del calentador y el enfriador. En particular, la forma en la que se ingresa/egresa el calor en el calentador/enfriador es mediante un modelo de no-equilibrio térmico en la zona porosa. Esto asume que la matriz porosa del calentador/enfriador no se mantiene a temperatura constante, sino que se calienta o enfría según como se desarrolle el flujo a través de este dominio. Si bien esta es la realidad, esto no es exactamente lo que sucede en el Modelo Simple, donde se asume que la matriz del calentador/enfriador se mantiene a temperatura constante.

Para poder aproximar aún más el modelo de CFD al Modelo Simple, se propone una modificación que consiste en reemplazar el modelo de no-equilibrio de la zona porosa por ecuaciones de fuente volumétrica de calor con temperatura de fuente constante.

Resultados

En la Figura 3.3 se compara el ciclo obtenido con el Modelo Simple.

Ciclo Stirling - Modelo CFD

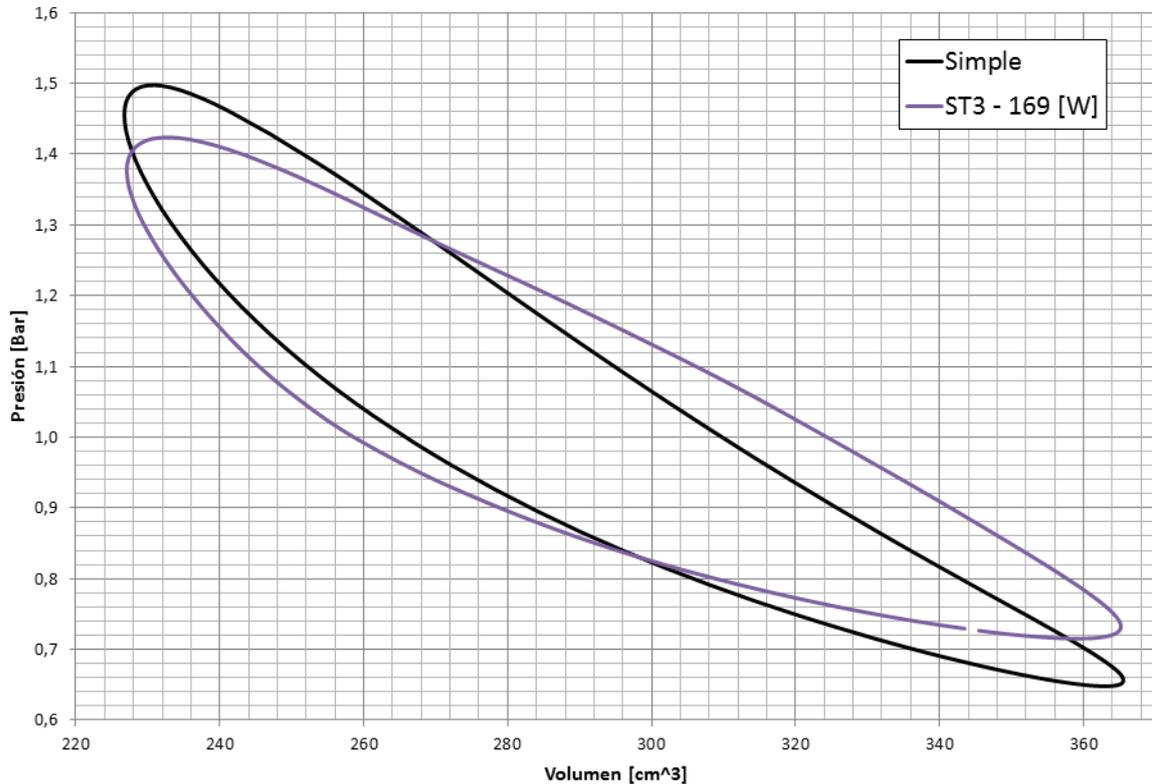


Figura 3.3 – Ciclo motor para el modelo ST3

| Variable | Modelo Simple | Modelo Base – ST3 | Error |
|---------------------------------------|---------------|---------------------|-------|
| Temperatura del gas en el enfriador | 313,9 K | 383 K (valor medio) | 22,0% |
| Temperatura del gas en el regenerador | 557,3 K | 613 K (valor medio) | 10,0% |
| Temperatura del gas en el calentador | 902,5 K | 859 K (valor medio) | -4,8% |

