

Modelación y ajuste del lazo de control de potencia activa en una central eléctrica

Modeling and tuning of the active power control loop in a power plant

Deynier Montero Góngora¹, Javier Matos Urgelles², Ángel Oscar Columbié Navarro³, Carlos Corrales Tapia⁴

DOI: [10.61236/ciya.v9i2.1098](https://doi.org/10.61236/ciya.v9i2.1098)

RESUMEN:

El grupo electrógeno de motores MAN (fabricante de motores de combustión interna Alemania) con 184 MW de potencia nominal máxima, ubicado en la ciudad de Moa, provincia Holguín, constituye una de las centrales eléctricas enlazadas al SEN (Sistema Electroenergético Nacional) que aporta 165 MW a la demanda del sistema. La potencia activa de los generadores es regulada a través de la entrada de combustible al motor de combustión interna que gira a una velocidad de 514 rpm, acelerando o desacelerando. El lazo de control, ajustado a prueba y error, está formado por los transformadores de corriente y tensión, un PLC (Controlador Lógico Programable) y un actuador para manipular el flujo de combustible. Durante los años de explotación, los motores de la empresa han sufrido desgastes en sus mecanismos de regulación de combustible, que originan oscilaciones en la potencia, y provocan pérdidas de hasta 2 MW. En este artículo se proponen modelos paramétricos que describen la dinámica del sistema. Se realizaron experimentos pasivos de 10 días operacionales, para modelar el comportamiento de la potencia del motor, respecto a la posición del actuador que manipula el flujo de combustible. Como resultado, se propusieron los parámetros de los controladores automáticos, para optimizar el consumo de energía, minimizar las pérdidas por fricción o ineficiencias térmicas, mejorar la eficiencia de la combustión y reducir las emisiones contaminantes.

Palabras claves: Sistema Electroenergético, potencia activa, generadores, modelos paramétricos, controladores automáticos.

¹ Universidad de Moa, Moa, Holguín, Cuba, dmonterog150688@gmail.com

¹ Universidad de Moa, Moa, Holguín, Cuba, matosjavier45@gmail.com

¹ Universidad de Moa, Moa, Holguín, Cuba, acolumbie@ismm.edu.cu

⁴ Instituto Superior Tecnológico Tungurahua, Ambato Tungurahua, Quito, Ecuador, ccorrales.istt@gmail.com

ABSTRACT:

The MAN engine generator set (a German internal combustion engine manufacturer) with a maximum rated power of 184 MW, located in the city of Moa, Holguín province, is one of the power plants connected to the SEN (National Electric Power System), contributing 165 MW to the system's demand. The generators' active power is regulated by the fuel input to the internal combustion engine, which rotates at a speed of 514 rpm, accelerating or decelerating. The control loop, tuned by trial and error, consists of current and voltage transformers, a PLC (Programmable Logic Controller), and an actuator to manipulate fuel flow. Over the years of operation, the company's engines have suffered wear in their fuel regulation mechanisms, resulting in power fluctuations and losses of up to 2 MW. This article proposes parametric models that describe the system dynamics. Passive experiments were conducted over 10 operational days to model the behavior of engine power relative to the position of the actuator that manipulates fuel flow. As a result, parameters for automatic controllers were proposed to optimize energy consumption, minimize friction losses or thermal inefficiencies, improve combustion efficiency, and reduce pollutant emissions.

Keywords: *Electric Power System, active power, generators, parametric models, automatic controllers.*

Recibido 13 de enero de 2025; revisión aceptada 22 de mayo de 2025

1. INTRODUCCIÓN

Como respuesta a la crisis energética de 2004, Cuba implementó un innovador modelo de generación eléctrica como parte de su Revolución Energética, basado en la integración masiva de grupos electrógenos diésel y de *fuel oil* sincronizados al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Este enfoque representó un cambio paradigmático en la generación de energía, priorizando soluciones de alta disponibilidad, rápida implementación y potencia modular, capaz de garantizar suministro incluso en situaciones de operación aislada.

En la actualidad, el país ha diversificado su matriz con un creciente despliegue de energías renovables, complementado por una extensa red de grupos electrógenos. En Holguín, por ejemplo, se han instalado:

- Unidades diésel: 31 grupos (serie 2000 y 4000) en subestaciones aisladas (37,4 MW totales).
- Baterías estratégicas: 88 unidades en subestaciones de alta tensión (110/220 kV) con 155,2 MW de capacidad.

