

Trabajo Final: Sistema de Caldera y Turbina

Fabrizio Donato B62378, Isaí Vargas B88263, Miguel Chaves B61950, and Sergio Sandoval B66695

Resumen—En este trabajo se desarrolla un modelo tanto lineal como no lineal de un sistema de turbina y caldera. Este es uno de los más populares hoy en las plantas de producción de energía eléctrica. Es una unidad que consta en su modelo más básico de una caldera, una turbina, un generador y una bomba. Para lograr modelarlo de manera no lineal se utiliza el modelo de Åström-Bell y el resultado es muy acertado. Posteriormente el modelo no lineal, es linealizado utilizando derivadas parciales y evaluándolas en un punto de operación y este nuevo modelo es comparado con el no lineal. Se logra concluir que se linealizó el sistema de una manera acertada y que ambos modelos describen de buena manera el sistema original, específicamente las medidas de la presión, potencia y densidad.

I. INTRODUCCIÓN

La producción de energía eléctrica es un tema que con el paso de los años ha sumado importancia. Y cuando se habla acerca de las plantas de producción de energía eléctrica, una de las configuraciones más populares en la actualidad, es la de la unidad de caldera y turbina. Tiene la gran ventaja de que el funcionamiento básico es muy sencillo y además es una configuración eficiente y económica. La configuración se dice sencilla, debido a que básicamente consta de una caldera que produce vapor, este va a la turbina y mediante un generador se produce la energía eléctrica. La información anterior concuerda con lo mencionado por F. Fang y W. Le en su artículo [1].

La configuración de uno de estos sistemas, de forma muy simplificada se puede observar en la siguiente figura:

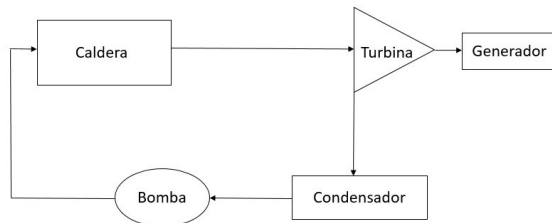


Figura 1. Sistema de Caldera y Turbina, creación propia.

En la figura anterior se tienen dos elementos extra con respecto a lo que se habían mencionado. La bomba se va a encargar de asegurarse que el agua llegue a la caldera y el condensador se encarga de realizar la transformación de vapor de agua nuevamente en agua líquida de manera que

pueda volver a ser utilizada por el sistema, y se minimice el desperdicio de la misma.

La caldera de vapor, básicamente de lo que se encarga es de proveer una cantidad adecuada y suficiente de vapor a la turbina. Por lo general la cantidad de agua que se tiene en la caldera se mantiene constante y debe de ser una cantidad adecuada debido a que, tanto un exceso como la falta de agua pueden generar problemas. Es por esto que el control en este tipo de sistemas es sumamente importante, y por lo general se debe de realizar una programación adecuada de la bomba que es la que se encarga de suministrar el agua a la caldera tal y como lo mencionan P. Chanda y P. Subbarao en su artículo [2].

La gran cantidad de variables que posee el sistema en estudio, así como la precisión hace que se necesiten gran cantidad de etapas de control que aseguren que las cosas salgan como se desean y no se dañe ninguno de los sistemas internos ni se tengan pérdidas indeseadas. Así como lo mencionan A. Ben-Abdenmour y K.Lee en su trabajo [3], en donde indican que hasta se hace una separación en subsistemas y se diseña una parte de control para cada uno de estos.

Es por las razones descritas anteriormente que es sumamente importante realizar modelos de dicho sistema, específicamente un modelo no lineal que represente de una buena forma el sistema, de manera que se pueda tener una idea de como se comporta el sistema y se pueda trabajar en toda la etapa de control adecuadamente. De igual forma, lograr linealizar el sistema va a también ser muy útil para comprender de una forma más certera el sistema. Para el caso de la presente investigación, se utilizará únicamente un modelo que incluya la turbina y la caldera. Y el modelo Åström y Bell, del cual se habla un poco más en la siguiente sección, modela de una muy buena forma el sistema. Por lo que para realizar los modelos, tanto el lineal como el no lineal, se utilizará como base dicho modelo.