Tabla 3.5 – Temperaturas medias para el modelo ST3

| | Modelo Simple | Modelo CFD ST3 | Error |
|------------------------|---------------|----------------|-------|
| Trabajo neto por ciclo | 2,77 J | 3,39 J | 22,4% |
| Potencia | 138,3 W | 169,4 W | 22,4% |

Tabla 3.6 – Potencia para el modelo ST3

Modelo modificado – ST4

Una última modificación propuesta para acercarnos al comportamiento del Modelo Simple es generar un modelo con los diámetros reales de cada componente. Esto obliga a volver a colocar los volúmenes muertos en ambos lados del enfriador/calentador, ya que sino la zona porosa tendrá el flujo mal distribuido.

En la Figura 3.4 se muestra el modelo modificado en la posición inicial. Más allá de las modificaciones de los diámetros, los volúmenes de cada componente se mantienen constantes respecto a los modelos previos.

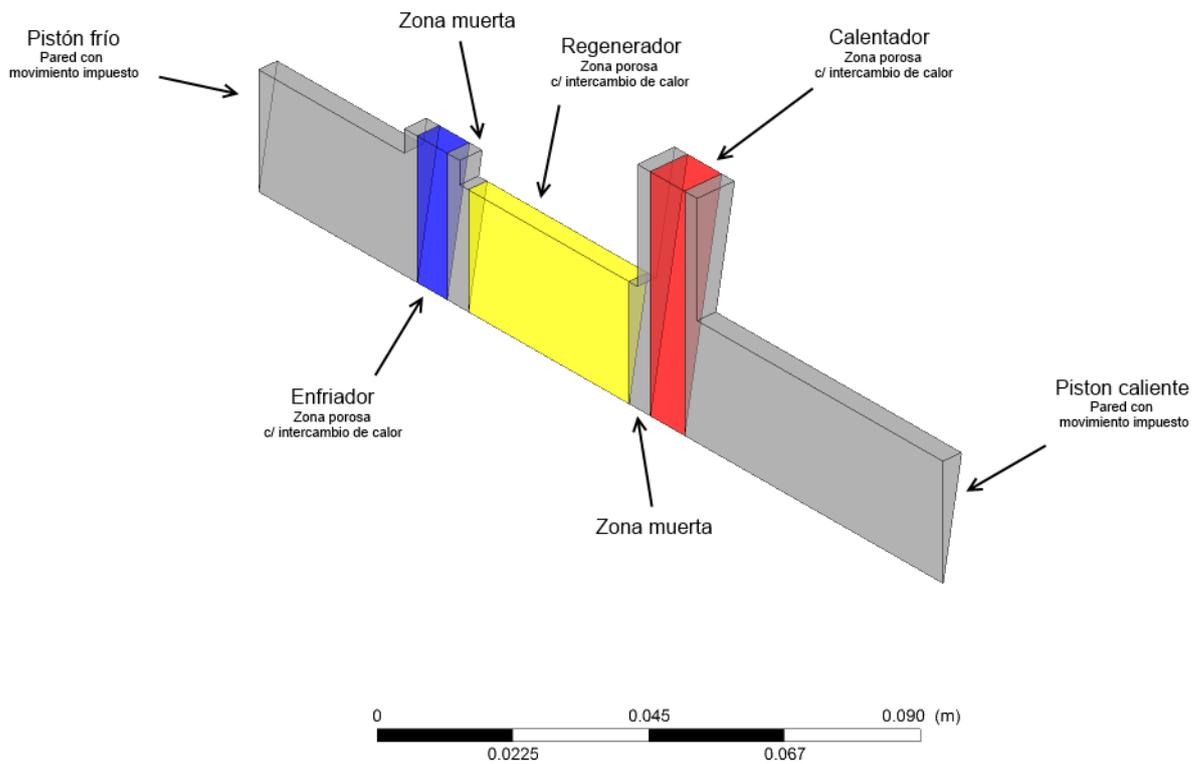


Figura 3.4 – Modelo Base – ST4

Resultados

En la Figura 3.4 se compara el ciclo obtenido con el Modelo Simple.