- Capacidad integrada: Estos sistemas, junto a la central de fuel oil de Moa (CEFOM), alcanzan conjuntamente 252,6 MW.

La CEFOM opera con *fuel oil* mejorado y tecnología MAN & W (Alemania), con 10 unidades de 18,4 MW cada una (184 MW totales en régimen continuo). Esta infraestructura:

- es la mayor central generadora de Cuba,
- fue diseñada para abastecer la demanda crítica de la Empresa Ferroníquel (120 MW pico, incluyendo dos hornos de 45 MW, cada uno),
- ofrece una confiabilidad del 98,5 % [1] con capacidad de regulación de voltaje en la región oriental y sincronización al SEN,
- mantiene frecuencia estable en 60 Hz (98,8 % de continuidad) y operatividad en modo isla para emergencias locales.

En la CEFOM se han detectado constantes perturbaciones e ineficiencias operacionales en el funcionamiento del lazo de control de potencia activa en los motores, dado que el controlador PI (proporcional-integral) está ajustado a prueba y error, y no tiene en cuenta modelos matemáticos que relacionen las variables de interés del proceso.

Al consultar la literatura, se reportaron desde modelos bien básicos [2], modelos para sistemas marinos [3, 4, 5] y motores diésel en general [6]. Por su parte, otros autores aplicaron un enfoque de identificación de sistemas para un modelado predictivo preciso de un motor diésel alimentado con éster metílico de aceite HONGE (Karanja). Se utilizaron diferentes estructuras como arx (autorregresiva con variables exógenas), armax (media móvil autorregresivo con variables exógenas), oe (error de salida) y bj (box jenkins). Todos los modelos se evaluaron en función del FIT (factor de ajuste), MSE (error cuadrático medio), FPE (error de predicción final de Akaike) y el número de parámetros [7].

El objetivo de este artículo es obtener modelos paramétricos, que relacionen la potencia activa del motor en función de la posición del actuador que manipula el flujo de combustible; para proponer los parámetros de los controladores PID, con vistas al aumento de la eficiencia energética en la CEFOM.

2. METODOLOGÍA

2.1. Descripción del lazo de control de potencia

En los motores MAN de combustión interna existen varios lazos de control, sin embargo, la investigación se enmarca en el lazo de control de potencia en función de la posición del actuador; que garantiza la correcta distribución de combustible a los inyectores.

El lazo de la figura 1 tiene como variable de referencia los valores de corriente (A) y tensión (V) a través de dos transformadores de corriente (TC) y potencia (TP), trifásicos.

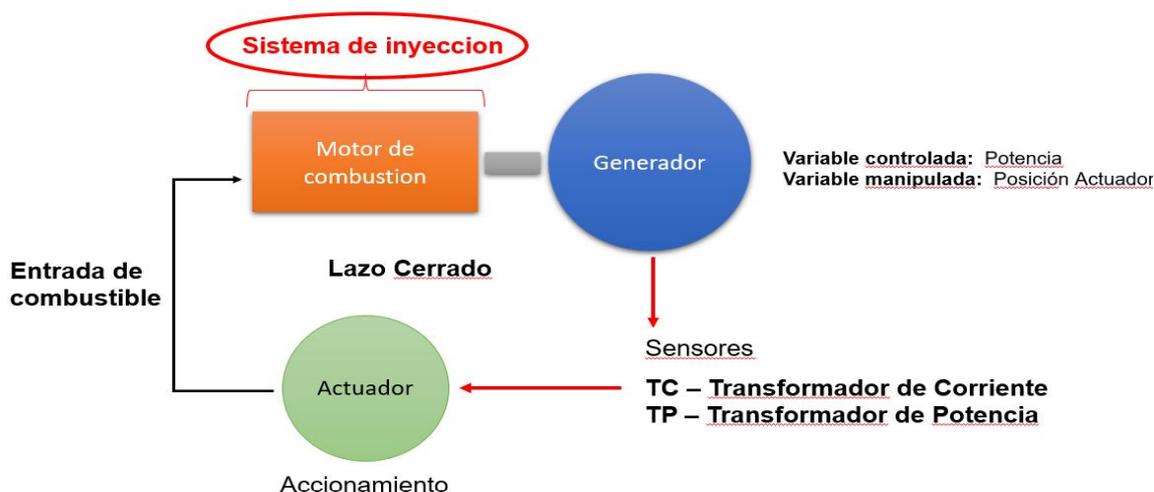


Figura 1. Lazo de control de potencia.

