



Estudio de distribución de temperatura en un motor mono-cilíndrico de combustión interna aplicando el método de elementos finitos

J. Rivas ^{1*}, G. Imbrioscia ¹, E. Heidenreich ¹

¹Laboratorio de Simulación y Diseño, Escuela Superior Técnica del Ejército General Manuel Nicolás Savio, Cabildo 15, C1426AAA Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
Correo-e: joserivas89@hotmail.com / labsimulacionest@gmail.com

RESUMEN

Resulta de vital importancia tener conocimiento de las temperaturas existentes en puntos clave de la cámara de combustión, para de este modo, poder predecir las condiciones en que se lleva a cabo el ciclo termodinámico dentro del cilindro. El conocimiento de estas temperaturas es vital para optimizar el circuito de refrigeración, componente fundamental para un correcto desempeño del motor.

En el presente trabajo se propone un método *experimental/numérico* para la obtención de las variables mencionadas anteriormente, mediante el cual no es necesario afectar la integridad de la cámara de combustión, lo que posibilita una primera determinación de las temperaturas alcanzadas en piezas claves del mismo de difícil acceso (Ej.: válvulas, asientos de válvulas, aristas de la cámara de combustión, etc.). Dicho procedimiento consiste en la medición de parámetros tales como temperatura sobre tapa de cilindro, velocidad de aire de refrigeración consumo de combustible, y condiciones ambientales sobre un motor mono-cilíndrico en funcionamiento regular y una simulación por elementos finitos de la distribución de temperaturas.

Los resultados obtenidos por medio del método de elementos finitos corresponden con los registrados a través de las mediciones realizadas como también con la bibliografía consultada[1,2], validando así el modelo numérico y convirtiéndolo en una alternativa económica y fiable a la hora de evaluar futuras modificaciones en el diseño del motor.

Palabras Claves: Motor, Temperatura, FEM, Calor, Instrumentación

REFERENCIAS

[1] Heywood John B., Internal Combustion Engine Fundamentals International Ed., McGrawHill,

ISBN 0-07-100499-8

[2] Methodology for the estimation of cylinder inner surface temperature in an air-cooled engine, Carvajal Trujillo, Jiménez-Espadafor, Becerra Villanueva, Torres García, Applied Thermal Engineering, Applied Thermal Engineering 31 (2011), Pág. 1474, 1481.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

Una de las limitaciones que se presentan a la hora de diseñar un motor son las temperaturas de operación que se hacen presentes en el mismo. Resulta de vital importancia tener conocimiento de las temperaturas existentes en puntos clave de la cámara de combustión.

Los modelos matemáticos utilizados para la predicción de los fenómenos que ocurren durante la operación de un motor suelen ser verdaderamente complejos y se encuentran bastante acotados a ciertas simplificaciones que han de hacerse. Esto incentiva a realizar desarrollos que encaren el problema desde otro punto de vista. De aquí nace la propuesta del presente trabajo de utilizar un método numérico y una corroboración experimental para estudiar y validar el modelo propuesto, sin utilizar la evolución del gas de trabajo como parámetro fundamental.

Este trabajo describe el desarrollo de un método para la obtención de la distribución de temperatura de un Motor de Combustión Interna (MCI) que utiliza el método de elementos finitos.

Después de realizar un relevamiento de los estudios llevados a cabo en el mundo y evaluar las distintas opciones, se establecen los siguientes alcances del proyecto:

- Modelado en elementos finitos de un MCI de cuatro tiempos de ciclo Otto.
- Medición de temperatura, velocidad de flujo de aire, consumo de combustible y condiciones ambiente como variables necesarias para calcular los parámetros del modelo.
- Simulación del modelo.
- Cálculo del coeficiente de convección y validación del modelo.
- Obtención de distribución de temperatura y gradiente de temperatura en el MCI.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Motor de estudio

Motor seleccionado: Motor 4T Marca Villa Hnos Modelo: 401/1-'C', cuyas características son:

Parámetro	Valor
Potencia	8 hp
RPM Max.	3200 rpm
Diámetro Cilindro	80.96 mm
Carrera Pistón	79.9 mm
Cilindrada	411cm ³
Refrigeración	Aire Forzado
Combustible	Nafta
Lubricación	Salpicadura



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Encendido	Rotor magnético
Peso	54Kg

Tabla 1

2.2. Hipótesis del método numérico

Para obtener la distribución de temperatura se trazó un procedimiento de cálculo el cual consta de los siguientes pasos.

