



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

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

J. Rivas^{1*}, G. Imbrioscia¹, E. Heidenreich¹

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 [3-5], 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.



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 [3,4] 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

En esta sección vamos a describir los métodos utilizados para llevar a cabo este trabajo. Primeramente describimos el motor luego se detallan las hipótesis adoptadas para la realización de este estudio. Seguidamente se describe el cálculo de las condiciones de contorno del modelo numérico que se simuló.

2.1. Motor de estudio. Geometría y discretización.

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



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

Carrera Pistón	79.9 mm
Cilindrada	411cm ³
Refrigeración	Aire Forzado
Combustible	Nafta
Lubricación	Salpicadura
Encendido	Rotor magnético
Peso	54Kg

Tabla 1

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.

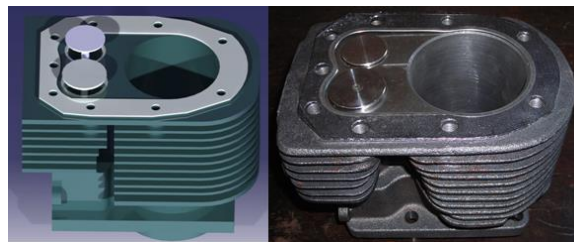


Figura 1. Cilindro motor

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

Elementos	704996
Tipo de elemento	Tetra
Relación de aspecto	1-10.7 (99% entre 1-4)
Largo promedio	2.78mm
Calidad del jacobiano	0.9-1.01

Tabla 2. Características del mallado del modelo

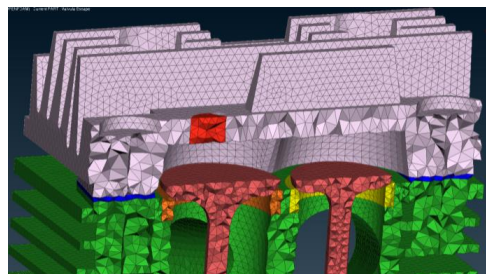


Figura 2. Modelo mallado

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. 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.
2. El flujo de calor presente en el ducto de admisión se calculó en base al consumo de combustible del motor.
3. 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].
4. En la superficie exterior la condición de contorno es el fenómeno de convección.

A partir de dichas condiciones se resolvió la ecuación de calor en régimen estacionario, ecuación (1), usando el método de elementos finitos sobre la geometría discretizada.

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

2.2.1. 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

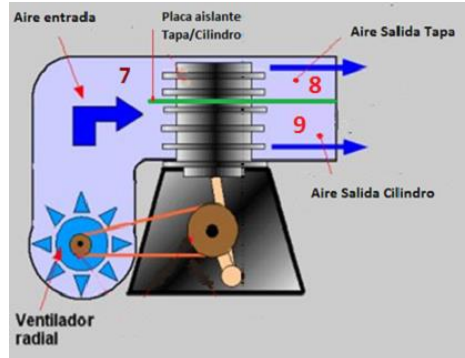


Figura 3. Esquema Motor Refrigerado por aire

Para la obtención del flujo másico se utiliza la ecuación (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 pascales [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:

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



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



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

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

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 másicos de cilindro y tapa.

2.2.2. 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 másico del mismo y A_{adm} es el área del ducto de admisión.

2.2.3. 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.

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

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.

2.2.4. 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
Consumo de Combustible	Balanza

Tabla 3. Instrumentos de Medición Utilizados



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

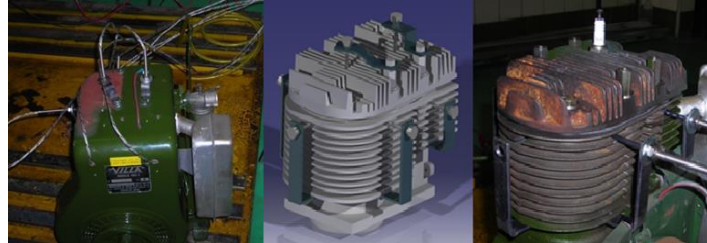


Figura 4. Montaje de Termocuplas en el Motor

Para realizar las mediciones de temperatura realizadas con termocuplas e integrados LM35 en los puntos de control y flujos de aire, se desarrollaron dispositivos de instalación (Figura (4)). Se construyó a su vez una placa electrónica para el acondicionamiento de la señal de los instrumentos mencionados. Para la lectura de dichas señales se utilizó una placa de adquisición Arduino Mega. Se desarrolló a su vez un programa de adquisición de datos en Labview para la adquisición los datos leídos con la placa Arduino.