Estos valores son equivalentes a una velocidad de 514 rpm, frecuencia de 60 Hz, y una potencia activa de 13,8 kW. Luego se envían las señales a un convertidor marca DEIF, que acondiciona las señales a 4 a 20 mA (frecuencia, potencia, corriente, y tensión) para ser receptionadas por el PLC donde está configurado el controlador PI, a prueba y error. La variable manipulada es la posición del actuador para incidir sobre el flujo de combustible al motor de combustión interna. Las perturbaciones fundamentales del proceso son la frecuencia de la red, el sistema mecánico del moto-generador y actuador, y el tipo de combustible.

2.1.1. Estado actual de la automatización del proceso

En la figura 2 se muestra el SCADA (sistema de supervisión, control y adquisición de datos) de la CEFOM.

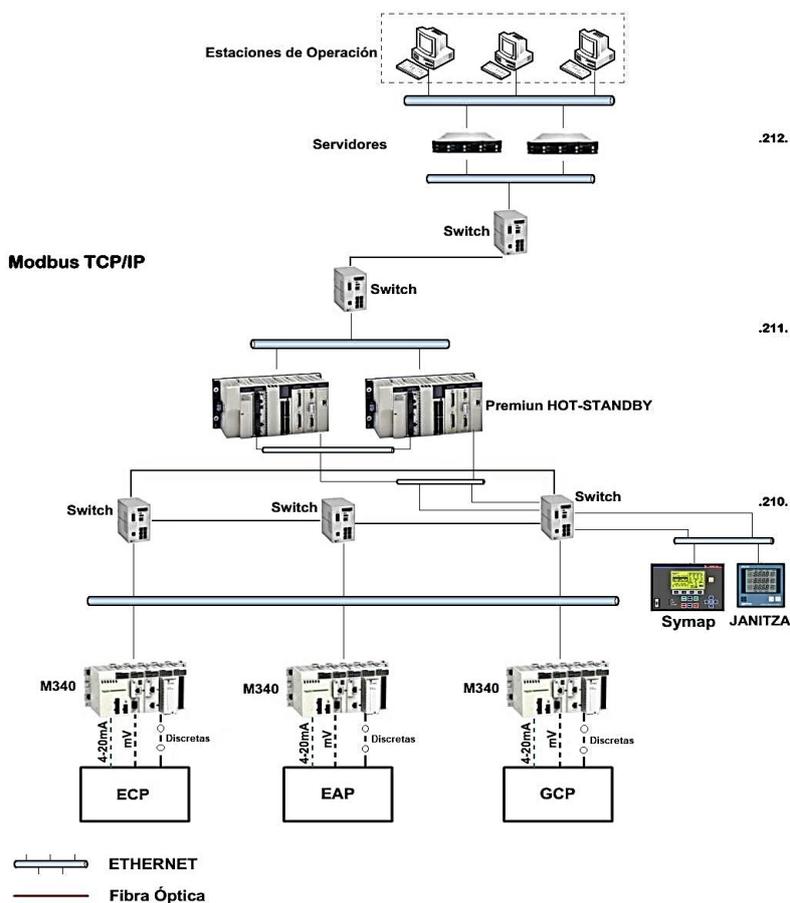


Figura 2. SCADA para un moto-generador.

Cada unidad moto-generadora cuenta con tres conjuntos de sensores (ECP, EAP y GCP), los cuales envían señales tanto eléctricas como discretas a los controladores Modicon M340. Estos autómatas se interconectan mediante cables Ethernet a *switches* de comunicación, configurados en topología de anillo a través de fibra óptica. Posteriormente, los datos se transmiten a los PLCs Premium (operando en modo HOT-STANBY) y a los equipos de protección Symap y JANITZA. Finalmente, la información es recopilada por servidores redundantes a través de *switches* y distribuida a las estaciones de operación.

