

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TÉRMICO DE UN MOTOR A VAPOR MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA Y MEDICIONES IN SITU

P. Dellicompagni¹, L. Saravia², F. Albesa³, M. Altamirano

INENCO – Universidad Nacional de Salta – CONICET - Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina
Email: pablodellicompagni@gmail.com. Tel. 0387-4255424

Recibido 26/07/17, aceptado 24/09/17

RESUMEN: En el presente trabajo se muestra un análisis computacional de las pérdidas térmicas que se producen en el cabezal de un motor a vapor, el cual ha sido instalado en un sistema de concentración Fresnel lineal (CFL) para la conversión termo mecánica. El objetivo es determinar las pérdidas térmicas mediante la simulación computacional en Simusol partiendo de la medición de temperaturas del vapor en el interior del motor así como en las paredes exterior del mismo. Los modelos térmicos aquí propuestos se elaboran mediante Simusol y los resultados se comparan con mediciones experimentales.

Palabras clave: Motor a vapor, pérdidas térmicas, temperatura, flujo de calor, Simusol.

INTRODUCCION

Normalmente, en las plantas de generación eléctrica basadas en energía solar térmica para la producción de potencia, la conversión termoeléctrica se realiza mediante turbinas de alta y/o mediana presión. Por lo general, el fluido calo – portador es el vapor de agua, dada la versatilidad con la que puede ser empleado desde el punto de vista de sus propiedades termodinámicas. Dado el uso de ésta tecnología, el vapor de agua empleado debe cumplir con ciertos requerimientos estrictos en cuanto a la calidad del mismo, presión, temperatura, estabilidad química y pureza.

No obstante, existen otras tecnologías para la conversión termoeléctrica a partir del vapor de agua: los motores a vapor. Esta tecnología fue pionera a mediados del siglo XIX (1840 – 1870) con la Revolución Industrial y desde allí las diversas aplicaciones en locomoción, aviación, navegación y minería comenzaron a desarrollarse.

El primer motor a vapor dispuesto en una planta solar térmica para la generación de energía eléctrica, denominada White Cliffs, fue en el año 1981. La misma fue construida para abastecer a la ciudad homónima de Nueva Gales del Sur, que en esos tiempos no disponía de acceso al sistema interconectado de redes eléctricas. Este equipo funcionó durante once años, produciendo energía eléctrica durante cientos de horas y demandando menor mantenimiento que un motor Diesel, teniendo por lo general un rendimiento elevado superando el 20 %. El rango de potencia de estas máquinas desarrolladas por la Universidad Nacional Australiana (UNA) oscilaba entre 40 kW y 200 kW (Prasad, 1993).

En 1996, con la llegada de la conexión al sistema eléctrico en red, la planta pasó a ser de generación fotovoltaica con una capacidad de producción de unos 45 kWe, abasteciendo de electricidad a unas 30 viviendas, cesando su operación en 2004 (www.energymatters.com.au) para luego convertirse en un lugar de preservación histórica (www.abc.net.au). En Figura 1 se muestra un esquema de un motor tri – cilíndrico desarrollado por la UNA, el cual fue modificado y pasó de funcionar en base a un ciclo Diesel a un ciclo de vapor, para su uso en la central White Cliffs.

¹ Becario Doctoral CONICET

² Investigador Principal Retirado del CONICET

³ Personal CPA – UNSa – FCE

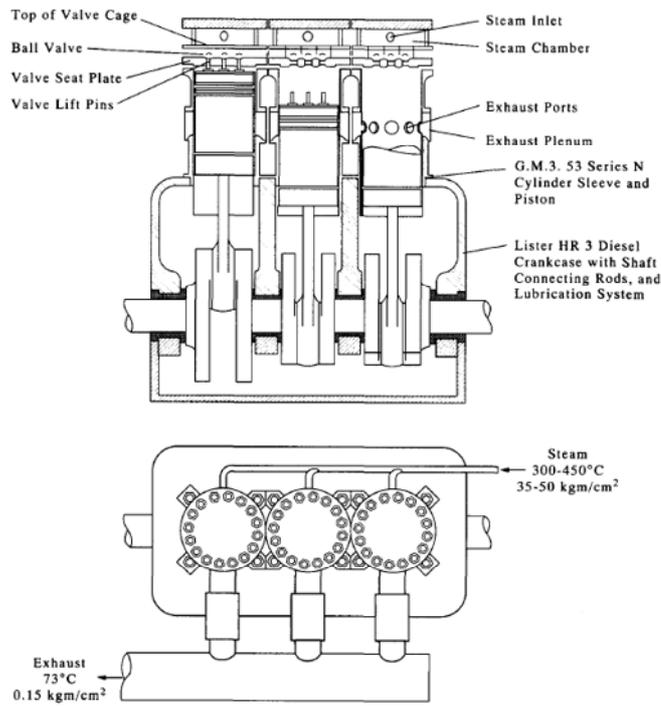


Figura 1: Motor desarrollado por la UNA.

El aprovechamiento energético desde el punto de vista del rendimiento global de la máquina térmica, está fuertemente ligada con la potencia mecánica en el eje del motor y con las pérdidas térmicas hacia el exterior, a través de las paredes de los cilindros, en contraste con la energía disponible en el vapor de admisión. Las pérdidas de calor hacia el exterior juegan un papel importante dentro del balance energético de toda máquina térmica, pudiendo tener un impacto negativo de manera excesiva en el rendimiento de la misma.

Actualmente existe un sistema de conversión solar térmico de tecnología Fresnel en la Ciudad de San Carlos, provincia de Salta (Saravia et al., 2014), en el cual se ha montado un bloque de potencia cuya tecnología de conversión termo mecánica es un motor a vapor bicilíndrico de doble efecto (Figura 2). El mismo fue adquirido por el INENCO en un convenio marco de préstamo con el INTI.

