

SIMULACION NUMERICA DE UN MOTOR DE VAPOR A SER USADO EN UN GENERADOR SOLAR DE TIPO FRESNEL LINEAL

P. Dellicompagni² L. Saravia¹ y D. Alía³

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa - CONICET)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Universidad Nacional de Salta (UNSa), Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina.
Tel. 0387-4255579. Cel. 0385-156880854. E-mail pablodellicompagni@gmail.com,
luis.r.saravia@gmail.com

Recibido 17/09/15, aceptado 13/10/15

RESUMEN: Este trabajo describe la simulación numérica de un motor recíprocante de vapor que se colocará en el generador solar de electricidad y vapor instalado por el INENCO en San Carlos, Salta, que se encuentra en funcionamiento produciendo vapor. Ha sido preparada con el programa Simusol creado en el INENCO. La simulación comprende tanto el funcionamiento dinámico de la parte mecánica del equipo como la de la térmica. Se simula el sistema teniendo en cuenta la admisión de vapor, su expansión, su escape y la compresión. Se ha incluido al pistón de compresión y expansión, el cigüeñal con volante, las lumbreras de entrada y salida de vapor. Se discuten los resultados obtenidos con los datos físicos reales del motor y los del vapor suministrado por el generador solar de vapor.

Palabras clave: motor de vapor, simulación numérica, Simusol, calentamiento solar.

INTRODUCCIÓN

En el INENCO se desarrolla un proyecto para el diseño y construcción de un prototipo de generador solar de tipo Fresnel lineal (Saravia et al., 2014) financiado por el COFECYT, CONICET y el INTI, el cual está terminado en lo que se refiere al sistema de espejos y acumulador. Actualmente se le está instalando un motor de vapor recíprocante con el fin de producir energía eléctrica. A esos efectos la firma argentina Cromwell, Spinks & Grime, que se dedica a la construcción y reparación de estos motores, ha cedido en préstamo al INENCO un motor de vapor con una producción eléctrica estimada de 8 HP cuya caracterización y ensayo general se detalla en otro trabajo presentado en la presente reunión de ASADES (Dellicompagni et al., 2015).

En este trabajo se presenta una simulación numérica a tiempo real de un motor de vapor llevada a cabo con el programa Simusol, creado inicialmente para la simulación de diferentes sistemas físicos, basado en la analogía eléctrica de los diferentes sistemas (Saravia et al., 2007). En particular es capaz de simular sistemas térmicos, mecánicos y eléctricos, lo cual es necesario en este caso. Funciona bajo el sistema operativo Linux bajo licencia GPL, por lo que es un programa de fuente libre y distribución gratuita.

Habitualmente la generación eléctrica en equipos solares de concentración se ha llevado a cabo utilizando turbinas de vapor. En los últimos años se está haciendo énfasis en el uso de motores de vapor recíprocantes para equipos de menor potencia debido a que en estas condiciones las turbinas tienen una menor eficiencia y los motores de vapor tienen un costo por kW mucho menor.

Existen motores de vapor de diferente tipo, ya sea usando pistones a los cuales el vapor de agua se introduce en un solo lado del pistón, o el vapor llega a ambos lados del pistón, así como motores que usan tanto un cilindro como aquellos en los cuales el vapor pasa sucesivamente por un cilindro de alta presión y otro de baja presión. Aquí se presenta el caso más sencillo de pistones a los que el vapor

1.- Profesor Titular Emérito de la Universidad Nacional de Salta. Investigador Principal Jubilado del Conicet.

2.- Becario del CONICET bajo la dirección de la Dra. J. Franco y el Dr. L. Saravia.

3.- Profesora Titular Emérita de la Universidad Nacional de Salta.

llega de un solo lado. En el futuro se extenderá el estudio a los otros casos para los cuales la presente simulación se puede generalizar en forma directa.

Se puede encontrar en la bibliografía simulaciones sencillas en las cuales se llevan a cabo considerando únicamente un circuito estático donde solo se consideran los datos termodinámicos en los puntos básicos que definen el circuito térmico (Prasad, 1993). Esta simulación se realiza en forma dinámica y se incluye la interacción entre el sistema mecánico con cigüeñal y bielas así como la evolución del sistema térmico a tiempo real.

A continuación se presentará en primer lugar las características del motor, luego la simulación del sistema mecánico y finalmente las sucesivas partes del circuito térmico.

EL MOTOR DE VAPOR SIMULADO

La figura 1 muestra una foto del motor disponible para ensayo constituido por la estructura central que incluye el cilindro, cigüeñal y biela, el dispositivo de lumbreras unido al cigüeñal por una biela y el volante que regulariza el movimiento del motor. Este motor tiene alimentación por ambos lados del pistón. La simulación que se presenta solo presenta entrada de vapor por el lado superior. La versión completa constituye una extensión sencilla y se presentará en otro trabajo cuando se encuentre terminada.



Figura 1: Vista externa del motor de vapor recíprocante.