2.2. Metodología general para la modelación y ajuste del lazo de control de potencia

Para la recopilación de los datos históricos del lazo de control de potencia en función de la posición del actuador que manipula el flujo de combustible al motor, fue utilizado el sistema de supervisión y control EROS versión 5.11.3.10. El programa MATLAB®, específicamente: El toolbox de identificación de sistemas y *PID Tuner*, se emplearon para la modelación y ajuste del lazo de control. Para el procesamiento de los datos se empleó una laptop DELL, Intel (R) Core (TM) i5-8250U CPU @ 1,60 GHz 1,80 GHz, a una frecuencia de 3,00 GHz 3,00 GHz y una memoria RAM instalada de 8,00 GB (7,86 GB utilizable).

Los experimentos pasivos se realizaron en el motor 10 porque presenta mayor inestabilidad en las oscilaciones de potencia, respecto al resto de motores de la instalación. Las características del combustible se presentan en la tabla 1, con valores cercanos a los parámetros nominales.

Tabla 1. Características del *fuel-oil*.

Características	Unidad de medida	Valor
Viscosidad a 50 °C	cSt	306,68
Viscosidad a 80 °C	cSt	66,116
Viscosidad óptima	cSt	12
Temperatura de quemado	°C	134,7

2.2.1. Modelos paramétricos y ajuste de controladores

Para obtener los modelos paramétricos y ajustar los controladores se cumplieron los siguientes acápite:

1. Recopilar datos históricos del motor 10, correspondientes a 10 días de enero de 2025.
2. Corregir datos anómalos.
3. Diseñar el experimento mediante una exploración pasiva de la evolución de la variable de salida ante las variaciones de la señal de entrada. Preprocesamiento de las variables: posición del actuador y potencia activa. Luego, de forma automática, el toolbox de identificación de sistemas selecciona los primeros 50 % de los datos para la estimación y el 50 % restante para la validación de los modelos paramétricos. La métrica utilizada para la evaluación de los modelos es el índice de ajuste FIT (ecuación 1).

$$FIT = 100 \left(1 - \frac{\|y - \hat{y}\|}{\|y - \text{mean}(y)\|} \right) \quad (1)$$

Donde:

FIT : índice de ajuste; %.

y : la salida medida; (MWh).

\hat{y} : la salida estimada por el modelo; (MWh).

$mean(y)$: valor promedio de la salida medida; (MWh).

4. Probar diferentes estructuras y órdenes de modelos discretos.
5. Estimar los parámetros de los modelos que mejor se adaptan a la dinámica del sistema.
6. Validar el modelo. Si el modelo no es válido, se transitan nuevamente por los acápites del 1 al 5 para obtener un modelo válido.
7. Ajuste de controladores. Mediante la herramienta *PID Tuner* de MATLAB®, se sintonizaban los parámetros de los controladores, que accionarían sobre los modelos matemáticos en lazo cerrado.
8. Analizar la estabilidad de la estrategia de control propuesta.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Modelo de potencia versus posición del actuador

La tabla 2 ofrece un resumen de experimentos para identificar los modelos paramétricos del sistema.

En el experimento 2 se recopilaron 3 601 datos de la variable de salida POT (potencia activa del motor) en función de la variable de entrada ACT (posición del actuador), con un período de muestreo de 1s. En este caso ACT experimentó una variación de 63,75 – 67,5 %. La carga del motor era de 70,4 %. En la figura 3 se muestra la evolución de las variables de entrada-salida.

En la figura 4 se presenta la validación cruzada, que evidencia la aproximación entre la salida real y el modelo oe221, el cual obtuvo un ajuste FIT = 90,7 %. Posteriormente, el modelo se convirtió de discreto a continuo, y resultó un modelo de tercer orden (ecuación 2).

Tabla 2. Resumen de los experimentos pasivos.

Experimento	Rango de entrada (%)	Rango de salida (MWh)	Modelo	Ajuste FIT (%)
1	44,75 – 68	6 908,8 – 14 793,6	bj22221	90,9
2	63,75 – 67,5	11 347,2 – 14 672	oe221	90,7
3	42,75 – 70,5	5 705,6 – 15 856	arx441	77,59
4	63,5 – 72	12 099 – 15 742	arx441	67,4

5	64,5 – 75,5	13 075 – 17 491	arx441	41,84
6	65 – 69,5	12 454 – 14 825	arx441	25,73
7	63 – 69	12 035 – 15 097	tfl	14,49
8	63,75 – 67,5	11 347 – 14 672	arx441	13,38
9	64 – 69	11 734 – 15 037	bj22221	11,32
10	63,5 – 71	11 920 – 1 561,4	arx441	10,59