1. Relevamiento geométrico del motor y discretización del mismo.
2. Se midió el flujo de calor recibido por la masa metálica del motor, a partir del calor ganado por el fluido de refrigeración. El mismo se puso como condición de contorno del modelo.
3. El flujo de calor presente en el ducto de admisión se calculó en base al consumo de combustible del motor.
4. Se extrapolo el flujo de calor interviniente en el ducto de escape en base al consumo de combustible de acuerdo a valores aportados en [1] [4].
5. En la superficie exterior la condición de contorno es el fenómeno de convección.

A partir de dichas condiciones se resolvió la ecuación

$$\nabla^2 T = 0 \quad (1)$$

2.2.1. Relevamiento de la geometría y discretización

Se relevaron y dibujaron en un programa de diseño todas las partes del motor intervinientes en el modelo. El mismo se constituye por: tapa de cilindro, válvulas, junta, cilindro y asientos de válvulas.

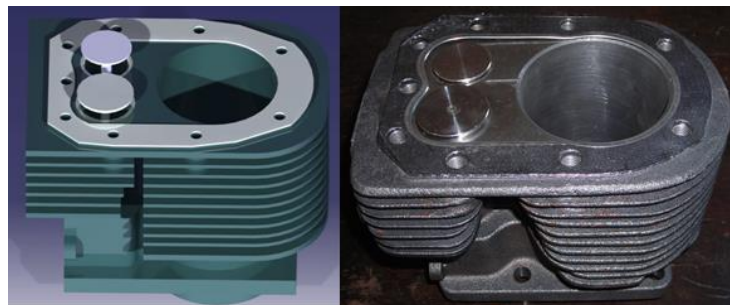


Figura 1

Se discretizó el dominio con un mallado tetraédrico, con las siguientes características (tabla 2):

Elementos	704996
Tipo de elemento	Tetra



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Relación de aspecto	1-10.7 (99% entre 1-4)
Largo promedio	2.78mm
Calidad del jacobiano	0.9-1.01

Tabla 2

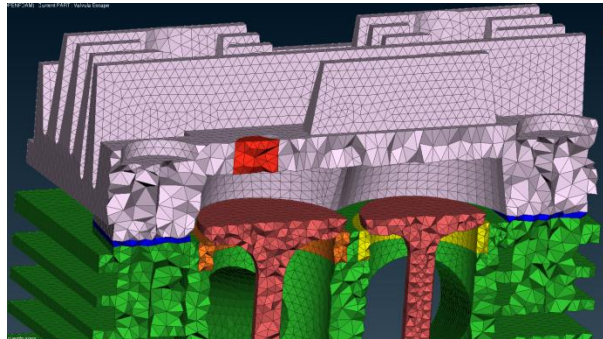


Figura 2

2.2.2. Obtención del flujo de calor en la cámara de combustión

La primera condición de contorno del modelo es el flujo de calor constante en las caras interiores del motor, aquellas expuestas al gas de trabajo.

Considerando que el intercambio de calor entre las aletas y el fluido refrigerante se da a presión constante, la velocidad con la que ocurre dicho fenómeno está dada por la variación de entalpia del gas [2]. De allí es que se calculó el calor absorbido mediante la ecuación (2).

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{m} \cdot C_{p,prom} \cdot \Delta T \quad [W] \quad (2)$$

Donde \dot{Q}_{abs} es la velocidad de transferencia de calor, \dot{m} es el flujo másico del fluido refrigerante y ΔT es la variación de temperatura que ocurre en el fluido.

La temperatura se midió en puntos cercanos al inicio y final de las aletas (punto 7,8 y 9 de la Fig. 3) y se separo los flujos de aire mediante una placa aislante, la que posibilita obtener los flujos de calor del cilindro y la tapa por separado.