El dispositivo con lumbreras (válvula de distribución) regula la entrada y salida del vapor conectándose al cigüeñal de manera que sincroniza su operación con el movimiento del cilindro. Las lumbreras se abrirán o cerrarán en los momentos adecuados cerrando la entrada o salida del vapor al cilindro. La figura 2 muestra en forma gráfica el cigüeñal representado por el círculo con el punto muerto superior arriba y el inferior abajo. Los puntos K1 a K4 muestran las posiciones del cilindro, conectado al cigüeñal mediante la biela, en que ocurren las diferentes operaciones. Ellas son:

- 1) la alimentación del vapor, K1 a K2, comenzando cerca del punto muerto superior,
- 2) la expansión adiabática del vapor en el cilindro desde K2 a K3,
- 3) el escape del vapor cuando el cilindro se coloca cerca del punto muerto inferior, desde K3 a K4,
- 4) la compresión final del vapor que permanece en el cilindro hasta que empieza el nuevo ciclo, desde K4 a K1.

Este es un ejemplo típico que puede variar ligeramente de un tipo de motor a motor.

El motor de la figura 1 es de construcción clásica utilizando hierro fundido y una velocidad de unos 300 rpm, con lubricación manual con aceite. No se muestra el generador eléctrico de 12 kW trifásico que gira a 1500 rpm y se conecta al eje de salida mediante un sistema de poleas. Actualmente se dispone de motores de diseño más moderno cuya estructura es similar a la de los motores actuales de auto, giran a velocidades del orden de las 1200 rpm y usan lubricación de aceite a presión. Ellos tienen un tamaño mucho más reducido con menor peso y mejor eficiencia. Ambos tipos se siguen vendiendo en la actualidad debido a que los motores clásicos son de un precio más reducido y se ofrecen vía Internet. Existe una firma argentina de construcción de estos equipos, la cual ya se ha mencionado.

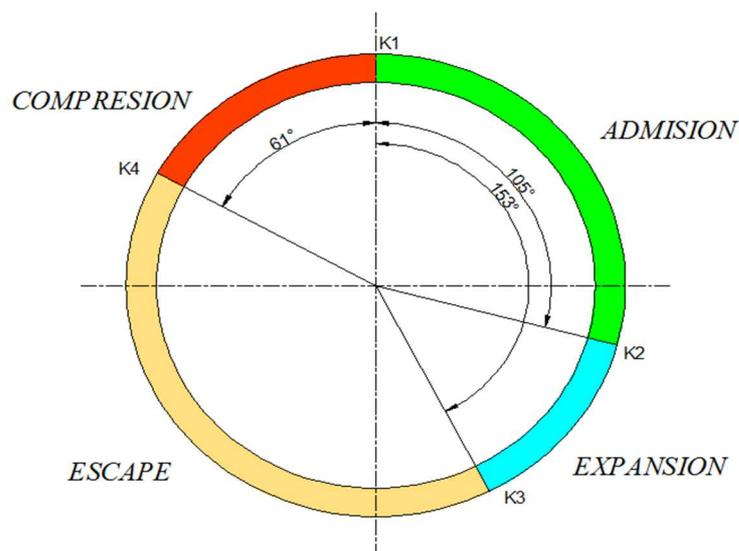


Figura 2: Ángulos de admisión, expansión, escape y compresión de las lumbreras.

EL MODELO MECANICO DEL MOTOR

La figura 3 muestra el esquema del sistema mecánico utilizado en el motor. Se utiliza un cigüeñal con volante centrado en el punto O. El cigüeñal tiene un solo brazo de radio P_{ra} al cual se conecta la biela. Las cámaras que definen el cilindro y el pistón reciben el vapor que impulsa el sistema. Un sistema de lumbreras controla la entrada y salida oportuna del vapor. Si no se tienen en cuenta las pérdidas de fricción, la presión P_p en toda la masa de vapor será única y se ejercerá sobre las paredes del cilindro y el pistón. La biela tiene una longitud P_l y la posición del cigüeñal, dada por el punto B, se define mediante el ángulo "al" con la vertical. La posición del pistón estará dada por la distancia y l medida desde el centro del cigüeñal hasta la base de dicho pistón.

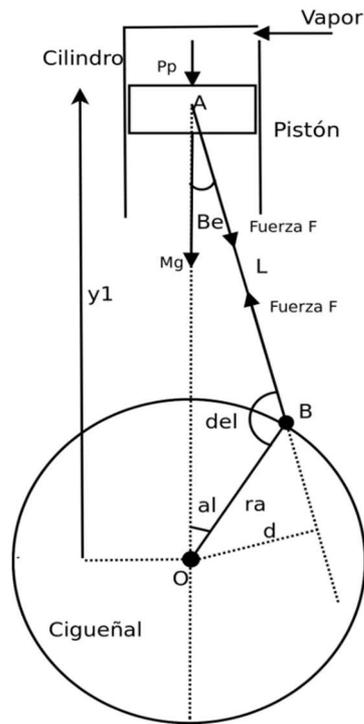


Figura 3: Esquema del sistema mecánico pistón – cigüeñal del motor de vapor y las fuerzas ejercidas.