Ciclo Stirling - Modelo CFD

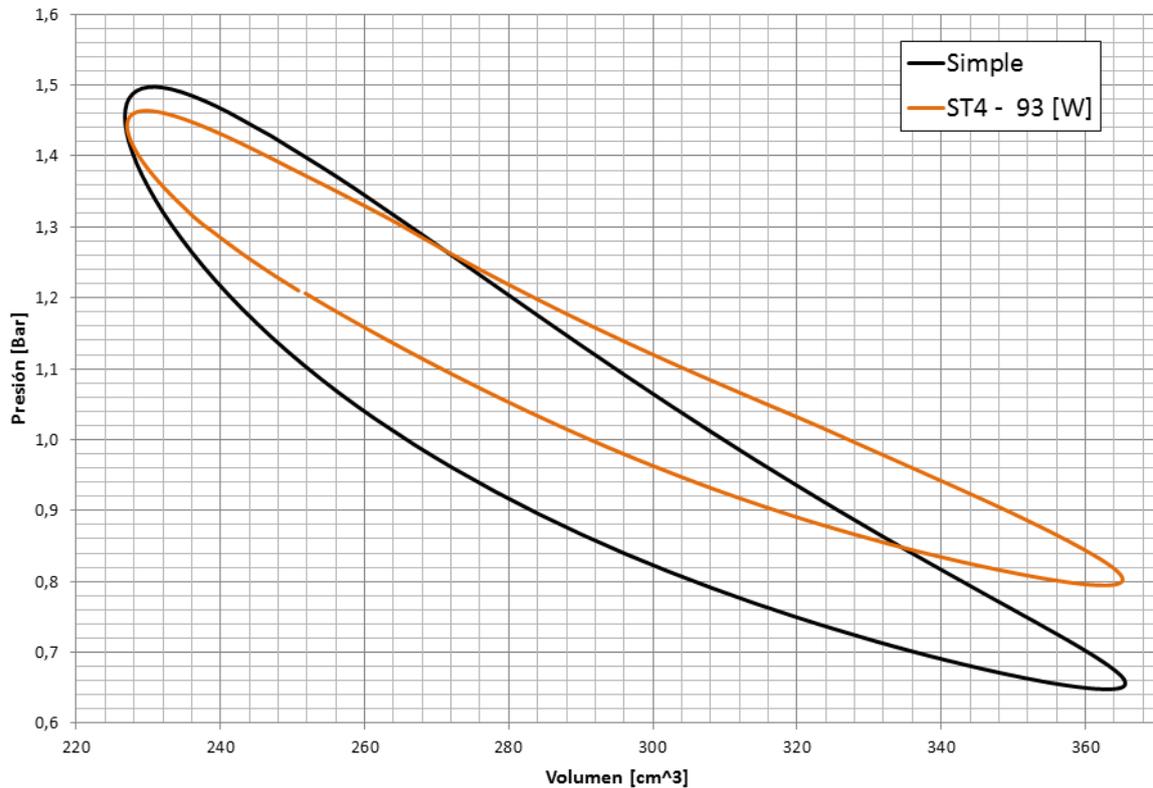


Figura 3.4 – Ciclo motor para el modelo ST4

| Variable | Modelo Simple | Modelo Base – ST4 | Error |
|---------------------------------------|---------------|-----------------------|-------|
| Temperatura del gas en el enfriador | 313,9 K | 391 K (valor medio) | 24,5% |
| Temperatura del gas en el regenerador | 557,3 K | 604 K (valor medio) | 8,4% |
| Temperatura del gas en el calentador | 902,5 K | 860,5 K (valor medio) | -4,7% |

Tabla 3.7 – Temperaturas medias para el modelo ST4

| | Modelo Simple | Modelo CFD ST4 | Error |
|------------------------|---------------|----------------|--------|
| Trabajo neto por ciclo | 2,77 J | 1,86 J | -32,9% |
| Potencia | 138,3 W | 93,0 W | -32,9% |