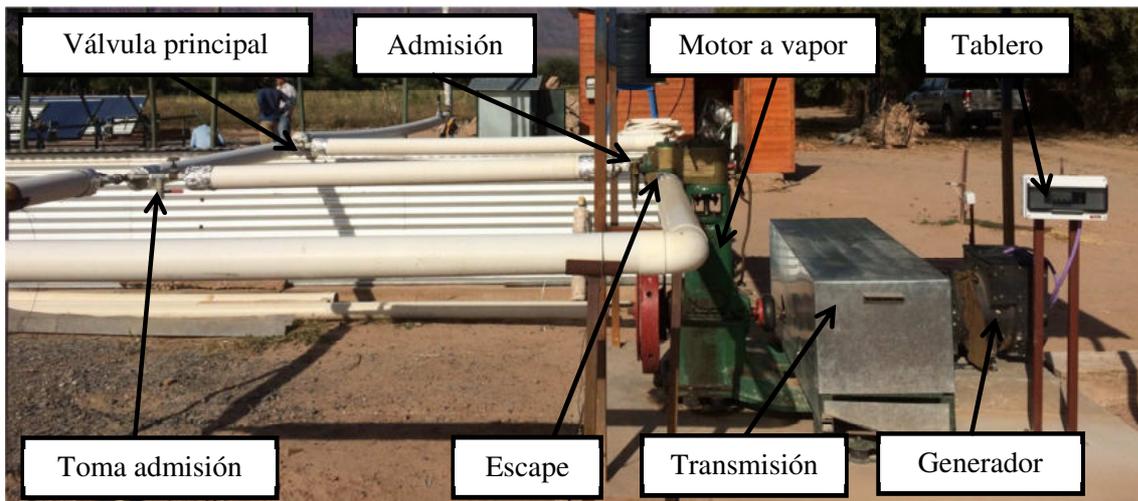


Figura 2: Motor a vapor y su instalación en el CFL de San Carlos.

En el presente trabajo se realizará la simulación en Simusol (Saravia et al., 2007) del cabezal del motor mostrado en la Figura 2, con el objetivo de cuantificar dichas pérdidas de calor hacia el exterior considerando que las paredes de los cilindros son de hierro fundido y que el flujo de calor de pérdida se produce a través de los mecanismos de convección, conducción y radiación. También se simulará el

cabezal motor con una capa aislante de manta cerámica de 2 cm de espesor y se comparará los resultados con respecto al caso anterior. Se tomará como dato de entrada a la temperatura del vapor dentro de la cámara de cilindro, la cual fue medida in situ.

HIPÓTESIS DE SIMULACIÓN

Se considerarán las siguientes hipótesis para realizar la simulación.

- La transmisión de calor hacia el exterior se realiza de manera perpendicular a través de las paredes de los cilindros y de las tapas del cabezal.
- La forma de las paredes de conducción serán geoméricamente regulares.
- El material del cabezal motor es homogéneo tanto en composición cómo en espesor de pared, de hierro fundido.
- El pistón es de aluminio, también homogéneo.
- Se considerará que la temperatura del vapor de admisión es uniforme en todo su volumen, para todos los procesos del ciclo del motor.
- El título de vapor será la unidad.
- No se considerarán las pérdidas por conducción en los vástagos de soporte del cabezal y las conexiones en la admisión y el escape.
- No se considerarán las pérdidas hacia el exterior por válvulas, caños de lubricación y conductos de purga.
- No se consideraran las caídas de presión por laminado en válvula de admisión.
- Las pérdidas por condensación en las paredes internas no serán tomadas en cuenta. Se supondrá el motor en régimen térmico y de rotación en 300 rpm.
- Solo se simulará el estado térmico del cabezal.
- Se considerará la transmisión del calor a través de cada pared por separado.

En la Figura 3a se muestra un esquema del cabezal a simular que incluye la válvula de distribución de vapor en los cilindros, formando una sola unidad con los mismos. Se observa que los laterales son planos y los extremos semicirculares. El vapor ingresa por el frente a través del ducto de admisión, entrega parte de su energía realizando trabajo y otra parte se pierde a través de las paredes de los cilindros. La energía térmica residual queda contenida en el vapor de escape. La Figura 3b muestra la forma interna del cilindro y las conexiones con la cámara de distribución de vapor.

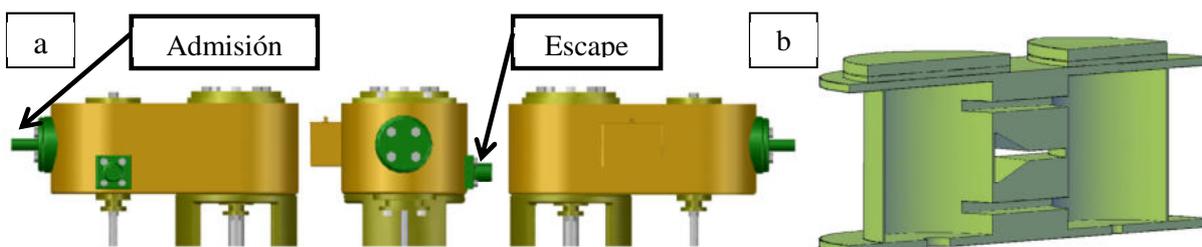


Figura 3: Vistas del cabezal motor. a) Con aislante y carcasa. b) Esquema interno.

PARÁMETROS DE ENTRADA

Temperatura del vapor de admisión

La temperatura del vapor dentro de la cámara del pistón se midió mediante una termocupla extra delgada. El rango de temperatura esperado oscila entre 100 °C y 180 °C, con lo cual el rango de la presión del vapor va desde 1 bar hasta 10 bar, respectivamente. Se emplearon los siguientes instrumentos:

- a) Termocupla tipo K de muy pequeño calibre, marca Digi – Sense, cuyas especificaciones técnicas pueden encontrarse en el sitio web <https://www.coleparmer.com/i/digi-sense-type-k-fine-ga->

[probe-0-005-dia-14-20-ohm-strip-end-12-1-5-pk/0841901L](https://www.sparkfun.com/products/11841). El sensor de temperatura tiene un diámetro de 0.005" (0.127 mm) lo que permite introducirlo entre la tapa y la camisa del motor.

- b) Placa amplificadora load Cell Shield XFW-HX711 (Figura 4.a). Conversor analógico digital de 24 bits. Capaz de enviar los datos medidos a tasas de 10 Hz u 80 Hz, también incorpora la opción de usar un oscilador externo de cristal. Datos técnicos y código de programación en Arduino en sitio web <https://learn.sparkfun.com/tutorials/load-cell-amplifier-hx711-breakout-hookup-guide#arduino-code>.
- c) Para el registro de los datos medidos se programa en lenguaje Arduino un adquisidor de datos (Figura 4.b). Esta placa micro controladora Arduino está basada en el microprocesador AT mega 2560. El Data Logging Shield cuenta con lectora de memorias SD y Reloj de Tiempo Real.