El movimiento lineal del cilindro, y_1 , está definido por el ángulo del cigüeñal al y se debe establecer la relación mecánica entre ambos para preparar el simulador. Para ello se plantean las ecuaciones del triángulo ABO donde se relacionan las variables y_1 y al . Ellas son:

$$\frac{\text{Sen}(Be)}{Pra} = \frac{\text{Sen}(al)}{Pl} = \frac{\text{Sen}(del)}{y_1} \quad (1)$$

$$y_1 = Pl * \cos(Be) + Pra * \cos(al) \quad (2)$$

De estas relaciones se relaciona Be con al :

$$\text{Sen}(Be) = Pla * \text{Sen}(al) \quad y \quad (Be) = \sqrt{1 - Paa} \quad (3)$$

Dónde:

$$Paa = \sqrt{1 - Pla^2 * \text{Sen}^2(al)} \quad (4)$$

$Pla = Pra/Pl$ es un parámetro usado para caracterizar el motor. Usualmente tiene valores alrededor de 0.35 y en este motor vale 0.39. La derivada v_1 de y_1 sale de (2). Llamaremos w a la velocidad angular del cigüeñal dal/dt :

$$v_1 = \frac{-dy_1}{dt} = Pl * \text{Sen}(Be) \frac{dBe}{dt} + Pra * \text{Sen}(al) * w \quad (5)$$

Si se usa la relación (1) es posible expresar el segundo término de (5) como una función del ángulo α y la velocidad angular w . Se obtiene:

$$v1 = (-Pra * Sen(\alpha) - \frac{Pl*Pla^2*Sen(\alpha)*cos(\alpha)}{Paa}) * w \quad (6)$$

El movimiento del cigüeñal es impulsado por el momento MF2 de la fuerza reactiva F2 colineal con la biela, que se ejerce entre pistón y cigüeñal, siendo transmitida por la biela.

$$MF2 = F2 * d = F * Pl * Sen(Be) \quad (7)$$

Donde d es la distancia de la biela al origen O medida según la normal.

Las ecuaciones de Newton que rigen el movimiento del pistón y el cigüeñal son:

1) La ecuación del pistón de masa M, proyectada sobre el eje de movimiento del pistón:

$$M \frac{dv1}{dt} = -M * g - (Pp - 100000) * Ap - F * cos(Be) \quad (8)$$

Donde las fuerzas que se ejercen sobre el pistón son la gravedad $M*g$, la presión Pp del vapor del cilindro sobre su cara superior de área Ap, la presión atmosférica de valor 100000 pascuales ejercida desde abajo sobre la cara inferior del pistón y la fuerza reactiva proyectada sobre el eje vertical.

2) La ecuación de giro del cigüeñal donde el único momento de fuerza es el generado por la fuerza F, la cual es negativa si se toma como giro positivo para el ángulo alfa el movimiento de las agujas del reloj, teniéndose también el torque resistente dado por la reacción del inducido del generador sincrónico Pra*Fr.

$$I \frac{dw}{dt} = -Pl * Sen(Be) * F - Pra * Fr \quad (9)$$

Donde I es el momento de inercia del conjunto cigüeñal / volante y a la derecha se ven las fuerzas conectadas con él.

Entre las dos ecuaciones se puede eliminar la fuerza reactiva F cuyo valor no se conoce, obteniéndose:

$$\frac{(M \frac{dv1}{dt} + M * g + (Pp - 100000) * Ap)}{cos(Be)} = \frac{(I \frac{dw}{dt} + Pra * Fr)}{(Pl * Sen(Be))} \quad (10)$$

Las dos variables a determinar son la velocidad lineal $v1$ y la angular w . Para incorporar las ecuaciones en el Simusol se deben despejar las derivadas de ambas variables. Si se deriva la ecuación (2) se obtiene $dv1/dt$. Ella se introduce en la ecuación (10) y allí se puede despejar dw/dt . Al integrarla se consigue w y al colocar w en la ecuación (4) se obtiene directamente $v1$. Estas dos expresiones no se muestran a continuación debido a su extensión.

Una vez que se tienen w y v_1 , la ordenada vertical y_1 y el ángulo α se consiguen como función del tiempo mediante el uso de las relaciones de integración del Simusol:

$$DP_{\alpha} = w \quad y \quad DP_{y_1} = v_1 \quad (11)$$

A continuación no se muestra el programa completo en Simusol debido a su extensión. El mismo puede ser solicitado a los autores en caso de necesitarse.

En esta etapa se ha conseguido simular el movimiento mecánico del motor. Se observa que en el mismo figura la presión del vapor dentro del cilindro, P_p . Esta se obtendrá en el modelo térmico del motor, que se describe a continuación. A su vez, el programa térmico hará uso de las variables y_1 y α , con lo cual las dos partes del programa, mecánico y térmico, interactúan para simular al motor.

EL MODELO TÉRMICO

A continuación se plantea la evolución transitoria del comportamiento térmico del motor, interactuando con su evolución mecánica ya estudiada en la sección anterior. A esos efectos se desarrolla en el marco del Simusol la termodinámica del proceso para cada una de las 4 etapas sucesivas, las que luego se irán cumpliendo a medida que el motor avanza como función del tiempo, como se ha detallado en la figura 2. En Simusol se planteará la ecuación de la primera ley de la termodinámica así como la conservación de la masa de vapor, P_m . La meta es encontrar las ecuaciones en derivadas de la temperatura P_{te} y del título P_x del vapor en el cilindro como función del tiempo, las que determinan la condición del vapor en cada instante. Se necesitan dos variables ya que el vapor en la zona saturada tendrá dos componentes, agua líquida y vapor de agua.

Las ecuaciones básicas son las mismas en cada etapa pero algunos de sus términos cambian de acuerdo a la variación física de cada etapa. Por ejemplo, en la admisión se introducirá vapor del exterior, en la expansión el proceso es adiabático, en el escape se perderá vapor al exterior y en la compresión de vuelta se tendrá un proceso adiabático. Para conseguir que las etapas se realicen en sucesión se introducen 4 parámetros TP_1 , TP_3 , TP_4 y TP_5 como función del ángulo α . Ellos se definen en Simusol mediante tablas que indican que cada parámetro será cero fuera de la zona que corresponde y el valor 1 dentro de ellas. Las tablas son funciones de la posición angular α , como se muestra a continuación.