IV CAIM 2014

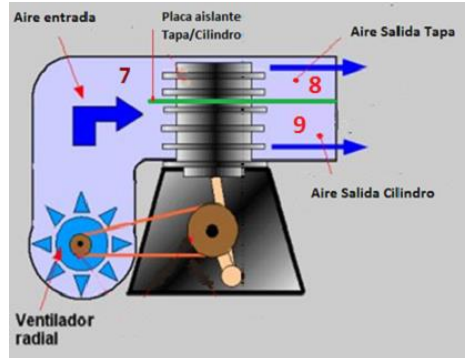
Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI



.Figura 3

Para la obtención del flujo másico se utiliza la formula (3)

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V \left[\frac{Kg}{s} \right] \quad (3)$$

Donde ρ y V son la densidad y velocidad del aire, y A la sección donde se miden los parámetros.

Se midió la velocidad del flujo con un anemómetro de molinillo. Contando con la geometría de la sección del lugar de medición se precede al cálculo del flujo másico.

La densidad del aire se calculó por

$$\rho_{aire} = \frac{p_{amb}}{T \cdot R_{aire}} \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad (4)$$

Donde p_{amb} es la presión ambiente en pascuales [Pa], T es la temperatura del aire en [Kelvin], y R_{aire} es la constante universal del gas ideal para el aire expresada en [J/K-Mol].

Finalmente se calculó el flujo de calor, que es el parámetro con el cual se ingresa al modelo

Flujo en caras internas del cilindro:

$$\dot{q}_{cil} = \frac{\dot{m}_{cil} \cdot C_{p,prom} \cdot (T_9 - T_7)}{A_{cil}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5)$$

Flujo en caras internas de la tapa de cilindro:



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

$$\dot{q}_{tapa} = \frac{\dot{m}_{tapa} \cdot C_{p,prom} \cdot (T_8 - T_7)}{A_{tapa}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (6)$$

Donde A_{cil} y A_{tapa} son las áreas de la cámara de combustión pertenecientes al cilindro y tapa respectivamente. Con la ecuación (3) se obtuvo \dot{m}_{cil} y \dot{m}_{tapa} , flujos máscicos de cilindro y tapa.

2.2.3. Obtención del flujo de calor en el ducto de admisión

Se supuso que el calor que egresa es igual al necesario para evaporar el combustible ingresante

$$\dot{q}_{adm} = \frac{\lambda_{vap} \cdot \dot{m}_{comb}}{A_{adm}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (7)$$

Donde λ_{vap} es el calor latente de vaporización del combustible, \dot{m}_{comb} el flujo máscico del mismo y A_{adm} es el área del ducto de admisión.

2.2.4. Obtención del flujo de calor en el ducto de escape

Basado en la bibliografía consultada, se calculó dicho flujo mediante una relación con respecto al combustible que ingresa al motor y el tipo de combustible.

$$\dot{q}_{esc} = \frac{0.022 \cdot \dot{m}_{comb} \cdot P_{cal}}{A_{esc}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (8)$$

Donde P_{cal} es el poder calorífico del combustible, A_{esc} es el área del ducto de escape y \dot{m}_{comb} es la masa de combustible que ingresa al motor.

2.2.5. Fenómeno de convección como condición de contorno

El cálculo del parámetro h se detalla en la sección (2.4) ya que no se calcula de forma directa.

2.3. Mediciones y ensayos

Se realizaron 3 ensayos con el motor operando en vacío. Las mediciones fueron realizadas con los elementos que se detallan en la tabla (3)

Parámetro	Instrumento
Temperatura	Termocupla tipo J
Temperatura	Integrado LM35
Temperatura	Pistola Infrarroja
Velocidad de Flujo de aire	Anemómetro de molinillo



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Consumo de Combustible	Balanza
------------------------	---------

Tabla 3



Figura 4

De los ensayos realizados se obtuvieron finalmente los valores presentados en la tabla (4) que son los requeridos para simular el modelo creado.

Parámetro	$q_{\text{tapa}} [\text{W/m}^2]$	$Q_{\text{cilin}} [\text{W/m}^2]$	$q_{\text{adm}} [\text{W/m}^2]$	$q_{\text{esc}} [\text{W/m}^2]$	$\Delta T_{7-8} [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T_{7-9} [^{\circ}\text{C}]$
E1	0,055	6,2614E-3	-6,938E-3	0,019	35	36
E2	0,0403	0,0127	-5,053E-3	0,014	36,2	38
E3	0,0728	0,016	-9,169E-3	0,025	38,6	41,7

Tabla 4

Las propiedades físicas de los materiales intervinientes se ilustran en la tabla (5)