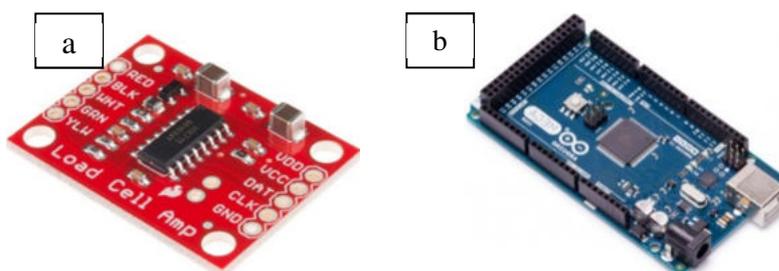


Figura 4. a) Amplificador modelo XFW – HX711. b) Datalogger Arduino Mega 2560 R3

El régimen nominal de giro del motor es de 270 rpm, lo cual significa que la frecuencia del ciclo de vapor ronda entre los 4 y 5 Hz, correspondiéndole un periodo de 0,25 y 0,2 s. El período de muestreo, con la tecnología seleccionada, es de 20 puntos por ciclo. A 5 Hz corresponde un tiempo de 10 ms entre dato y dato. Se requiere además que las series de medidas registren al menos 10 ciclos consecutivos.

Calibración del equipo de medición

En primer término se calibra el conjunto termocupla – HX711 – datalogger en condiciones estáticas en un calibrador (Figura 5). La placa HX711 entrega un paquete de datos medidos para cada punto de temperatura seleccionado, luego se toma esa serie de mediciones y se realiza el promedio obteniéndose así un punto de temperatura calibrado. Cada punto se mide durante 6 segundos.



Figura 5. Calibrador y termocupla.

La calibración se realizó con el bloque calibrador Dual Block 9009 de Hart Scientific, para 5 puntos que abarcan el rango de temperaturas esperadas. En la Tabla 1 se muestra los resultados de la medición y calibración.

Temperatura de referencia (°C)	0	45	100	150	200
Valor promedio entregado por la HX711	-424901	718534	180632	358184	485129
Cantidad de datos medidos por punto	550	607	550	550	550

Tabla 1. Resumen de resultados de la calibración.

Con los datos de temperatura de referencia y el valor promedio de los datos medidos por la HX711 se construye la curva de calibración del sistema adquirente de datos, como se muestra en la Figura 6.

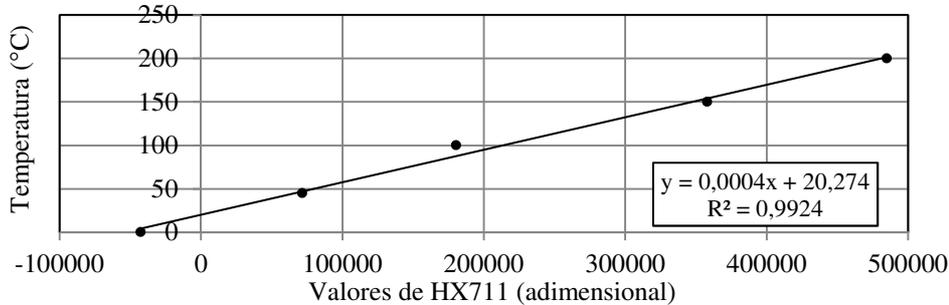


Figura 6. Curva de calibración del conjunto termocupla – HX711 – datalogger.

Tomando como patrón a la temperatura mostrada en el display del bloque calibrador, en la Tabla 2 se muestran los valores de temperatura medida promedio y a las desviaciones estándar.

Temperatura de referencia (°C)	0	45	100	150	200
Temperatura medida promedio (°C)	4,4	47,1	87,8	154,1	201,6
Desviación Estándar en medición (°C)	0,3	0,4	0,8	1,9	4,7

Tabla 2. Valores promedios y desviaciones estándar de temperaturas medidas.

Medición en cámara del pistón y cilindro exterior

La medición de la temperatura se realizó dentro del cilindro superior, insertando la termocupla entre la tapa y la junta térmica. Además, se midieron temperaturas exteriores del cilindro en diversos puntos, con termocuplas tipo k y un adquirente de datos Digi Sense de 12 canales. En las Figuras 7a y 7b puede observarse las termocuplas empleadas para la medición interior y exterior. En el caso de las termocuplas exteriores, la medición de la temperatura se realiza con 4 segundos de separación entre dato y dato. La temperatura medida en el interior del cilindro superior será asumida también como la temperatura del vapor en el cilindro inferior, pero con un desfase temporal de 180° o bien T/2, con T período. Esto se debe a la imposibilidad de insertar otra termocupla delgada en el cilindro inferior dado a que el mismo no tiene acceso.

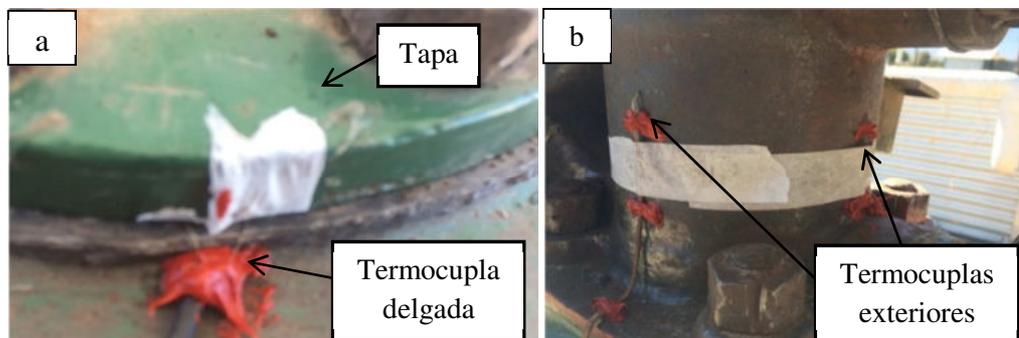


Figura 7. Termocuplas de medición. a) Inserción en cilindro superior. b) Medición en el exterior del cilindro superior.

Las medidas de temperatura se realizaron con el cabezal sin aislamiento y con aislamiento de manta cerámica, conservando los mismos puntos de medición exterior. Se tomaron tres medidas para cada instancia con el motor en funcionamiento, habiendo sido el mismo precalentado. En las siguientes

curvas se muestra las mediciones de temperatura dentro del cilindro superior, para el cabezal sin aislamiento.