Tabla P1	Tabla P3	Tabla P4	Tabla P5
0,1	0,0	0,0	0,0
105.7,1	105.7,0	153,0	153,0
105.7,0	105.7,1	153,1	299,0
360,0	153,1	299,1	299,1
	153,0	299,0	360,1
	360,0	360,0	360,0

Figura 4: Tablas de parámetros TP . Admisión (TP_1), expansión (TP_3), escape (TP_4) y compresión (TP_5).

La primera columna marca el valor de α en grados y la segunda el valor del parámetro. El término que integra la ecuación y es válido entre los ángulos marcados, se multiplica por los valores de la tabla, con lo cual el término solo será válido en ese intervalo. El Simusol interpola linealmente entre dos valores sucesivos para obtener un valor intermedio. Para presentar las caídas bruscas de 0 a 1 o viceversa, se reiteran los dos valores con el mismo ángulo. El ángulo 360 indica que el ciclo comenzará a realizarse una vez más.

ECUACIONES PARA LA ADMISION

Se plantea el siguiente modelo físico (figura 5), a modo esquemático, a fines de describir el proceso de ingreso del vapor saturado a la cámara de expansión. El cilindro contiene una cantidad de masa inicial de vapor, a la cual llamamos m_0 correspondiente a un volumen V_0 dado por la posición inicial del pistón y_0 , θ y x son la temperatura y el título del vapor, respectivamente.

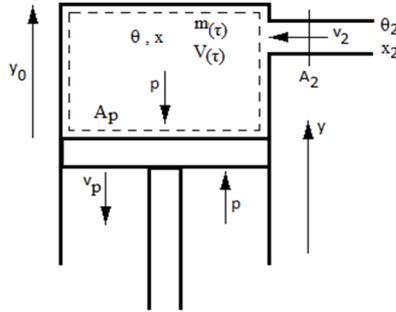


Figura 5: Esquema de cilindro – embolo.

La presión del vapor p_p es función de la temperatura, por tratarse de un vapor saturado. Si consideramos al vapor que ingresa y evoluciona dentro del cilindro como una mezcla de agua líquida y vapor de agua, los parámetros termodinámicos dependerán tanto de la temperatura como del título del vapor de admisión. El balance energético está dado mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{d}{d\tau} (m(\tau)u(\theta,x)) = \delta_2 v_2 A_2 h_{(\theta_2,x_2)} + (p_2 - p_o) A_p v_p \quad (12)$$

Donde u y h son la energía interna y entalpía del vapor. Las variables físicas necesarias se dan en forma numérica como polinomios de 6^{to} orden ajustados a datos experimentales.

Mediante desarrollo matemático, se propone la siguiente ecuación diferencial, que gobierna el comportamiento de la temperatura del vapor.

$$\begin{aligned} & \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} \left\{ m * \left[\frac{du_l}{d\theta} + \frac{du_{lg}}{d\theta} * x \right] - \frac{m * \Delta u_{lg}}{\Delta \rho_{lg}} * \left[\frac{d\rho_l}{d\theta} + \frac{d\rho_{lg}}{d\theta} * x \right] \right\} = \\ & = \frac{-dm}{d\tau} * u - \frac{m * \Delta u_{lg}}{\Delta \rho_{lg}} * \left[\frac{\delta_2 v_2 A_2}{A_p * (y_0 - y)} + \frac{m * \frac{dy}{d\tau}}{(A_p * (y_0 - y))^2} \right] + \delta_2 v_2 A_2 h_{(\theta_2,x_2)} + (p_2 - p_o) A_p v_p \quad (13) \end{aligned}$$

El título puede obtenerse en función de la densidad, una vez determinada la temperatura.

$$\frac{m(\tau)}{V(\tau)} = \delta_{l(\theta)}(1 - x) + \delta_{g(\theta)}x = \delta_{l(\theta)} + \Delta \delta_{gl(\theta)}x \quad (14)$$

Donde m se obtiene por integración del flujo de vapor que entra o sale del cilindro y el volumen V está evaluado en cada instante por las ecuaciones del movimiento mecánico.

ECUACIONES PARA LA EXPANSION

Una vez superada la etapa de admisión de vapor, la lumbrera de ingreso del mismo se cierra momentáneamente, dejando al vapor realizar trabajo a expensas de la presión que llevaba. Este trabajo de expansión se realiza en un proceso adiabático e isoentrópico. Se tiene la siguiente ecuación.

$$\frac{d\theta}{d\tau} * m * \left\{ \frac{du_l}{d\theta} + \frac{du_{lg}}{d\theta} * x + \Delta u_{lg} * \left[\frac{1}{\Delta s_{lg}} * \left(\frac{-ds_l}{d\theta} \right) - \left(\frac{(s_1 - s_l) * \frac{d\Delta s_{lg}}{d\theta}}{\Delta s_{lg}^2} \right) \right] \right\} = (p - p_o) * A_p * v_p \quad (15)$$

ECUACIONES PARA EL ESCAPE

En esta etapa el pistón emprende la carrera de escape de vapor hacia la atmósfera. Este ciclo es similar al de admisión sólo que el caudal de vapor posee circulación hacia la atmósfera, lo cual puede ser representado con signo negativo $-\delta_2 v_2 A_2$. Las ecuaciones de equilibrio para la temperatura y el título son las mismas a las de la etapa de admisión (ecuaciones 12, 13 y 14).