Pieza	Material	Densidad (g/cm^3)	Conduc. Térmica ($\text{W/m}^2.\text{K}$)	Calor específico (KJ/Kg. K)
Cilindro y Tapa	Fundición gris maleable	7.3	51	0.5
Asientos	Acero alto en C	7.84	48	0.46
Junta	Material de Junta	2.5	0.17	0.816
Válvulas	Acero Cr-Ni	7.9	21	0.5

Tabla 5

2.4. Obtención del coeficiente de convección h

Para la obtención del Coef. h de convección que valide el modelo, se realizó un proceso de iterado simple y efectivo. Se recalculó el coeficiente h en función del error que se obtiene en la comparación de las temperaturas simuladas y las medidas (ecuación 9)



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

$$\varepsilon = T_s - T_m \quad (9)$$

Donde T_s es la temperatura de la simulación y T_m es la medida en el ensayo. Dicho error no debe ser mayor al 10%. Se recalculó un h para cada punto de control, tal que el error porcentual sea cero, mediante la ecuación (10), la cual requiere dos valores de simulación Figura (5).

$$h = \alpha \cdot \varepsilon + \beta \quad (10)$$

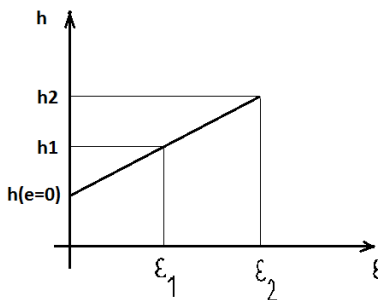


Figura 5

Se calcula finalmente un único parámetro h para el fenómeno que ocurre en la tapa y otro para el que ocurre en el cilindro. Los mismos se calculan con la Ecuación (10)

$$h_{medio} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (10)$$

Donde h_i es el valor recalculado de h en cada punto y n el número de puntos de control.

Con los dos nuevos valores de h calculados se procede a realizar otra simulación, utilizando estos datos como variables de entrada y obteniendo nuevos patrones de temperatura. Con estos valores se continúa la iteración, pero cambiando los nuevos valores de temperatura obtenidos por aquellos anteriores que presentan un mayor error cuadrático medio, se ilustra el proceso en la Figura (6).



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

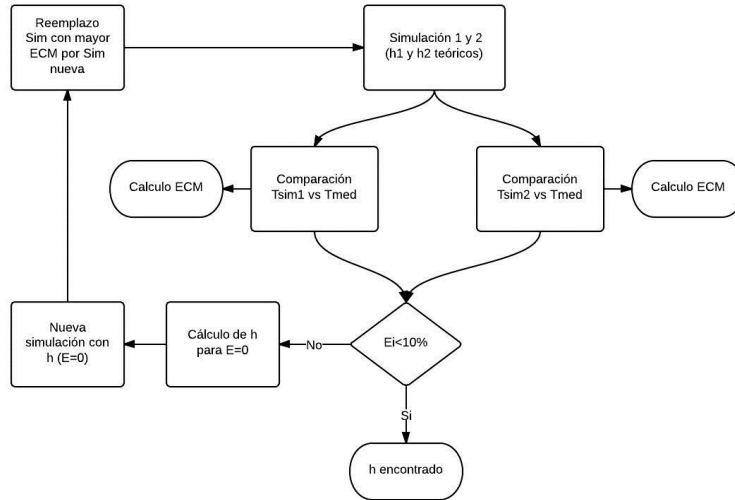


Figura 6

3. RESULTADOS

El primer y segundo ensayo no presentaron errores mayores al 20% para el primero y al 15% para el segundo, pero no cumplieron con la condición obtener errores menores al 10%. El tercer ensayo fue el que cumplió con la condición propuesta e incluso se obtuvieron errores porcentuales mucho menores al exigido. Se ilustran a continuación los resultados del tercer ensayo Figura(7),Tabla(6).