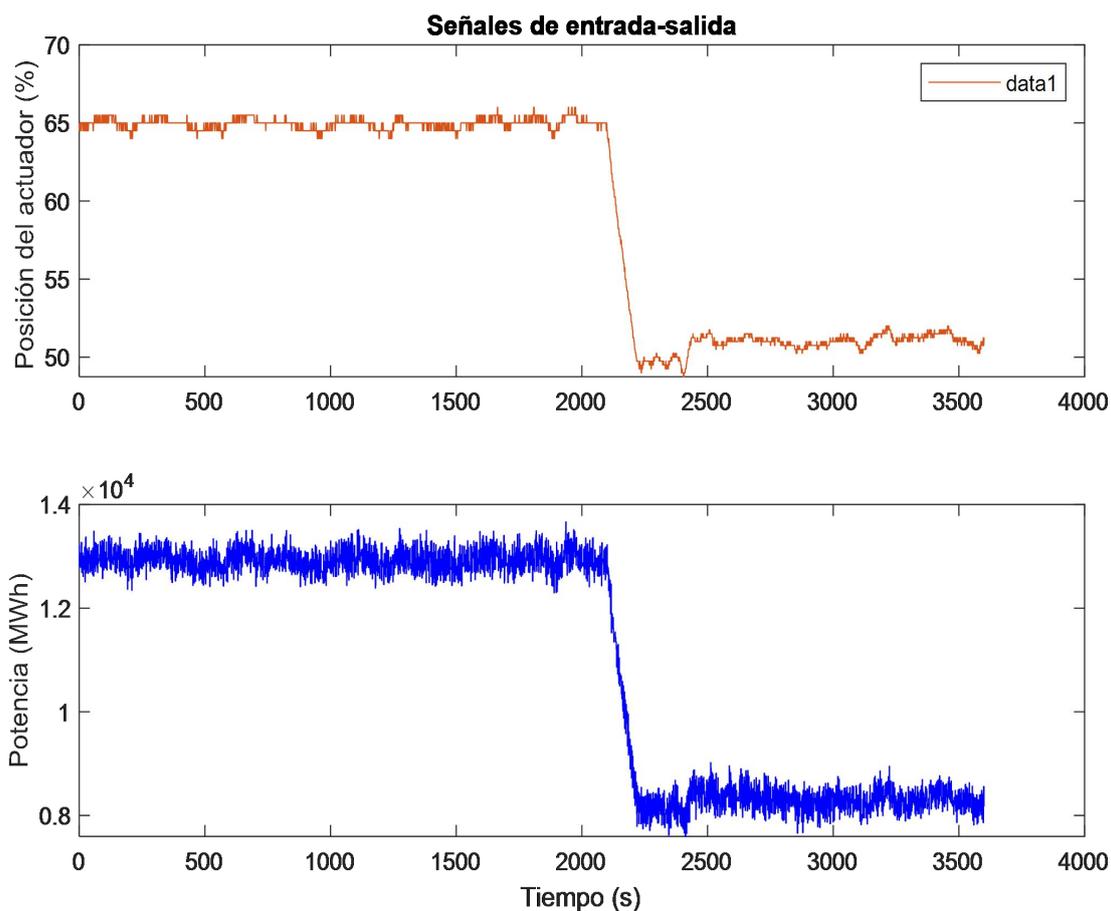


Figura 3. Respuesta temporal de la posición del actuador versus potencia del motor.

$$G(s) = \frac{0,0005959s^2 + 0,0002624s + 0,005902}{s^3 + 0,3867s^2 + 9,916s + 1,946}$$

(2)