ECUACIONES PARA LA COMPRESION

Llegando al final de la carrera de escape, la lumbrera correspondiente se cierra instantes antes de que el volante realice un giro completo, entonces el vapor residual dentro del cilindro es comprimido de manera adiabática. El trabajo ejercido por el pistón sobre el vapor de agua modifica la energía interna, produciendo el aumento de presión y de temperatura. Esta etapa perdura hasta que la lumbrera de admisión se abre permitiendo el ingreso del vapor al cilindro, desde la fuente de presión, comenzando el ciclo nuevamente.

La ecuación válida para esta etapa es análoga a la de la etapa de expansión (ecuación 15).

PARAMETROS DE ENTRADA Y CONTROL

Dado que existe una amplia gama de diseños de motores de vapor en la industria, es importante destacar que la simulación aquí presentada es válida para cualquier motor recíprocante monocilíndrico con sistema de distribución excéntrica y corredera, ya que en los cuadros “parámetros” se pueden modificar acorde a cada situación en particular. Se listan dichos parámetros de configuración.

- * Pe: Espacio muerto, en m.
- * Prcil: Radio del cilindro, en m.
- * Plb: Longitud de biela, en m.
- * Pra: Radio de cigüeñal, en m.
- * Pg: Aceleración de la gravedad, en m/s².
- * PMP: Masa del embolo o pistón, en kg.
- * Pm0: Masa inicial de vapor en el cilindro, en kg.
- * Ptein: Temperatura inicial del vapor en el cilindro, en °C.
- * PTe2: Temperatura del vapor en el conducto de admisión, en °C.
- * Px2: Título del vapor de admisión, adimensional.

Además de estos parámetros, también es posible configurar otros mediante tablas.

- * Tabla v2: Velocidad de ingreso de vapor en la admisión, en m/s, en función del giro del cigüeñal en grados.
- * Tabla v4: Velocidad de egreso de vapor en el escape, en m/s, en función del giro del cigüeñal en grados.
- * Tablas Px: Mencionadas anteriormente y mostradas en figura 4, configuran los parámetros TP de actuación de las distintas etapas del ciclo.

RESULTADOS DE LA SIMULACION

Las ecuaciones antes descriptas se insertan en el programa Simusol mediante una interfaz gráfica denominada Dia. En esta interfaz se insertan todos los parámetros correspondientes a las variables dependientes e independientes. Las figuras siguientes muestran las curvas características que arroja la simulación planteada hasta estas instancias. El Simusol tiene además la particularidad de poder superponer varias curvas para diferentes parámetros de seteo. Se muestran curvas correspondientes para dos temperaturas de vapor de entrada, en verde para un vapor a 155 °C y en rojo para 160 °C.

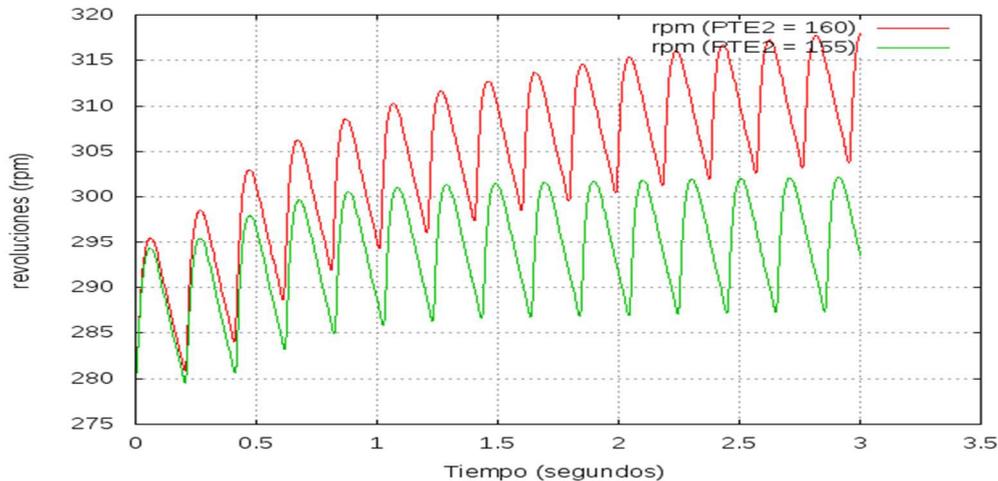


Figura 6: Régimen de velocidades de giro en rpm.

Puede verse que el régimen de revoluciones por minuto presenta un comportamiento oscilatorio (figura 6). Esto concuerda con el comportamiento real del motor dado que el conjunto volante / cigüeñal experimenta aceleraciones y deceleraciones debido a que la fuerza de impulsión que actúa en los cilindros – y el torque transmitido – es intermitente.