II. MODELO CALDERA Y TURBINA

El modelo propuesto está principalmente basado en el trabajo de Åström y Eklund (1972, 1975) y que posteriormente fue ampliado por Bell y Åström (1979). En un inicio se tiene el modelo no lineal de segundo orden para mostrar la presión en el tambor y la salida eléctrica de una caldera de tambor de aceite de 160 MW. Posteriormente junto con Bell se realizaron mejoras para incluir el nivel del agua del tambor, pero esto elevó el orden del modelo a 7. En otra

línea de trabajo se tiene el modelo propuesto por Morton y Price (1977) el cual es de segundo orden y solo predice la presión en el tambor y el nivel del agua.[4] Como resultado al combinar ambos modelos se tiene un modelo de tercer orden que captura el rendimiento dinámico de una planta en su mayoría.

Nuestro modelo se limitará a relacionar las entradas de combustible y entrada de agua, flujo de vapor con las tres salidas, salida de presión, salida eléctrica y nivel de agua del tambor. Como se muestra en la figura 2.

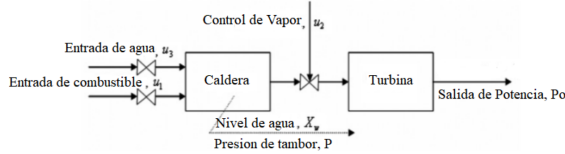


Figura 2. Diagrama del Modelo Caldera y Turbina. Obtenida de [5]

Se partirá de las ecuaciones mostradas en [4] que corresponden al trabajo de Bell y Aström,

$$\frac{dP}{dt} = -0,0018u_2 * p^{9/8} + 0,9u_1 - 0,15u_3 + 0,4 \frac{dx_3}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dP_o}{dt} = ((0,73u_2 - 0,16)p^{9/8} - P_o)/10 \quad (2)$$

$$w_s = (1,1u_2 - 0,19)P \quad (3)$$

$$\frac{d\rho_f}{dt} = (141u_3 - w_s)/V_t \quad (4)$$

$$\rho_s = C_{s1}P + C_{s2} \quad (5)$$

$$\alpha_{cs} = (1/\rho_f - v_w)/1/\rho_s - v_w \quad (6)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = (\alpha_{cs} - x_1)/T_{c1} \quad (7)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = (1000(\alpha_{cs} - x_2) - x_2)/T_{c2} \quad (8)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = (u_3 - x_3)/20 \quad (9)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = (3,55w_s - x_4)/20 \quad (10)$$

$$V_w = v_w * V_t * \rho + 20 \frac{dx_2}{dt} + 60\alpha_{cs} + 208 \frac{dx_3}{dt} + 0,5x_3 + 0,03x_4 \quad (11)$$

$$x_w = 50(V_w - 65,5) \quad (12)$$

En las ecuaciones anteriores,

u_1 , u_2 y u_3 son la entrada de combustible, entrada de agua y la posición del actuador.

P , P_o y x_w son las salidas de presión, eléctrica y nivel de agua.

w_s , ρ_f , ρ_s y α_{cs} son las variables de flujo de vapor, densidad del fluido, densidad del vapor y calidad de vapor.

V_t , C_{s1} , C_{s2} y v_w son constantes que representan el total de volumen, los ajustes mínimos cuadrados y el volumen específico del agua.

Cuadro I
CONSTANTES PARA DETERMINADOS PUNTOS DE OPERACION

Estados y entradas	1	2	3	4	5	6	7
x_{b1}	75.6	86.4	97.2	108	119	130	140
x_{b2}	15.3	36.7	50.5	66.7	85.1	105	128
x_{b3}	300	342	385	428	471	513	556
u_1	0.15	0.21	0.27	0.34	0.41	0.50	0.60
u_2	0.48	0.55	0.62	0.69	0.75	0.82	0.89
u_3	0.18	0.25	0.34	0.43	0.54	0.66	0.79

x_1 , x_2 , x_3 y x_4 son las variables correspondientes a los cambios de velocidad de circulación y el mecanismo de desplazamiento.

En [5] se muestra la tabla I con los valores respecto a algunos puntos de operación. Esto nos ayuda a simplificar las ecuaciones anteriores.