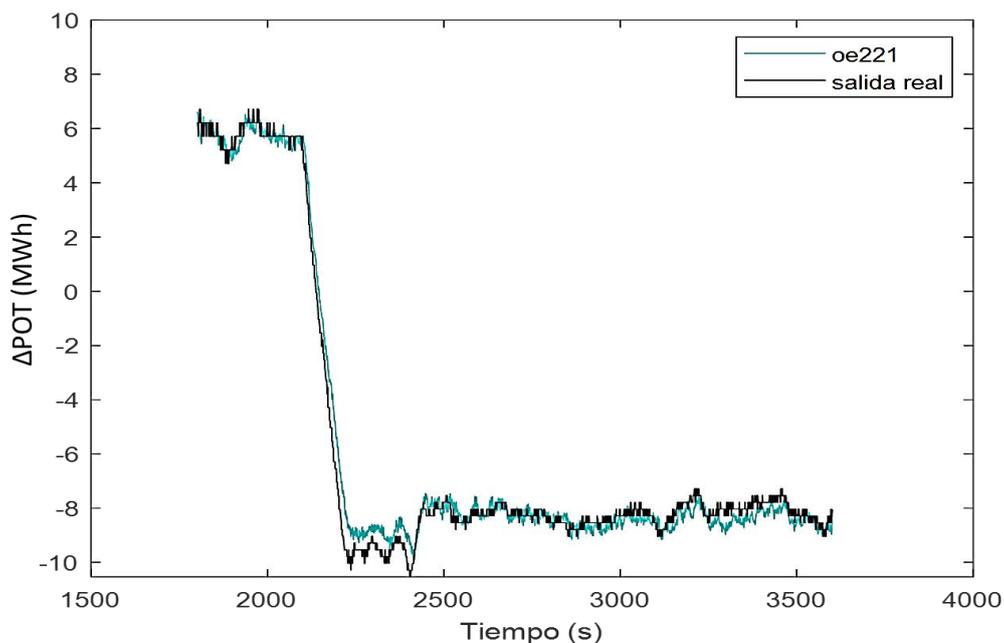


Figura 4. Salida real vs. salida del modelo oe221.

3.2. Ajuste del lazo de control de potencia

Se sintonizaron los controladores P, PI, PID, que mejor se adaptaron a la dinámica del proceso en cuanto al máximo sobrepaso (M_p) y tiempo de establecimiento (t_s). A través de la herramienta *PID Tuner* se cargaba el modelo de la planta, localizado en el *Workspace* de MATLAB®, en una estrategia de control a lazo cerrado.

Los controladores sintonizados, a partir de las especificaciones de la respuesta temporal en lazo cerrado: máximo sobrepaso (M_p) y tiempo de establecimiento (t_s); se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Sintonía de los controladores para el lazo de potencia.

Parámetros	Controlador P	Controlador PI	Controlador PID
K_p	738	400,7316	496,2
K_i	-	244,551	215,6
K_d	-	-	0
t_s	6,31 s	13,6 s	14,5 s
M_p	0,43 %	14,3 %	9,31 %

Se elaboró un esquema en *simulink* (figura 5) para comparar las respuestas temporales con los controladores diseñados y el controlador actual de la CEFOM, y determinar cuál estrategia es más recomendable para controlar la potencia activa del motor.

La salida con el controlador P se estabiliza a los 6,31 s, con un sobrepaso de 0,43 % y error a estado estacionario ($e_{ss} = 0,32$). El esquema con el controlador PID resultó ser el de mejor respuesta temporal, pues alcanza $e_{ss} = 0$, exhibe un sobrepaso ($M_p = 9,31\%$) y tiempo de establecimiento ($t_s = 14,5$ s); especificaciones que se consideran adecuadas para los propósitos de control de la potencia activa del motor, de acuerdo a las consultas previas realizadas a los especialistas de Automática de la empresa. En contraste, la salida con el controlador PI actual de la CEFOM tiene una respuesta exponencial, pero con un tiempo de establecimiento muy lento de aproximadamente 300 s (Figura 6). Esto implica que el sistema con el controlador PID propuesto responde mucho más rápido a cambios en la referencia o a perturbaciones externas, exhibe mayor precisión y adaptabilidad a cambios dinámicos.