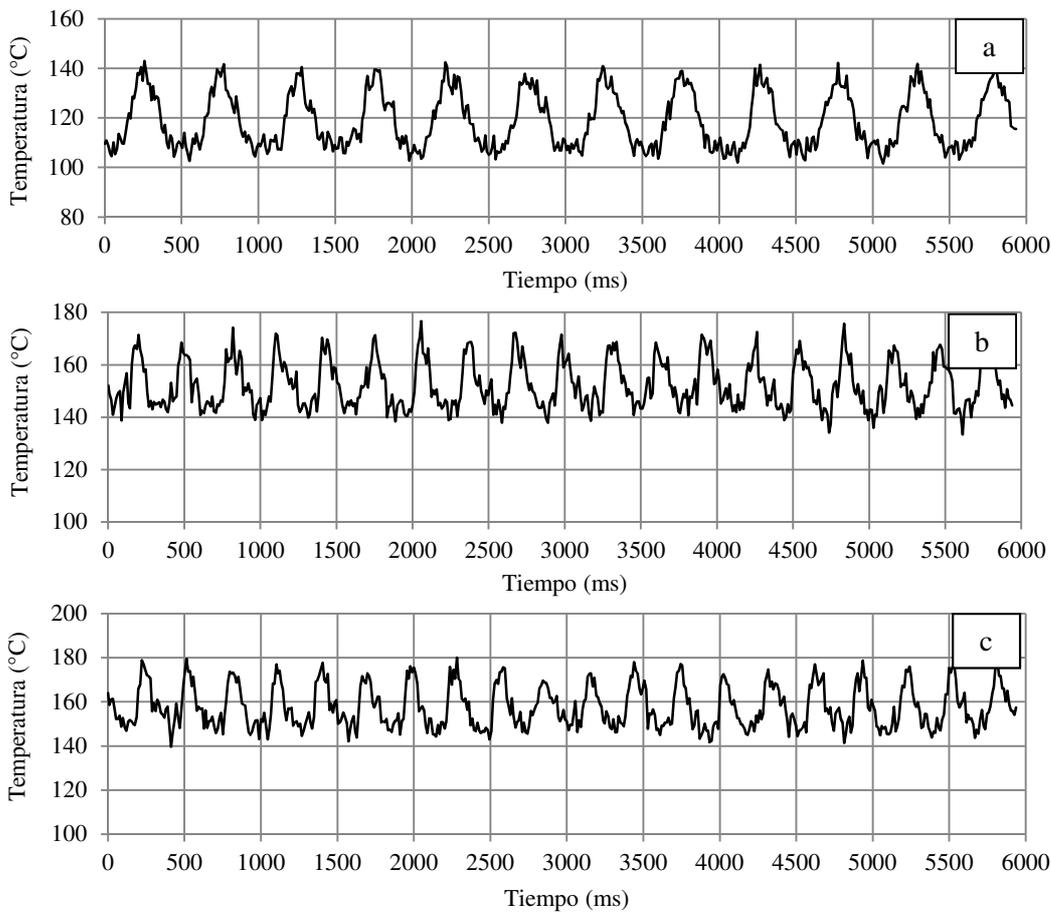


Figura 8. Temperaturas del vapor en cilindro superior, con el cabezal sin aislamiento. a) 119 rpm. b) 192 rpm. c) 204 rpm.

En la Figura 9 se muestran las temperaturas de las paredes exteriores del cilindro, las cuales se midieron a lo largo de todo el ensayo del motor a vapor. Las termocuplas 2, 3, 4 y 6 fueron distribuidas de manera perimetral en la cara externa del cilindro, tal como se mostró la Figura 7b. La termocupla 1 y 5 miden la temperatura externa de la tapa y la base del cilindro, respectivamente. Se adiciona una termocupla libre para medir la temperatura ambiente en las proximidades del motor a vapor.

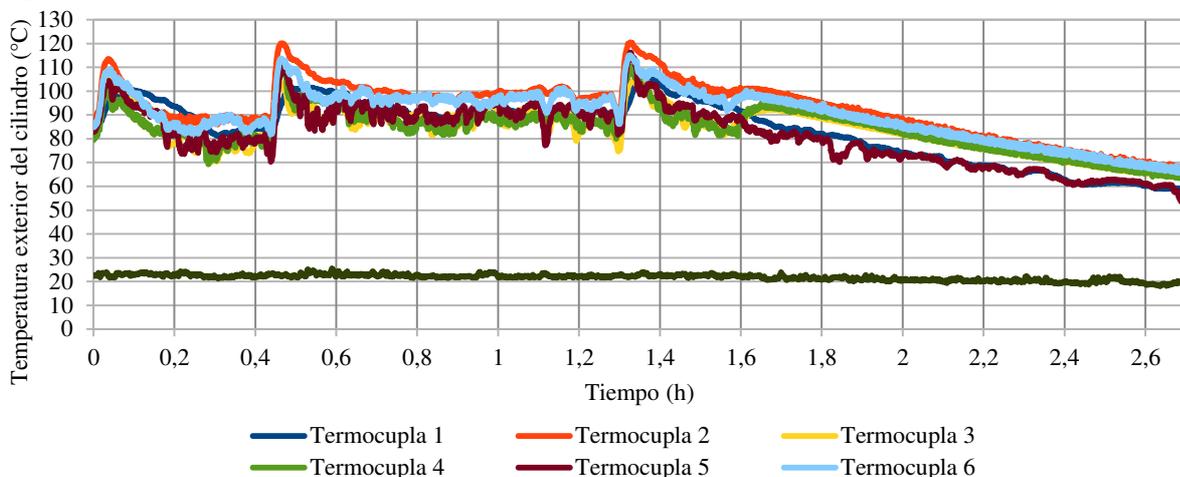


Figura 9. Temperaturas exteriores del cilindro y temperatura ambiente. Medición con cabezal sin aislación térmica.

Los tres picos transitorios corresponden a los momentos en que el motor fue accionado a diferentes regímenes de rpm para realizar la medición de la temperatura del vapor. No se logra el régimen estable dado a que los ensayos se realizaron con un caudal más bajo de lo necesario, por fallas en la bomba de agua de alimentación al equipo Fresnel. Antes de cada ensayo se mantuvo el motor a vapor a temperatura de precalentamiento.

Para el caso del cabezal aislado, se repitió la medición conservando las termocuplas en la posición que el caso anterior. La aislación se realizó en la periferia del cabezal, con una capa de 2 cm en manta cerámica, dejando la parte superior del mismo sin aislar, así como la base inferior. Las siguientes curvas muestran el resultado de las mediciones.