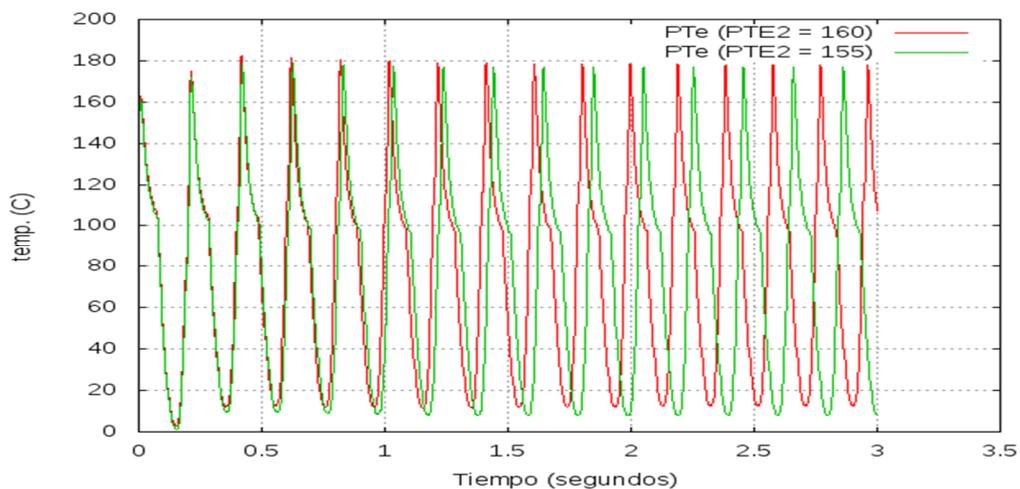


Figura 7: Evolución de la temperatura del vapor dentro del cilindro.

La temperatura PTe del vapor dentro de la cámara de expansión experimenta cambios en su valor conforme transcurre el tiempo y el proceso cíclico de operación de la máquina. Los flancos descendentes corresponden a los ciclos admisión, expansión y escape, mientras que los flancos ascendentes se deben a la compresión del vapor, producida por el empuje del pistón en su carrera de retorno y al avance en el cierre de la válvula de escape. Este aumento de presión va siempre acompañado con el aumento de la temperatura.

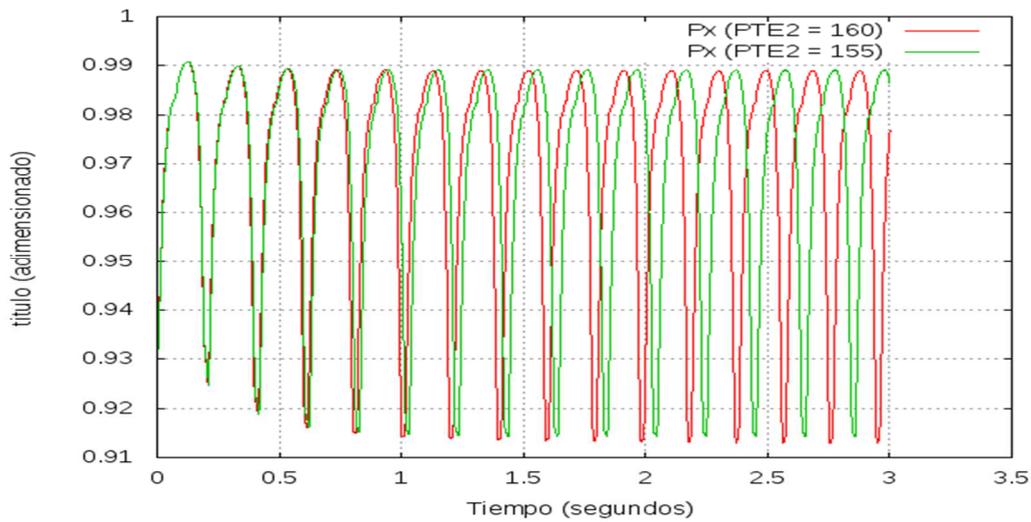


Figura 8: Título del vapor.

En la figura 8 se puede notar que el título del vapor oscila con valores muy cercano a la unidad, esto se debe a que en el cálculo para estas instancias no se consideraron las pérdidas de vapor debidas a la condensación del mismo en las paredes del cilindro y perdidas de laminación en las lumbreras, aun así, el decaimiento de éste parámetro se debe a la disminución de la temperatura en la carrera de expansión.

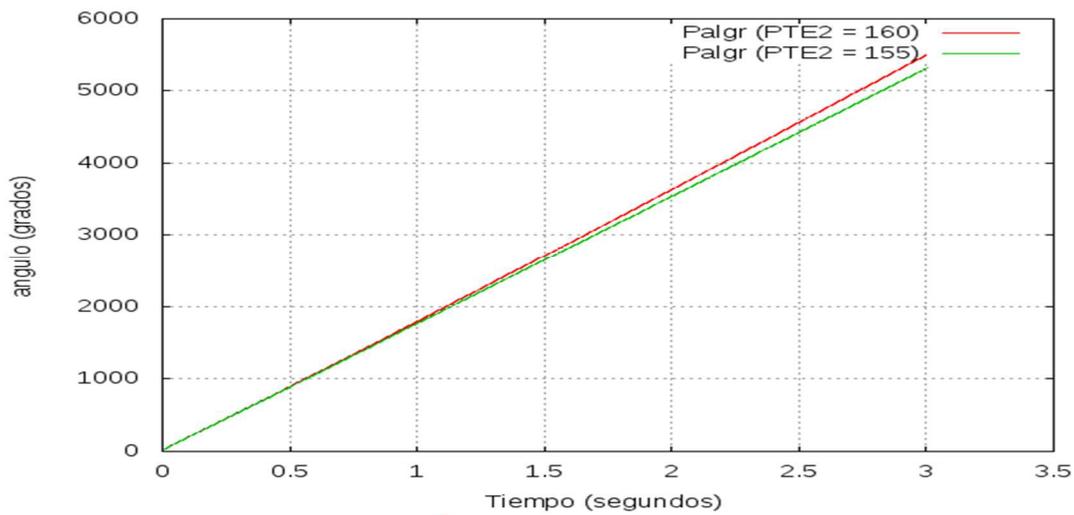


Figura 9: Ángulo barrido por el cigüeñal.