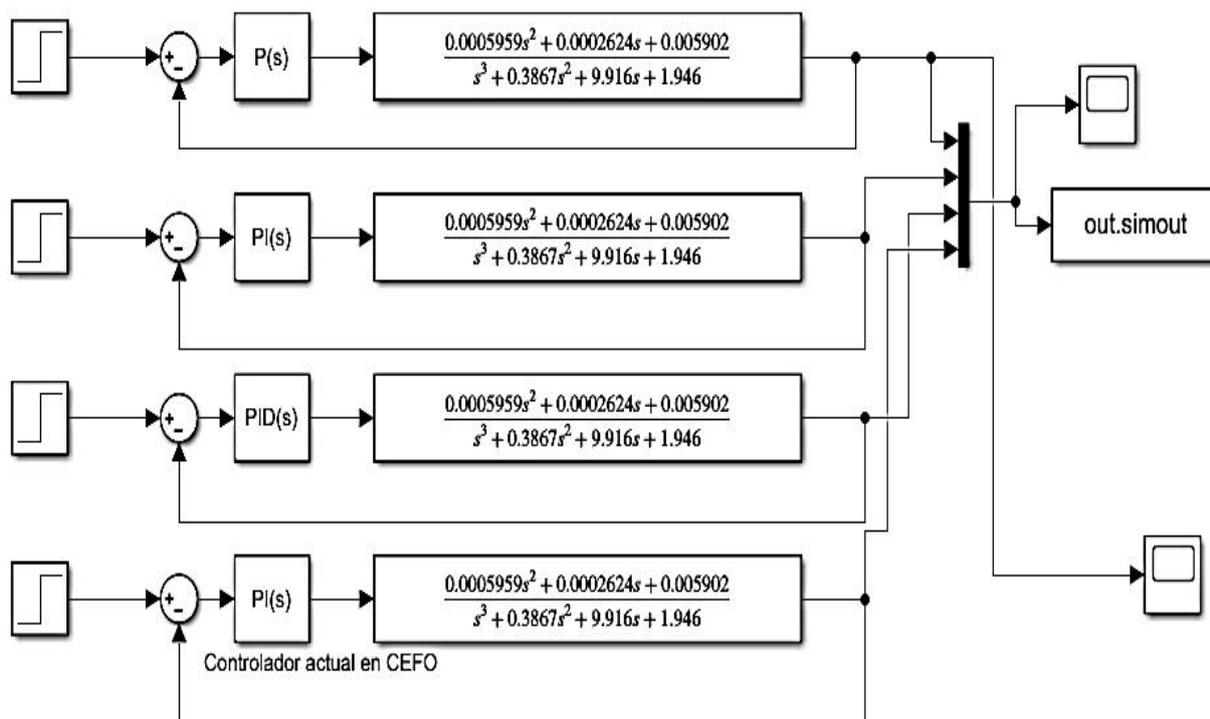


Figura 5. Simulación con diferentes configuraciones de control.

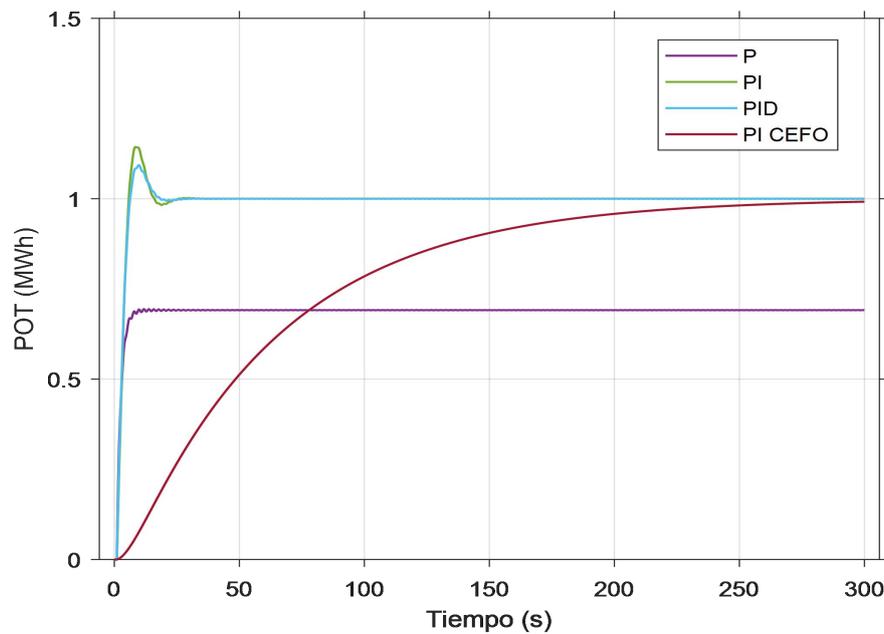


Figura 6. Respuesta temporal de la potencia para diferentes controladores.