Basado en lo anterior reescribiremos las ecuaciones del modelo como.

$$\frac{dp}{dt} = -0,0018u_2 * p^{9/8} + 0,9u_1 - 0,15u_3 \quad (13)$$

$$\frac{dP_o}{dt} = (0,073u_2 - 0,016)p^{9/8} - 0,1P_o \quad (14)$$

$$\frac{d\rho_f}{dt} = (141u_3 - (1,1u_2 - 0,19)p)/85 \quad (15)$$

$$x_w = 0,05(0,13073\rho_f + 100\alpha_{cs} + q_e/9 - 67,975) \quad (16)$$

Donde x_w se define como el nivel del agua, α_{cs} es la cantidad de vapor y q_e es la tasa de evaporación. Estas cantidades se determinan en las ecuaciones 17 y 18 respectivamente.

$$\alpha_{cs} = \frac{(1 - 0,001538\rho_f)(0,8p - 25,6)}{\rho_f(1,0394 - 0,0012304p)} \quad (17)$$

$$q_e = (0,85u_2 - 0,147)p + 45,59u_1 - 2,51u_3 - 2,096 \quad (18)$$

Por lo que obtenemos un modelo de la forma habitual,

$$\frac{dx_b}{dt} = A_b(p) x_b + B_b(p) u_b \quad (19)$$

Con,

$$x_b = (p \ P_o \ \rho_f)^T = (x_{b1} \ x_{b2} \ x_{b3})^T \quad (20)$$

$$u_b = (u_1 \ u_2 \ u_3)^T \quad (21)$$

$$A_b(p) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0,016p^{9/8} & -0,1 & 0 \\ 0,19/85 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$B_b(p) = \begin{pmatrix} 0,9 & -0,0018p^{9/8} & -0,15 \\ 0 & 0,073p^{9/8} & 0 \\ 0 & -1,1p/85 & 141/85 \end{pmatrix} \quad (23)$$

II-A. Resultados del modelo no lineal en Simulink

En esta simulación se definieron las ecuaciones 14, 15 y 16, en una s-function para posteriormente agregarla a un bloque en Simulink, para este se usó el punto de operación 4 del cuadro I.

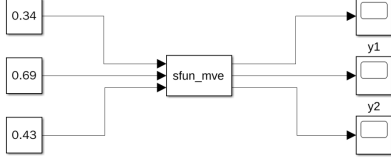


Figura 3. Diagrama del sistema en Simulink.

Se muestran las gráficas resultantes para cada salida.

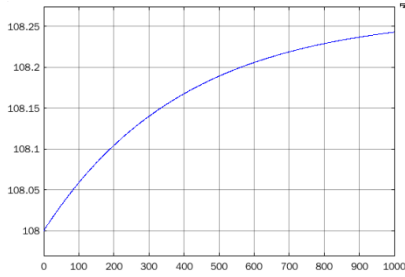


Figura 4. Presión contra tiempo, gráfica resultante de simulación.

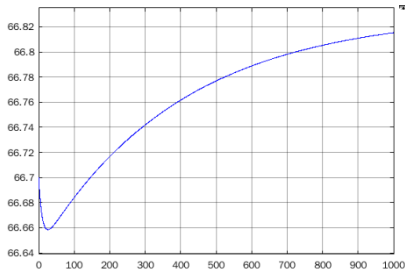


Figura 5. Potencia contra tiempo, gráfica resultante de simulación.

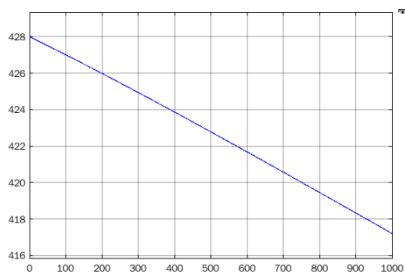


Figura 6. Densidad contra tiempo, gráfica resultante de simulación.

En la figura 4 se puede ver que la presión aumenta con el tiempo hasta cierto punto donde se vuelve asintótica, lo cual coincide con los datos que se presentan en [5], se puede notar que desde el punto de operación seleccionado el cambio de

la presión es muy pequeño. Algo similar pasa con la salida de potencia en la figura 5, ya que el cambio o aumento en esta es pequeño, el trazo de la gráfica es muy similar a la mostrada en [5]. Seguidamente se tiene el cambio de la densidad del fluido en la figura 6, en este caso el fluido es agua, el dato dado por el punto de operación 4 se puede considerar un poco alto, por lo que la densidad empieza a bajar drásticamente, esto difiere de los resultados mostrados en [5] para esta salida, aunque en ambos resultados se inicia con un descenso, hay gran diferencia en escala o magnitud entre los resultados.