Tabla 3.8 – Potencia para el modelo ST4



4. RESUMEN

| Modificación | ST1 | ST2 | ST3 | ST4 |
|--|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| <i>Volúmenes muertos</i> | Junto al regenerador | Final de carrera de los pistones | Final de carrera de los pistones | 50% al final de carrera de los pistones y 50% junto al regenerador |
| <i>Modelo de transferencia de calor a la matriz porosa</i> | Modelo de no-equilibrio | Modelo de no-equilibrio | Ecuación de fuente volumétrica | Modelo de no-equilibrio |
| <i>Diámetro de las secciones</i> | Normalizado a 50mm | Normalizado a 50mm | Normalizado a 50mm | Reales |

Tabla 4.1 – Resumen de modificaciones en los modelos de CFD

| Variable | ST1 | ST2 | ST3 | ST4 |
|--|-------|-------|-------|-------|
| <i>Temperatura del gas en el enfriador</i> | 13,4% | 29,3% | 22,0% | 24,5% |
| <i>Temperatura del gas en el regenerador</i> | 3,0% | 4,8% | 10,0% | 8,4% |
| <i>Temperatura del gas en el calentador</i> | 0,7% | -4,6% | -4,8% | -4,7% |

Tabla 4.2 – Resumen de errores en temperatura

| | ST1 | ST2 | ST3 | ST4 |
|-----------------|--------|------|-------|--------|
| <i>Potencia</i> | -27,0% | 1,8% | 22,4% | -32,9% |

Tabla 4.3 – Resumen de errores en potencia

5. CONCLUSIONES

En el marco del proyecto Stirling-Solar se ha realizado la modelación mediante CFD de un motor de ciclo Stirling simplificado con el objetivo de validar la metodología anteriormente utilizada en el Modelo Simple.

El primer modelo realizado (ST1) mostró diferencias significativas en la potencia entregada, lo cual se debe a que la modelación de las zonas muertas se estaba haciendo de manera más cercano a la realidad que al Modelo Simple. El cambio de ubicación de estas zonas en el modelo siguiente (ST2) demostró que los volúmenes muertos que separan al regenerador del enfriador/calentador influyen de manera significativa en la generación de potencia. Esto es coherente con lo encontrado en la literatura pero, sin embargo, el error en la predicción de la



temperatura del aire en calentador y enfriador aumentó significativamente respecto al Modelo Simple. Considerando que esto podría ser causado por el modelo de no-equilibrio utilizado para la transferencia de calor desde la matriz porosa al fluido, se genera un modelo donde el aporte y extracción de calor es representado por una ecuación de fuente volumétrica (ST3).

Este nuevo modelo no genera resultados superadores respecto al anterior, ya que mantiene diferencias significativas en la predicción de temperaturas al tiempo que aumenta el error en la predicción de la potencia, por lo cual es descartado.

En este punto se considera que el modelo original con los volúmenes muertos en la posición del Modelo Simple (ST2) es el que mejor se compara en cuanto a la estimación de potencia, pero es de interés modelar que sucedería si se tiene en cuenta que los diámetros reales de pasaje de fluido no son iguales en todas las etapas del motor, sino que cambian significativamente entre enfriador, regenerador y calentador. Esto genera un último modelo numérico (ST4) en donde las zonas porosas de calentador y enfriador se representan por dominios con su diámetro físico real. Si bien este caso se aleja del Modelo Simple por sus consideraciones geométricas, es interesante notar como cae la potencia generada debido al uso ineficiente de las zonas porosas de los intercambiadores. Esto en el motor real es un punto a tener en cuenta en el diseño fluidodinámico de los intercambiadores.

6. REFERENCIAS

- [1] Gustavo Scarpin, "Modelo Simple de Motores Stirling", Inf. DMA-012/12, IUA-FI-DMA, 27/08/2012.
- [2] Gustavo Scarpin, "Optimización de Motores Stirling", Inf. DMA-013/12, IUA-FI-DMA, 09/10/2012.
- [3] Carrasco Diego, "Simulación y Optimización de un regenerador con matriz tipo malla de alambres arrollada para el Motor Stirling", Inf. DMA-013/12, IUA-FI-DMA, 05/11/2012.