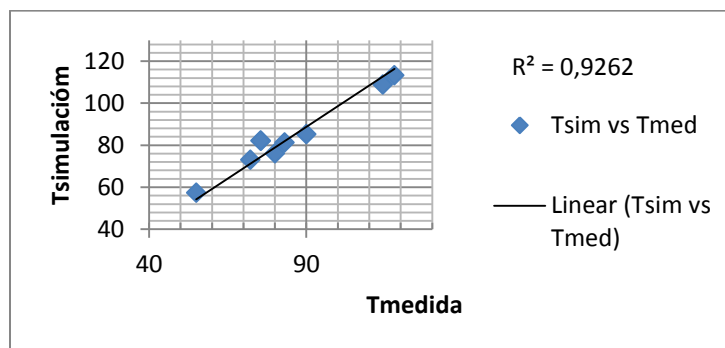


Figura 7

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
TSimulación[°C]	109	82	73	81	113	57	85	82	76
Tmedida[°C]	114	76	72	83	118	55	90	75	80
Error %	-4,9	8,4	1,0	-2,2	-4,1	4,3	-5,3	8,9	-5,0

Tabla 6



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Los valores obtenidos de h correspondientes al tercer ensayo se ilustran en la tabla 7.

	Tapa	Cilindro
h [$W / ^\circ C \cdot m^2$]	542.7	39.97

Tabla 7

La distribución de temperatura obtenida se muestra en la Figura (8) y Figura (9)

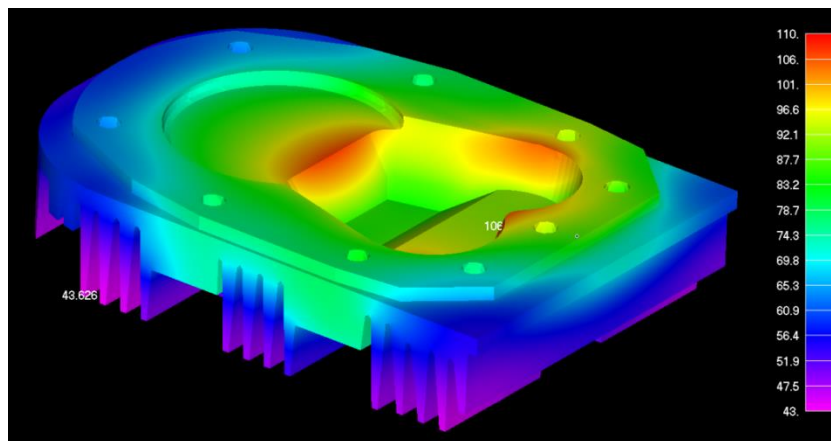


Figura 8

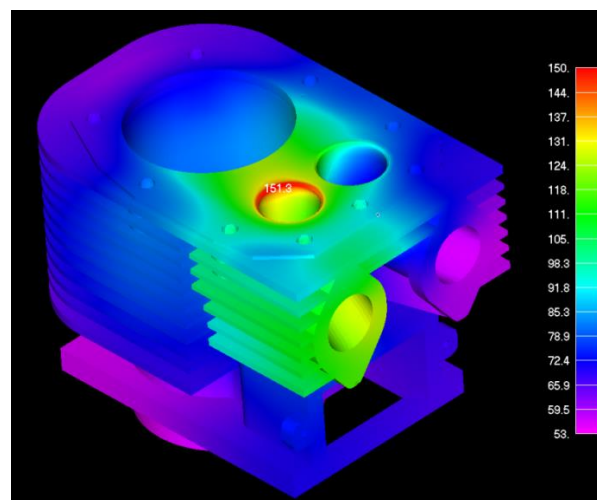


Figura 9

4. CONCLUSIONES

4.1. Distribución de temperatura calculada



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Comparando los resultados obtenidos con los propuestos por [5] se observan las similitudes en cuanto a la distribución de temperatura.

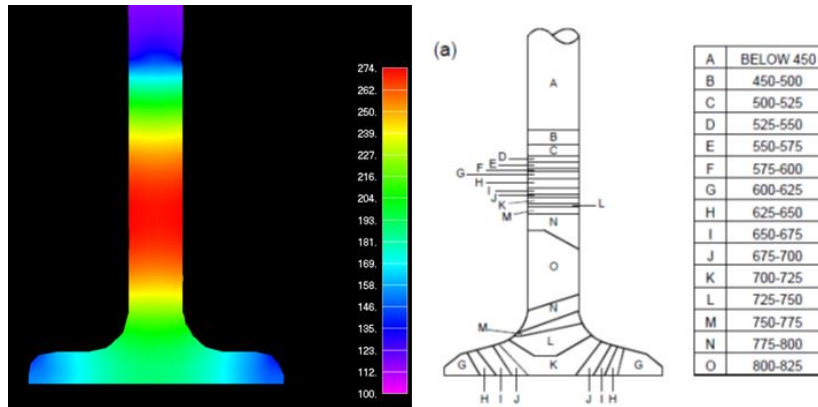


Figura 10

En el vástago de la válvula de escape se encuentra la mayor temperatura hallada en el modelo, dado que este no solo recibe flujo de calor proveniente de la cabeza de la válvula, sino que también está expuesto a los gases de escape, flujo de gases a alta temperatura y alta velocidad.