III. LINEALIZACIÓN DEL SISTEMA EN EL PUNTO DE OPERACIÓN

El cuadro I nos permite saber ciertos valores para las variables de estado $x_{b,0}$ y las entradas de control $u_{b,0}$ en determinados puntos de operación. Escogiendo arbitrariamente el punto de operación 4, tenemos los siguientes valores para los estados y las entradas: $x_{b1} = p = 108$, $x_{b2} = P_0 = 66.7$, $x_{b3} = \rho_f = 428$; $u_1 = 0.34$, $u_2 = 0.69$ y $u_3 = 0.43$. Ahora, para linealizar el modelo, se realizan las derivaciones parciales para el vector de estados $x = f(x, u)$ con respecto a las variables de estado $x_b = (p \ P_0 \ \rho_f)^T$. Denotamos las ecuaciones 13, 14 y 15 como f_1 , f_2 y f_3 respectivamente, entonces:

$$\frac{\partial f_1}{\partial p} = \frac{\partial \dot{p}}{\partial p} = -0.002025 u_2 * p^{\frac{1}{8}} \Big|_Q = -0.002509 \quad (24)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial P_0} = \frac{\partial \dot{p}}{\partial P_0} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \rho_f} = \frac{\partial \dot{p}}{\partial \rho_f} = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial p} = \frac{\partial \dot{P}_0}{\partial p} = (u_2 - 0.219178) 0.082125 p^{\frac{1}{8}} \Big|_Q = 0.06942 \quad (27)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial P_0} = \frac{\partial \dot{P}_0}{\partial P_0} = -0.1 \quad (28)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \rho_f} = \frac{\partial \dot{P}_0}{\partial \rho_f} = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial p} = \frac{\partial \dot{\rho}_f}{\partial p} = 0.002235 - 0.1294 u_2 \Big|_Q = -0.00669 \quad (30)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial P_0} = \frac{\partial \dot{\rho}_f}{\partial P_0} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \rho_f} = \frac{\partial \dot{\rho}_f}{\partial \rho_f} = 0 \quad (32)$$

Los valores de las ecuaciones 24 a la 32 son los valores que completan la matriz A de las entradas, evaluadas en el punto de operación, por lo tanto:

$$A_b(Q) = \begin{pmatrix} -0.002509 & 0 & 0 \\ 0.06942 & -0.1 & 0 \\ -0.00669 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (33)$$

Paralelamente, para la matriz B , se procede a realizar las fracciones parciales de las ecuaciones de estado con respecto

a las entradas de control $u_b = (u_1 \ u_2 \ u_3)^T$ y se evalúan en el punto de operación 'Q':

$$\frac{\partial f_1}{\partial u_1} = \frac{\partial \dot{p}}{\partial u_1} = 0,9 \quad (34)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial u_2} = \frac{\partial \dot{p}}{\partial u_2} = -0,349 \quad (35)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial u_3} = \frac{\partial \dot{p}}{\partial u_3} = -0,15 \quad (36)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial u_1} = \frac{\partial \dot{P}_0}{\partial u_1} = 0 \quad (37)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial u_2} = \frac{\partial \dot{P}_0}{\partial u_2} = 14,155 \quad (38)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial u_3} = \frac{\partial \dot{P}_0}{\partial u_3} = 0 \quad (39)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial u_1} = \frac{\partial \dot{\rho}_f}{\partial u_1} = 0 \quad (40)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial u_2} = \frac{\partial \dot{\rho}_f}{\partial u_2} = -118,8/85 \quad (41)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial u_3} = \frac{\partial \dot{\rho}_f}{\partial u_3} = 141/85 \quad (42)$$

Así, los resultados de las ecuaciones modelan los coeficientes de la matriz B_b evaluada en el punto 'Q', y se observa en la ecuación 43.

$$B_b(Q) = \begin{pmatrix} 0,9 & -0,349 & -0,15 \\ 0 & 14,155 & 0 \\ 0 & -118,8/85 & 141/85 \end{pmatrix} \quad (43)$$