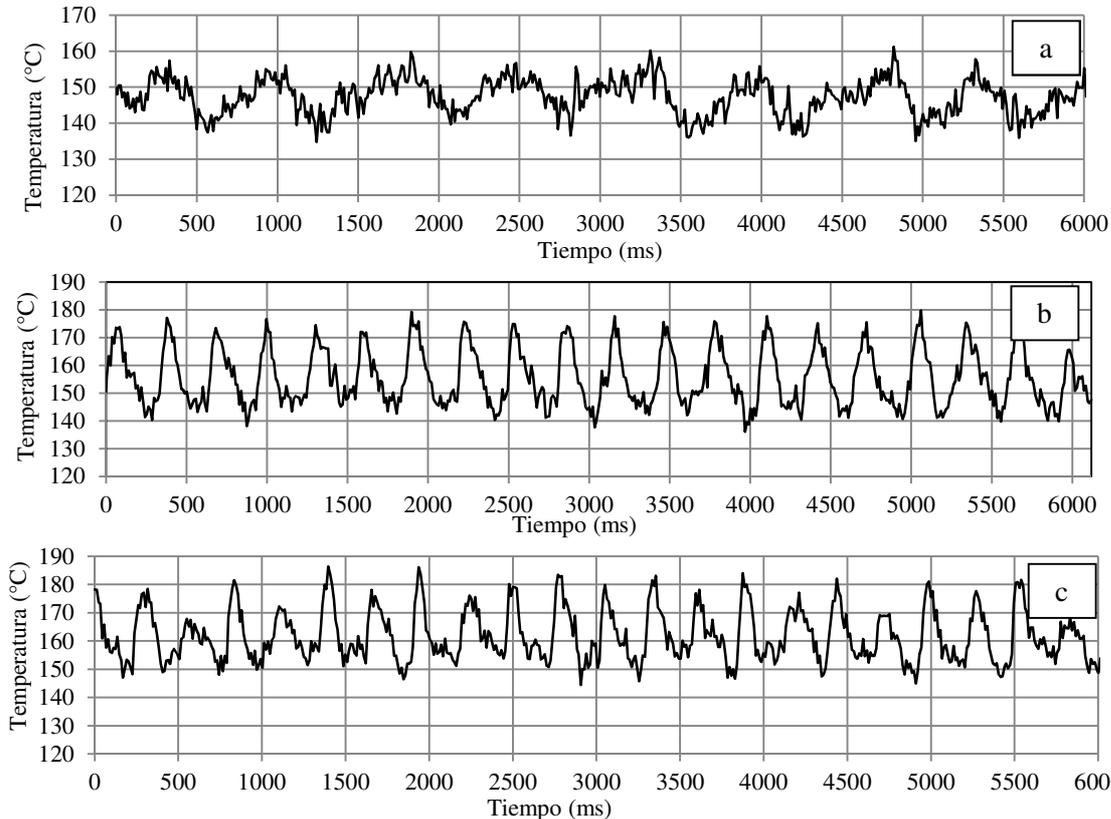


Figura 10. Temperaturas del vapor en cilindro superior, con el cabezal aislado. a) 88 rpm. b) 186 rpm. c) 225 rpm.

Las temperaturas exteriores del cilindro se muestran en la Figura 11, en la que puede verse el aumento de temperatura del cabezal, dado al aislamiento térmico, con respecto al caso anterior.

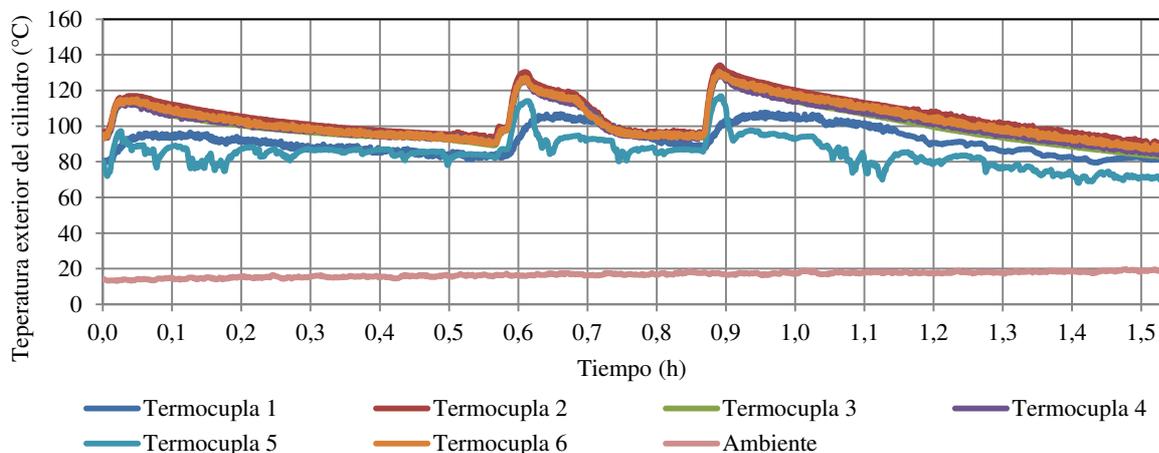


Figura 11. Temperaturas exteriores del cilindro y temperatura ambiente. Medición con cabezal con aislación térmica.

Las curvas de temperatura mostradas en las Figuras 8 y 10 presentan un carácter periódico, pudiendo ser representadas mediante funciones trigonométricas, con un cierto grado de error, considerando que el sistema modelado posee secciones de alta inercia térmica (hierro fundido), por lo que la onda de calor llega a las superficies exteriores de manera atenuadas en amplitud y desfasadas en el tiempo. En Tabla 3 se muestran las funciones trigonométricas empleadas para la simulación térmica. El signo positivo (+) indica que es la temperatura del vapor en cilindro superior, el negativo (-) para el cilindro inferior.

Ensayo	Función empleada en Simusol (°C)	Rpm	Período T (s)	Duración (min)
Cabezal sin aislar				
1er ensayo	$E=122.54 \pm 20.96 * \text{Seno}(2\pi t/T)$	119	0.505	2.3
2do ensayo	$E=154.99 \pm 21.59 * \text{Seno}(2\pi t/T)$	192	0.313	1.6
3er ensayo	$E=159.96 \pm 20 * \text{Seno}(2\pi t/T)$	204	0.295	2.2
Cabezal aislado				
1er ensayo	$E=148.29 \pm 13.51 * \text{Seno}(2\pi t/T)$	88	0.679	2.5
2do ensayo	$E=161.175 \pm 12.625 * \text{Seno}(2\pi t/T)$	186	0.322	2.5
3er ensayo	$E=165.39 \pm 20.91 * \text{Seno}(2\pi t/T)$	225	0.266	2

Tabla 3: Funciones empleadas en Simusol, las mismas definen el parámetro de entrada de temperatura del vapor en cilindros.