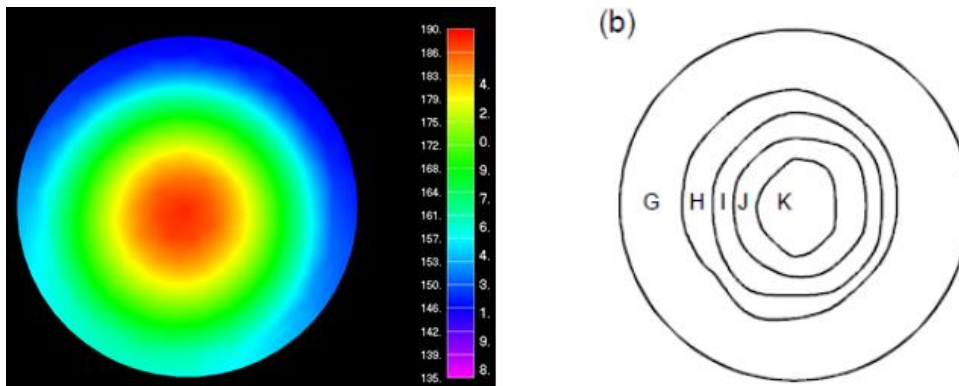


Figura 11

En la cabeza de la válvula de escape se observa una distribución similar a la presentada por [5] donde se observa la zona central a alta temperatura disminuyendo en forma de anillos hacia el perímetro externo, lugar donde se da el contacto con el asiento de escape, por donde evacua el calor la válvula cuando está cerrada.

La diferencia de la distribución de temperatura calculada con la ilustrada por [5] se da por que los ensayos se realizaron con el motor operando en vacío mientras que los valores con los que se compara son obtenidos mediante ensayos del motor operando con carga.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

4.2. Validación del modelo

Se logró validar el modelo numérico encontrando el parámetro h que asegura una temperatura coincidente en los puntos de control. El hecho de haber validado el modelo brinda seguridad en cuanto a los resultados obtenidos, y permite trabajar de forma segura con los resultados obtenidos para su utilización en trabajos futuros.

4.3. Obtención de h

Se obtuvo un coeficiente de convección h cuyo valor es comparable con el obtenido por [3,4]. La concordancia del valor del coeficiente de convección es un punto más a favor de la validación del modelo.

4.4 Conclusión final

Considerando el proyecto planteado al inicio de esta investigación, el desarrollo de la misma y los resultados obtenidos, se concluye que se han alcanzado los objetivos planteados.

5. REFERENCIAS

- [1] Heywood John B., Internal Combustion Engine Fundamentals International Ed., McGrawHill, (lugar de edición), AÑO
- [2] Cengel Yonus A., Transferencia de Calor y Masa 3Ed., McGraw-Hill,(LUGAR), 2007
- [3] Elisa Carvajal-Trujillo, Francisco J. Jiménez-Espadafor, José A. Becerra Villanueva, Miguel Torres García, Methodology for the estimation of cylinder inner surface temperature in an air-cooled engine, Applied Thermal Engineering, Applied Thermal Engineering, 31, Pág. 1474,1481, (2011)
- [4] Elisa Carvajal-Trujillo, Francisco J. Jiménez-Espadafor, José A. Becerra Villanueva, Miguel Torres García; Methodology for the estimation of head inner surface temperature in an air-cooled engine; Applied Thermal Engineering, 35, Pág. 202,211, (2012)
- [5] R. Lewis & R. S. Dwyer-Joyce; Automotive Engine Valve Recession; Professional Engineering Publishing; ISBN 1 86058 358 X

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Secretaria de Investigación de la Escuela Superior Técnica por el apoyo brindado para y durante la ejecución de este trabajo.