De la figura 2, podemos observar que las salidas del sistema, como se mencionó anteriormente, son p , P_0 y x_w , estas salidas conforman el vector $y = g(x, u)$, realizando la derivación parcial con respecto a las variables de estado $x_b = (p \ P_0 \ \rho_f)^T$ que conforman el vector de estados:

$$\frac{\partial g_1}{\partial p} \Big|_Q = \frac{\partial p}{\partial p} \Big|_Q = 1 \quad (44)$$

$$\frac{\partial g_1}{\partial P_0} \Big|_Q = \frac{\partial p}{\partial P_0} \Big|_Q = 0 \quad (45)$$

$$\frac{\partial g_1}{\partial \rho_f} \Big|_Q = \frac{\partial p}{\partial \rho_f} \Big|_Q = 0 \quad (46)$$

$$\frac{\partial g_2}{\partial p} \Big|_Q = \frac{\partial P_0}{\partial p} \Big|_Q = 0 \quad (47)$$

$$\frac{\partial g_2}{\partial P_0} \Big|_Q = \frac{\partial P_0}{\partial P_0} \Big|_Q = 1 \quad (48)$$

$$\frac{\partial g_2}{\partial \rho_f} \Big|_Q = \frac{\partial P_0}{\partial \rho_f} \Big|_Q = 0 \quad (49)$$

$$\frac{\partial g_3}{\partial p} \Big|_Q = \frac{\partial x_w}{\partial p} \Big|_Q = 0,006328 \quad (50)$$

$$\frac{\partial g_3}{\partial P_0} \Big|_Q = \frac{\partial x_w}{\partial P_0} \Big|_Q = 0 \quad (51)$$

$$\frac{\partial g_3}{\partial \rho_f} \Big|_Q = \frac{\partial x_w}{\partial \rho_f} \Big|_Q = 0,004706 \quad (52)$$

Las ecuaciones de la 44 a la 52 son los valores que componen la matriz $C_b(Q)$ linealizada, denotada por:

$$C_b(Q) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,006328 & 0 & 0,004706 \end{pmatrix} \quad (53)$$

Seguidamente, también para las salidas, se realiza la derivación parcial evaluada en el punto de operación 'Q' con respecto a las entradas de control $u_b = (u_1 \ u_2 \ u_3)^T$ para linealizarla:

$$\frac{\partial g_1}{\partial u_1} \Big|_Q = \frac{\partial p}{\partial u_1} \Big|_Q = 0 \quad (54)$$

$$\frac{\partial g_1}{\partial u_2} \Big|_Q = \frac{\partial p}{\partial u_2} \Big|_Q = 0 \quad (55)$$

$$\frac{\partial g_1}{\partial u_3} \Big|_Q = \frac{\partial p}{\partial u_3} \Big|_Q = 0 \quad (56)$$

$$\frac{\partial g_2}{\partial u_1} \Big|_Q = \frac{\partial P_0}{\partial u_1} \Big|_Q = 0 \quad (57)$$

$$\frac{\partial g_2}{\partial u_2} \Big|_Q = \frac{\partial P_0}{\partial u_2} \Big|_Q = 0 \quad (58)$$

$$\frac{\partial g_2}{\partial u_3} \Big|_Q = \frac{\partial P_0}{\partial u_3} \Big|_Q = 0 \quad (59)$$

$$\frac{\partial g_3}{\partial u_1} \Big|_Q = \frac{\partial x_w}{\partial u_1} \Big|_Q = 0,2532 \quad (60)$$

$$\frac{\partial g_3}{\partial u_2} \Big|_Q = \frac{\partial x_w}{\partial u_2} \Big|_Q = 0,51 \quad (61)$$

$$\frac{\partial g_3}{\partial u_3} \Big|_Q = \frac{\partial x_w}{\partial u_3} \Big|_Q = -0,01394 \quad (62)$$

Similar para la matriz $C_b(Q)$, las ecuaciones de la 54 a la 62 constituyen los valores que conforman la matriz $D_b(Q)$, se dispone la matriz como sigue:

$$D_b(Q) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,2532 & 0,51 & -0,01394 \end{pmatrix} \quad (63)$$

Entonces, el modelo en variable de estados linealizado está dado por:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -0,002509 & 0 & 0 \\ 0,06942 & -0,1 & 0 \\ -0,00669 & 0 & 0 \end{bmatrix} dx + \begin{bmatrix} 0,9 & -0,349 & -0,15 \\ 0 & 14,155 & 0 \\ 0 & -118,8/85 & 141/85 \end{bmatrix} \partial u \quad (64)$$

$$\partial y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,006328 & 0 & 0,004706 \end{bmatrix} dx + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,2532 & 0,51 & -0,01394 \end{bmatrix} \partial u \quad (65)$$