Características de los materiales

El cabezal del motor esta hecho de hierro fundido, esto comprende a las paredes del cilindro, conexiones entre cabezal y caja de transmisión y bancada de la máquina, así como las transferencias de vapor y la cámara de distribución. El pistón está construido en aluminio endurecido, el cual esta solidario al eje mecánico lineal. Este último está fabricado en acero al carbono de alta resistencia. Las propiedades físicas y térmicas de los materiales que constituyen al cabezal motor se reúnen en la Tabla 4.

Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/mK)	Capacidad calorífica (J/kgK)	Emisividad (adim)
Hierro	7870	64	473	0.81
Aluminio	2700	210	909	0.07
Acero	7870	64	473	0.81
Aislante	14	0.03	800	0.35

Tabla 4: Propiedades de los materiales constituyentes del cabezal motor.

DIAGRAMAS PARA SIMUSOL

A continuación se presentan los diagramas empleados en la programación del sistema cabezal motor. Los mecanismos de transferencia energética son: convección interna desde el vapor a la pared interior del cilindro, conducción a través de la misma seguida de la capa aislante (para el caso aislado) y por último la convección e irradiación hacia el ambiente. La modelización se realizó mediante 80 nodos de temperaturas distribuidos simétricamente sobre una base tridimensional como se muestra en las Figuras 12a y 12b.

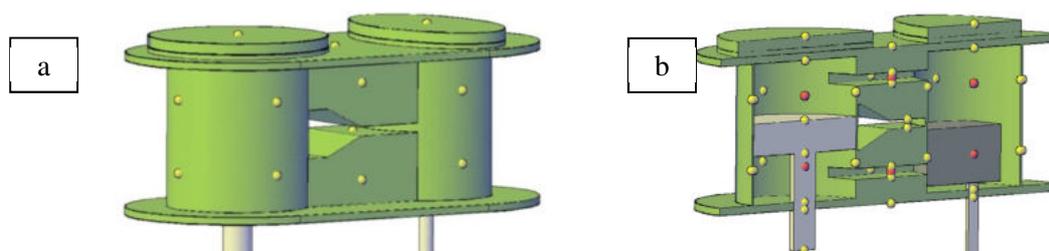


Figura 12. a) Esquema del cabezal motor en escala real, vista de nodos externos. b) Corte transversal de cabezal y vista de nodos internos en cilindro, transferencias y cámara distribuidora. Los nodos rojos representan las fuentes de temperatura (vapor).

En la Figura 13 se representan los circuitos térmicos para la simulación con el cabezal sin aislamiento. Los circuitos mostrados en dicha Figura corresponden a la tapa del cilindro, a la base inferior, las cámaras de vapor superior e inferior así como las caras del pistón y el eje transmisor de potencia lineal. Los esquemas de transmisión de calor para el resto de las superficies del cilindro, así como las transferencias de vapor y la cámara distribuidora del mismo, son similares. En la Tabla 5 se especifica la nomenclatura empleada en los elementos del diagrama, para el cilindro inferior.

Elemento	Nombre	Descripción
Fuente de temperatura	a	Temperatura ambiente
Nodo	a	Nodo temperatura ambiente
Conductancia	api	Conductividad térmica entre eje y pistón
Nodo	pi	Nodo de temperatura en superficie inferior de pistón
Almacenador	pi	Masa del pistón
Conductancia	pspi	Conductividad térmica entre caras del pistón
Nodo	ps	Nodo de temperatura en superficie superior de pistón
Almacenador	ps	Masa del pistón
Convectancia	sps	Convectividad entre cara superior del pistón y vapor
Fuente de temperatura	s	Temperatura del vapor dentro del cilindro superior
Nodo	s	Nodo de temperatura de vapor en cilindro superior
Convectancia	lcsi	Convectividad entre vapor y superficie interna 1 (tapa)
Nodo	lcsi	Nodo interno de temperatura en superficie interna 1 (tapa)
Almacenador	lcs1	Masa de pared para la superficie 1
Conductancia	lcsi	Conductividad de pared para la superficie 1
Nodo	lcse	Nodo externo de temperatura en superficie externa 1 (tapa)
Almacenador	lcse	Masa de pared para la superficie 1
Irradiancia	r1cs	Irradiatividad desde superficie externa 1 hacia la atmosfera
Convectancia	lcsa	Convectividad entre superficie externa 1 y aire ambiente
Nodo repetido	a	Temperatura ambiente

Tabla 5. Descripción de nodos y elementos correspondientes al cilindro superior, sin aislamiento.

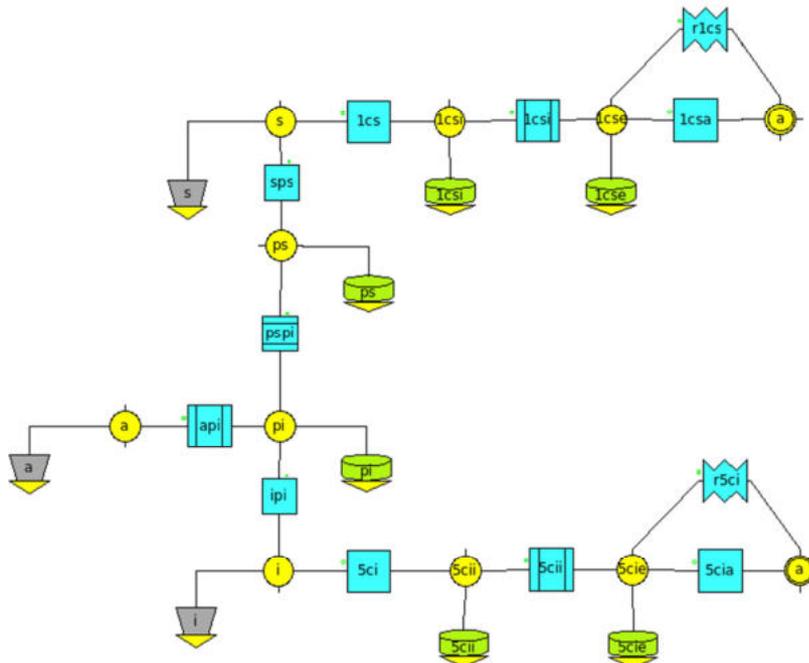


Figura 13. Circuito térmico no aislado. Representación de cilindros, pistón, eje, tapa de cilindro y base inferior.