2.4. Obtención del coeficiente de convección h

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

$$\varepsilon = \frac{T_s - T_m}{T_m} 100 \quad (9)$$

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).

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

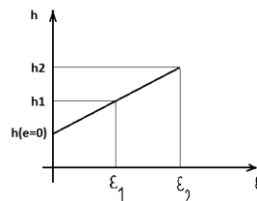


Figura 5. Calculo del coeficiente de convección en puntos de control



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

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 (11)

$$h_{medio} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (11)$$

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).

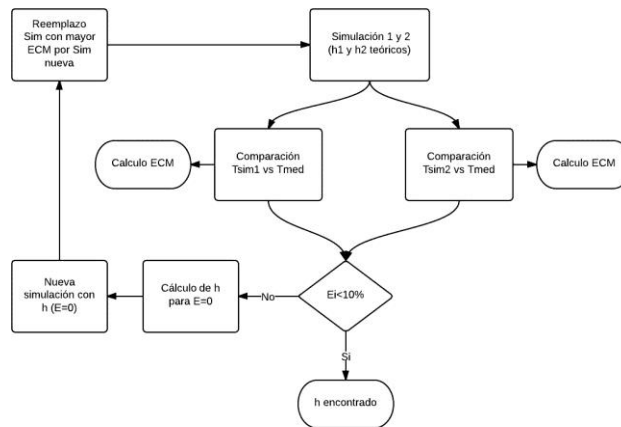


Figura 6. Esquema del proceso de obtención del coeficiente de convección h

3. RESULTADOS

3.1 Experimentales

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

Ensayo	q_{tapa} [W/m^2]	Q_{cilin} [W/m^2]	q_{adm} [W/m^2]	q_{esc} [W/m^2]	ΔT_{7-8} [$^{\circ}C$]	ΔT_{7-9} [$^{\circ}C$]
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



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

E3	0,0728	0,016	-9,169E-3	0,025	38,6	41,7
----	--------	-------	-----------	-------	------	------

Tabla 4. Valores de entrada para el modelo numérico

Para la simulación se usaron las propiedades físicas de los materiales ilustradas en la tabla (5)

Pieza	Material	Densidad [g/cm ³]	Conduc. Térmica [W/m ² .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. Propiedades físicas de los materiales usados en el modelo

Usando la ecuación (9) para la determinación del error porcentual, se determinó que el primer ensayo arrojó valores entre el 5 – 20 %, y para el segundo se obtuvieron errores porcentuales con valores entre 5-15%, pero no cumplieron con la condición de 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 dicho ensayo Figura(7),Tabla(6).

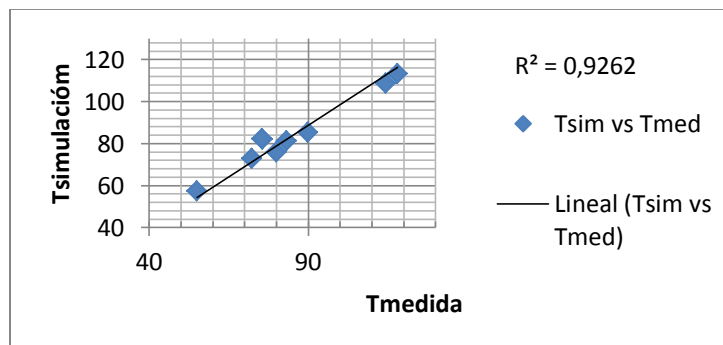


Figura 7. Comparación valores de temperatura obtenidos por simulación vs valores medidos

	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. Temperatura simulada en los puntos de control vs Temperatura medida



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. Dicho coeficiente se obtuvo mediante la Ecuación (11).