IV. ANÁLISIS

Se presentan varias simulaciones para poder comparar los resultados del modelo no lineal propuesto, con los resultados presentes después del proceso de linealización. Primero presentaremos las gráficas resultantes de simular el modelo no lineal respecto a las salidas de presión, potencia y tiempo:

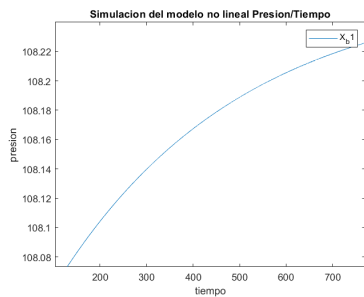


Figura 7. Gráfica modelo no lineal Presión/tiempo.

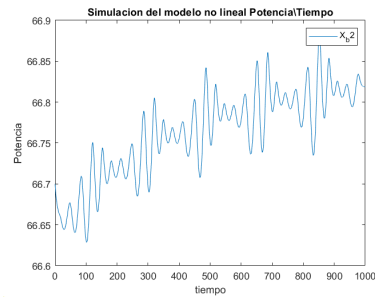


Figura 8. Gráfica modelo no lineal Potencia/tiempo.

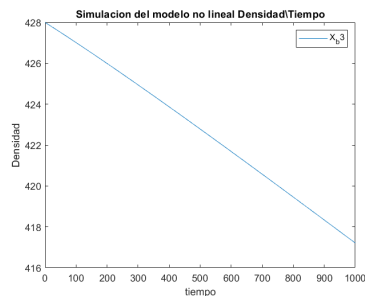


Figura 9. Gráfica modelo no lineal Densidad/tiempo.

Después de realizar el proceso de linealizado, al simular el modelo lineal respecto a las salidas obtenemos las siguientes gráficas para realizar las comparaciones necesarias entre ambos modelos:

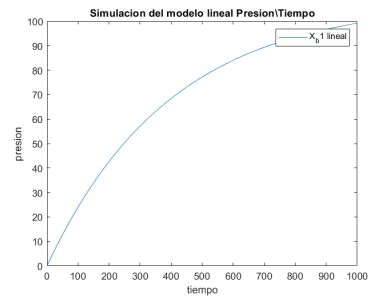


Figura 10. Gráfica modelo lineal Presión/tiempo.

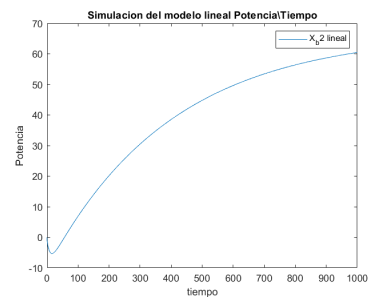


Figura 11. Gráfica modelo lineal Potencia/tiempo.

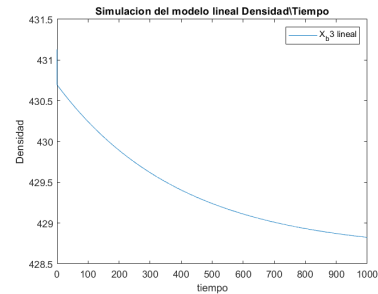


Figura 12. Gráfica modelo lineal Densidad/tiempo.

Al comparar las gráficas entre salidas observamos que nuestras salidas, son similares, exceptuando los puntos de partida en la gráfica de salidas de presión y densidad, en las cuales se observa un desajuste en su punto de partida, esto debido al cambio entre los modelos. Se observa que las gráficas tienen la misma tendencia hacia el infinito por lo que podemos asumir que nuestro modelo lineal se ajusta a las características del modelo no lineal propuesto y por tanto nuestras ecuaciones.