Para el caso de las transferencias de vapor y la cámara distribuidora del vapor se empleó el mismo esquema o mecanismo de transferencia térmica, los cuales no se muestran por razones de complejidad y cantidad de elementos intervinientes. Así mismo, para el caso del cabezal aislado, se agrega una conductancia en serie a los nodos de temperatura externa. Para éste caso, se desprecian la transferencia térmica por irradiación hacia la atmósfera y la conductividad de la carcasa metálica con respecto a la conductividad del aislante.

CONDICIONES DE SIMULACIÓN Y RESULTADOS

En la práctica, el precalentamiento del motor se realiza con las válvulas de purga abiertas, liberando el vapor al ambiente. La temperatura externa del cabezal, cuando se alcanza el régimen térmico de precalentamiento, es de 70 °C a 90 °C. Se configura la simulación con temperatura inicial de todos los nodos en base a las mediciones realizadas con las termocupas exteriores.

Las funciones trigonométricas de temperatura de vapor (Tabla 3) se insertan de manera algebraica dentro de la programación. El tiempo de actuación de estas funciones está determinado por tablas y coincide con el tiempo de duración de cada ensayo térmico (Tabla 3).

Simulación con el cabezal no aislado

La Figura 14 muestra el resultado de la simulación para las temperaturas exteriores del cilindro.

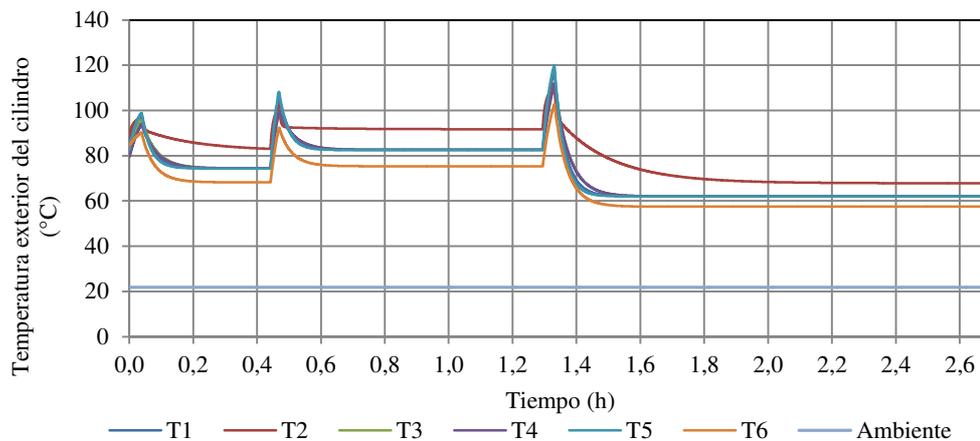


Figura 14. Resultado de temperaturas generado por Simusol. Motor sin aislación.

Se observan los tres picos máximos de temperaturas, similares a los resultados de las mediciones mediante termocupas. Los mismos alcanzan un valor máximo de 120 °C aproximadamente, manteniéndose todas en el rango de 100 °C a 120 °C para los casos en que el motor está en régimen de revoluciones. Dada la similitud entre las curvas medidas y simuladas, se puede estimar la pérdida térmica hacia el exterior mediante Simusol. Las mismas se muestran en la Figura 15.

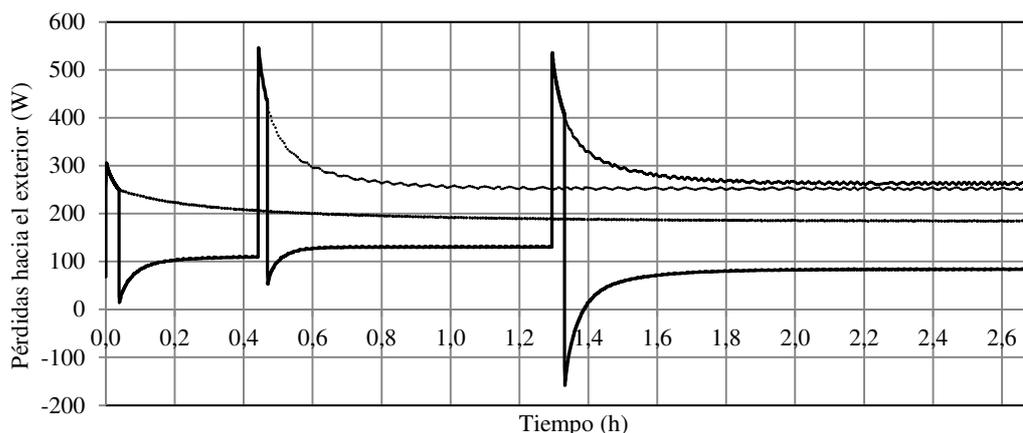


Figura 15. Pérdidas térmicas del cabezal sin aislamiento.

En la misma se observan los tres picos debidos a la actuación del vapor en ambos cilindros. Estas pérdidas contemplan la suma de las pérdidas en el hemisferio superior del cabezal y el inferior del mismo. Los tres picos no alcanzan el régimen térmico dado el corto periodo de actuación del vapor en cada ensayo. Las curvas a trazos representan las pérdidas térmicas que tendría el cabezal motor si continuara funcionando al régimen de revoluciones de cada ensayo.

Simulación con el cabezal aislado

En este caso se realiza la misma simulación a diferencia que a cada circuito térmico se le añade la conductancia correspondiente a la aislación. Los parámetros de interés son los mismos que en el caso no aislado: temperaturas de paredes exteriores (Figura 16) y calor de pérdida hacia el exterior (Figura 17). Es importante destacar el hecho de que las pérdidas térmicas en los picos son ligeramente inferiores a las del caso anterior. Las temperaturas alcanzadas en las paredes externas del cilindro se ven incrementadas notablemente, llegando a superar los 130 °C en promedio, comportamiento que se observó en la Figura 11.