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

Tabla 7. Valores del coeficiente de convección obtenido

Los resultado de la simulación con el h calculado se muestra en la Figura (8), la correspondiente a la tapa, y correspondiente al cilindro en la Figura (9).

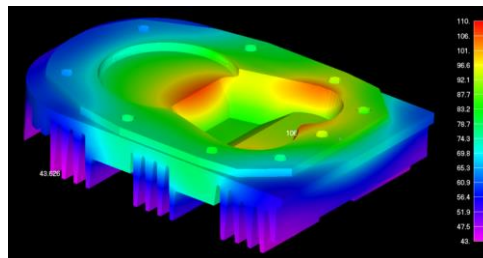


Figura 8. Distribucion de temperaturas en tapa de cilindro.

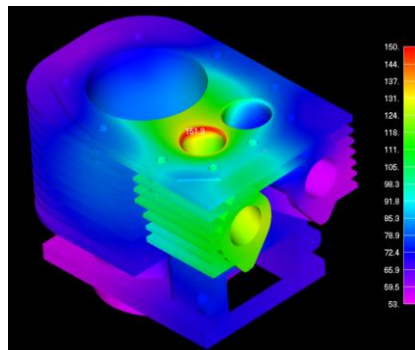


Figura 9. Distribucion de temperaturas en el cilindro.

4. CONCLUSIONES

4.1. Distribución de temperatura calculada

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



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

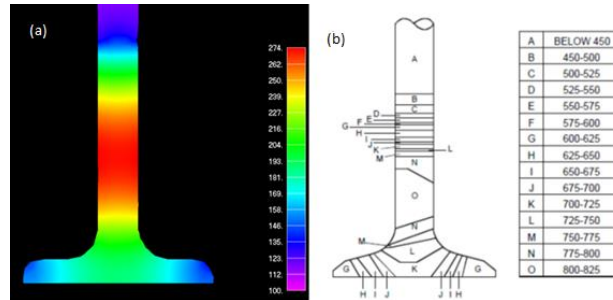


Figura 10. Vástago de válvula de escape. Resultados obtenidos(a) vs distribución presentada por [5] (b)

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.

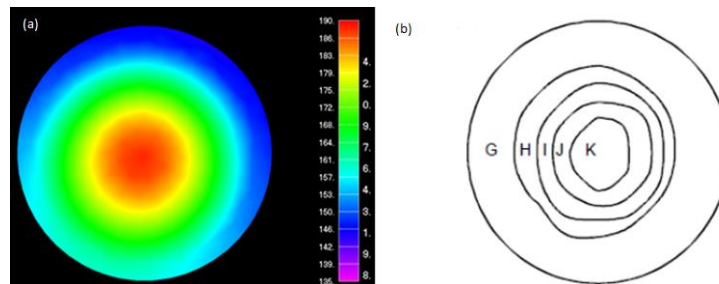


Figura 11. Cabeza de Válvula de Escape. Resultados obtenidos vs distribución presentada por [5]

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 entre la temperatura predicha por el modelo respecto a la presentada en la referencia [5] (Figuras 10 b y 11 b) se debe a que los ensayos se realizaron con el motor operando en vacío mientras que los valores de contraste fueron obtenidos mediante ensayos del motor operando a con carga.

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, obteniendo una herramienta fiable para futuros desarrollos.

4.3. Obtención de h

Se obtuvo un coeficiente de convección h cuyo valor es comparable con el presentado en [3, 4].

5. REFERENCIAS

- [1] Heywood John B., Internal Combustion Engine Fundamentals International Ed., McGrawHill, 1988
- [2] Cengel Yonus A., Transferencia de Calor y Masa 3Ed., McGraw-Hill, 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 y a la empresa Villa Hnos. por el apoyo brindado para y durante la ejecución de este trabajo.