Considerando los resultados de los polos y ceros obtenidos y simulados en Matlab según la la figura 13

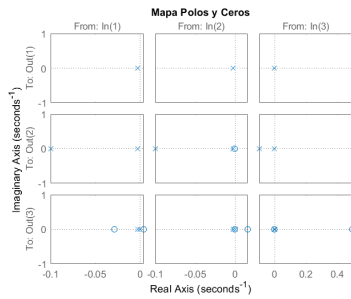


Figura 13. Polos y Ceros presentes

Los polos y los ceros presentes en nuestro modelo lineal, explican los cambios presentes en las figuras del modelo lineal, ya que como se observa, estos poseen polos y ceros cercanos al origen en cada una de sus salidas. Este efecto de estos polos y ceros los podemos observar mejor si analizamos la frecuencia y comparamos los efectos presentes en un diagrama de bode:

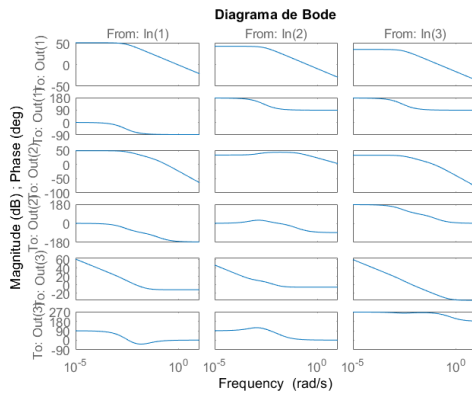


Figura 14. Diagramas de bode, análisis de frecuencia del modelo lineal.

Otros datos interesantes que simulamos de nuestros modelo lineal

La respuesta a entrada cero:

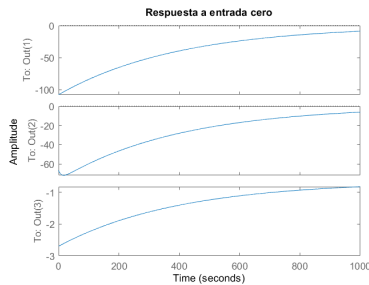


Figura 15. Respuesta del modelo lineal, respecto a una entrada cero.

La respuesta al escalón unitario:

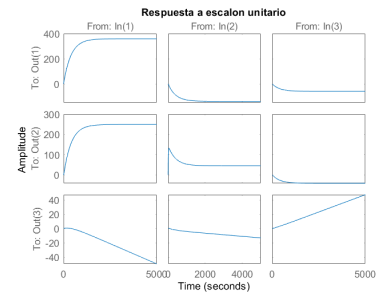


Figura 16. Respuesta del modelo lineal, respecto a un escalón unitario.

La respuesta al impulso

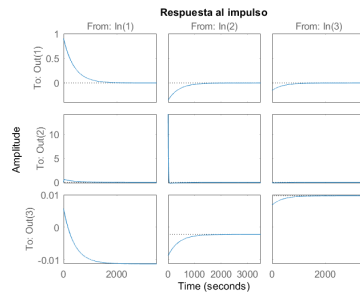


Figura 17. Respuesta del modelo lineal, respecto al impulso.

V. CONCLUSIÓN

Al considerar las soluciones de nuestro modelo respecto al modelo no linealizado, podemos concluir que el procedimiento realizado fue correcto, y que hemos obtenido el modelo lineal de dicho sistema a partir de las ecuaciones vistas en clase. Las tendencias de ambos modelos vistos desde las gráficas obtenidas en matlab son similares y nos permiten ver que el comportamiento de ambos modelos para un mismo sistema es válido dependiente de lo que se desea conseguir, en nuestro caso obtenemos un comportamiento similar en las salidas de presión, potencia y densidad que poseen los dos modelos, el planteado no lineal y el linealizado obtenido a partir del procedimiento visto en clase. Con esto podemos decir que es posible realizar un modelo analítico de un sistema, que explore los puntos necesario para nuestra utilidad.

REFERENCIAS

- [1] Fang, Fang y Wei Le: *Pressure equilibrium control for boiler-turbine units*. páginas 143–147, 2009, ISBN 9781424438204.
- [2] Chanda, Pradip y P. M.V. Subbarao: *Controlling drum level of a utility boiler during boiler feed pump runback using related rate concept*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Julio 2016, ISBN 9781467366212.
- [3] Ben-Abdenour, A. y K.Y. Lee: *An autonomous control system for boiler-turbine units*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 11(2):401–406, 1996.
- [4] Bell, R.D. y Åström K.J.: *Dynamic Models for Boiler-Turbine Alternator Units: Data Logs and Parameter Estimation for a 160 MW Unit*. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH), Diciembre 1987, ISBN -.
- [5] Chen, Pang Chia: *Multi-objective control of nonlinear boiler-turbine dynamics with actuator magnitude and rate constraints*. Elsevier Ltd., Septiembre 2012, ISBN -.