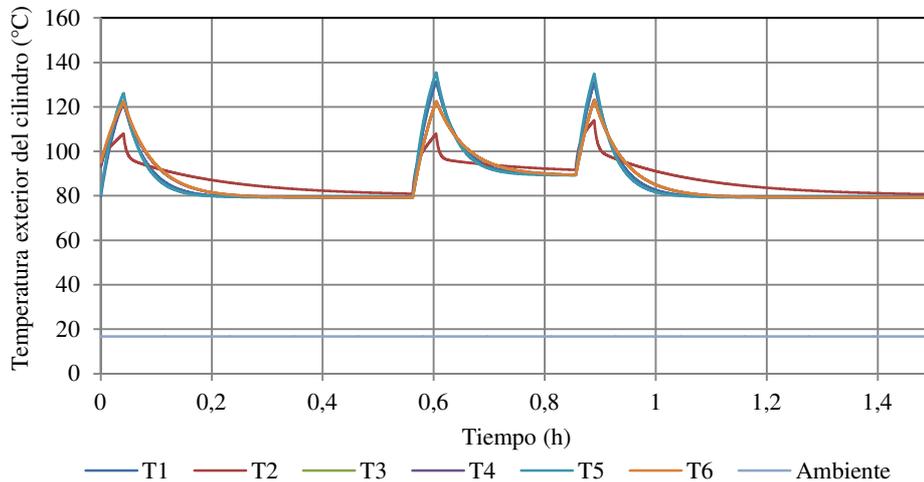


Figura 16. Resultado de temperaturas generado por Simusol. Motor con aislación.

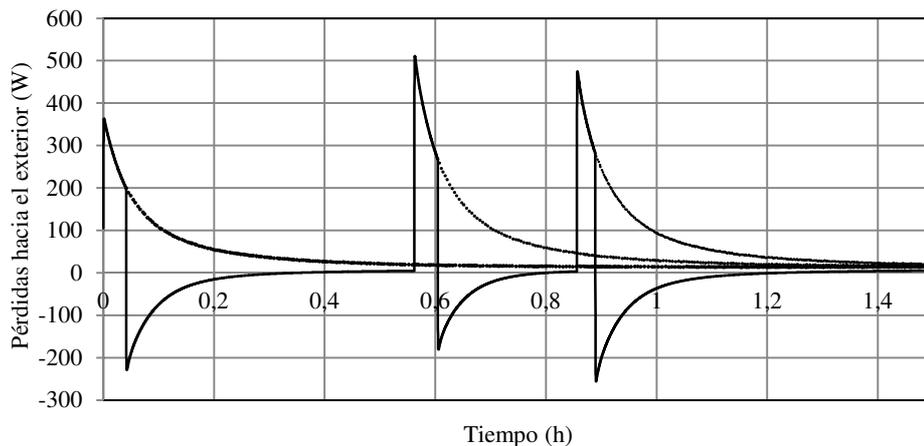


Figura 17. Pérdidas térmicas del cabezal con aislamiento.

La Figura 17 muestra el decremento de las pérdidas hacia el exterior, con respecto al caso anterior. Nuevamente, las curvas a trazos representan las pérdidas térmicas que tendría el cabezal motor si continúa funcionando al régimen de revoluciones de cada ensayo.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se determina el estado térmico de un motor a vapor mediante simulación numérica en Simusol tomando como parámetros de entrada a la temperatura del vapor en el interior del cilindro superior, a las temperaturas externas del cilindro de potencia (temperaturas iniciales) y la ambiente.

Se describió el instrumental de medición empleado, fundamentalmente la tecnología de adquisición de datos para la medición de temperatura del vapor, mostrando que el sistema funciona satisfactoriamente realizando una medición cada 10 ms en promedio.

Se simuló, bajo ciertas hipótesis, el comportamiento térmico del cabezal de un motor a vapor con y sin aislación térmica. Se determinaron las temperaturas que alcanzan las paredes exteriores de la máquina, para una determinada temperatura de vapor en ambos cilindros, las cuales se consideraron periódicas en el tiempo.

Se encuentra que el estado térmico simulado resulta similar al medido in situ, tomándose como referencias las temperaturas exteriores del cilindro. Esto permite realizar la estimación de las pérdidas térmicas a través de las paredes del motor.

Con el cabezal aislado, el motor disipa menos potencia hacia el exterior y las temperaturas de la envolvente metálica son superiores en éste caso. Esto se traduce también en el aumento de las temperaturas internas de los cilindros, disminuyendo así las pérdidas por condensación del vapor e incrementando la eficiencia en la conversión termo mecánica de la máquina.

La determinación de la potencia de pérdida hacia el exterior permite realizar el estudio energético del sistema de generación de vapor y determinar la eficiencia de la instalación. La simulación aquí propuesta muestra que éstas pérdidas se reducen a la sexta parte mediante la implementación de una envolvente aislante de sólo 2 cm de espesor.

La conveniencia (o no) de aislar la maquina dependerá de la resistencia de los materiales que la componen, sobre todo en las partes de baja densidad y elevados coeficientes de dilatación, como ser, pistón, aros, encamisados flotantes, componentes de bronce, etc. Desde el punto de vista térmico, resulta conveniente la aislación, que puede ser en fibra de vidrio, manta cerámica o espuma de poliuretano. La elección de uno u otro material dependerá de sus propiedades térmicas, de la capacidad de manipulación de los mismos o de las condiciones de operación del motor.

REFERENCIAS

- Energy Matters. "Historic Australian solar farm to become a museum".
<http://www.energymatters.com.au/renewable-news/em3526/>
- Margaret Paul. ABC News. "Solar power station to be turned into museum".
<http://www.abc.net.au/news/2012-12-20/solar-power-station-to-be-turned-into-museum/4437158>
- Prasad. S. (1993). Steam engine characteristics and theoretical performance. Energy Convers. Mgm. Vol. 34, No. 12, pp. 1323-1333. 0196-8904/93.
- Saravia L., Alía de Saravia D., Echazú R. y Alcorta G. (2007). La simulación de Sistemas Termomecánicos Solares con el Programa Simusol. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol 1, pp. 03.01-03.09. ISSN 2314-1433.
- Saravia L., Gea M., Hongn M., Hoyos D., Bárcena H., Placco C., Cadena C., Flores Larsen S., Dellicompagni P., Condorí M., Martínez C., Fernández C., Caso R., Altamirano M., Suligoy H. (2014). Descripción de un generador solar térmico de tipo Fresnel instalado en San Carlos, Salta. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 18, pp. 03.17-03.26. ISSN 2314-1433.

ABSTRACT: This paper shows a computational analysis of the thermal losses from a head steam engine, which has been mounted on a linear Fresnel collector (LFC) for thermomechanical conversion. This paper aims to determine heat losses by numerical simulation on the Simusol program based on temperature measurement of steam inside of the engine as well as outer cylinder walls. Thermal models here proposed have been written by Simusol program and the results are compared with experimental measurements.

Keywords: Steam engine, thermal losses, temperature, heat flux, Simusol.