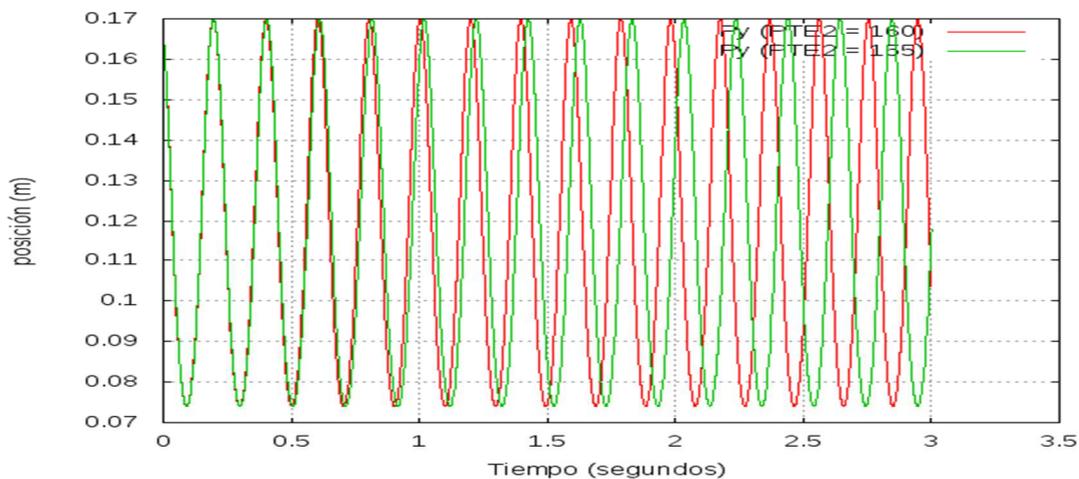


Figura 10: Desplazamiento del embolo.

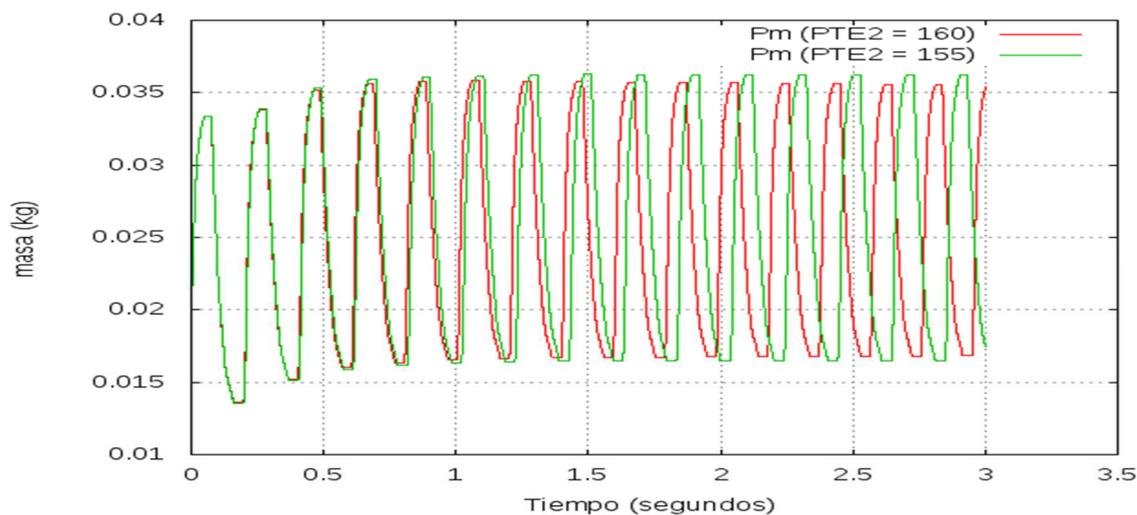


Figura 11: Evolución de la masa dentro del cilindro.

Se alcanza la estabilidad en el flujo másico de vapor, oscilando entre valores razonables de acuerdo con las dimensiones del motor. También pueden distinguirse en la figura 11 las distintas etapas del proceso cíclico: admisión, expansión, escape y compresión.

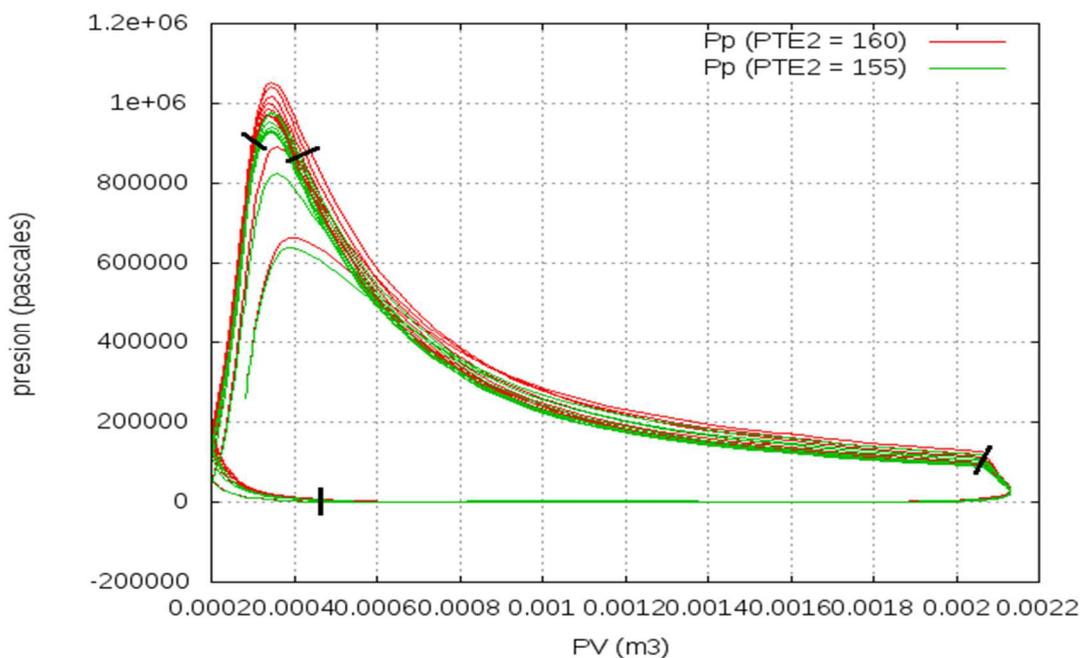


Figura 12: Diagrama dinámico P-V.

Observando el diagrama dinámico P-V de la figura 12, podemos ver que el motor alcanza su régimen de operación nominal el cual corresponde para una presión que ronda los 10 kg/cm² y una velocidad de 300 rpm. La forma de esta curva se corresponde en un todo con la literatura de máquinas a vapor, en particular, motores reciprocantes (H. Bahr y O. Herre, 1951 y) y con simulaciones realizadas en motores de vapor de pequeña escala, donde la modelización de todo el proceso se realizó por etapa desde la admisión hasta la compresión (Ferrara et al., 2013).

CONCLUSIONES

Este programa ha funcionado utilizando los datos constructivos del motor disponible, obteniéndose resultados del funcionamiento dinámico. Los cálculos se han realizado con una computadora que usa un procesador Intel I7, la cual lleva a cabo el cálculo de funcionamiento de un motor en unos 5

segundos. El programa constituye una herramienta importante para el diseño de un motor a vapor pudiéndose calcular el efecto que produce la variación de los distintos parámetros de diseño con el fin de seleccionar la combinación más efectiva.

Este programa puede ser ampliado en el marco del Simusol para incorporar modelos más detallados. La simulación del motor de doble efecto, que incorpora el vapor tanto arriba como abajo del pistón, es directa. El otro caso es el de dos pistones, de alta y baja presión. El motor se ha ensayado con una caldera pequeña en la Universidad de Salta. Actualmente se está instalando en el campo radicado en San Carlos, donde se encuentra el generador de vapor, que es capaz de suministrar el vapor necesario para ensayos más detallados y permitirá comparar los resultados de la simulación con datos reales.

Dado que el programa admite la variación de los parámetros de entrada, se puede decir que es de gran utilidad para el diseño de motores de expansión de vapor y también para la predicción del comportamiento de los mismos. Se comprobó que el modelo propuesto en el presente trabajo permite además comparar los resultados obtenidos simultáneamente para la variación de algunos de los parámetros de entrada, como la temperatura de entrada de vapor P_{Te2} en éste caso.

REFERENCIAS

- Bahr H. y Herre O. (1951). Calderas. Máquinas de vapor. La escuela del técnico mecánico. Tomo VII. 3^{ra} edición, pp. 215 – 258. Labor S.A. Barcelona – Madrid.
- Dellicompagni P., Franco J., Altamirano M. y Hongn M. (2015). Caracterización de un motor a vapor de doble efecto. Inédito.
- Ferrara G., Manfrida G. y Pescioni A. (2013). Model of a small steam engine for renewable domestic CHP (combined heat and power) system. Energy. 58, 78 – 85.
- Saravia L., Alía de Saravia D., Echazú R. y Alcorta G. (2007), La simulación de Sistemas Termomecánicos Solares con el Programa Simusol , AVERMA, 11, 3, 01-09.
- Saravia L., Gea M., Hongn M., Hoyos D., Barcena 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 ipo Fresnel instalado en San Carlos, Salta. Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 2, pp. 03.67-03.76.
- Prasad S. (1993). Steam engine characteristics and theoretical performance. Energy Convers. Mgm. Vol. 34, No. 12, pp. 1323-1333. 0196-8904/93.

NUMERICAL SIMULATION OF A STEAM ENGINE TO BE USED IN A LINEAR FRESNEL SOLAR GENERATOR

P. Dellicompagni², L. Saravia¹ y D. Alía³

ABSTRACT: This paper describes the numerical simulation of a reciprocating steam engine in the solar steam generator installed by the INENCO in San Carlos, Salta, which is producing steam at present. It has been prepared with the SIMUSOL program created in INENCO. The simulation includes both the dynamic performance of the mechanical part and the heat part of the machine. The admission of steam, expansion, exhaust and the compression system are considered in the simulation. The compression and expansion piston, the crankshaft wheel and the inlet and outlet steam are included. The results obtained with the actual physical data of the engine and the steam supplied by the solar steam generator are discussed.

Keywords: Steam engine, numerical simulation, simusol, solar heating.