3.3. Análisis de estabilidad

A partir de las funciones de transferencia del controlador PID y la planta; se calculó la función de transferencia en lazo cerrado.

$$\frac{POT(s)}{ACT(s)} = \frac{\left(\frac{Kds^2 + Kps + Ki}{s}\right)}{1 + \left(\frac{Kds^2 + Kps + Ki}{s}\right)} \cdot \frac{\left(\frac{0,0005959s^2 + 0,0002624s + 0,005902}{s^3 + 0,3867s^2 + 9,916s + 1,946}\right)}{\left(\frac{0,0005959s^2 + 0,0002624s + 0,005902}{s^3 + 0,3867s^2 + 9,916s + 1,946}\right)}$$

(3)

$$\frac{POT(s)}{ACT(s)} = \frac{\left(\frac{496,2s + 215,6}{s}\right)}{1 + \left(\frac{496,2s + 215,6}{s}\right)} \cdot \frac{\left(\frac{0,0005959s^2 + 0,0002624s + 0,005902}{s^3 + 0,3867s^2 + 9,916s + 1,946}\right)}{\left(\frac{0,0005959s^2 + 0,0002624s + 0,005902}{s^3 + 0,3867s^2 + 9,916s + 1,946}\right)} \quad (4)$$

$$\frac{POT(s)}{ACT(s)} = \frac{0,2957s^4 + 29,83s^3 + 28,85s^2 + 299,8s + 127,2}{s^5 + 100,7s^4 + 78,41s^3 + 1022s^2 + 494,4s + 127,2} \quad (5)$$

Posteriormente se aplica el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz sobre el polinomio característico de la ecuación (6).

$$s^5 + 100,7s^4 + 78,41s^3 + 1022s^2 + 494,4s + 127,2 = 0 \quad (6)$$

La condición necesaria se cumple porque todos los coeficientes a_n existen y son positivos. Por tanto, se procede a construir el arreglo de Routh.

s^5	1	78,41	494,4
s^4	100,2	1022	127,2
s^3	68,26	493,14	0
s^2	294,5	127	0
s^1	463,66	0	0
s^0	127,2		

El sistema es estable porque no hay cambios de signos en la primera columna del arreglo de Routh- Hurwitz.

3.3.1 Impactos de la nueva estrategia de control propuesta en los motores

Las inversiones en el SEN se centran en adoptar nuevas tecnologías de generación distribuida. En este sentido, se propone una estrategia de control que tribute a la eficiencia energética al reducir el consumo de energía durante el proceso de ajuste, pues el sistema debe pasar menos tiempo en estados transitorios. También deben reducirse las emisiones contaminantes y el desperdicio de combustible, minimizar las pérdidas por fricción o ineficiencias térmicas durante los períodos de inestabilidad, menor estrés en componentes (pistones, válvulas, ejes y cojinetes), reducir vibraciones mecánicas, y una combustión más eficiente.

4. CONCLUSIONES

- El modelo paramétrico que mejor caracteriza la dinámica del lazo de control de potencia es: $oe221$, con ajustes FIT en el rango de 90 %.
- Con el controlador PID se alcanzan los mejores resultados en la dinámica del lazo de control de potencia en función de la posición del actuador ($M_p = 9,31 \%$, $t_s = 14,5 \text{ s}$, $e_{ss} = 0$).
- El lazo de control de potencia resultó estable mediante el criterio de Routh-Hurwitz.
- La estrategia de control propuesta no solo mejora el rendimiento dinámico del sistema, sino que tiene un impacto positivo en la eficiencia energética, la durabilidad de los componentes mecánicos y la calidad general del control.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Guilarte, "Cálculo verificativo del sistema de enfriamiento del aceite de los motores MAN 18V48/60B de la Central Diésel Eléctrica Moa," tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica, ISMM, Moa, Cuba, 2016.
- [2] N. Farouk, L. Sheng y L. Said, "Speed control system on marine diesel engine based on a self-tuning fuzzy PID controller," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and*

- Technology*, vol. 4, n° 6, pp. 686-690, March 2012.
- [3] G. Alegret, X. Llamas, M. Vejlgard-Laursen y L. Eriksson, "Modeling of a large marine two-stroke diesel engine with cylinder bypass valve and EGR system," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, n° 16, pp. 273-278, November 2015.
- [4] M. Altosole, G. Benvenuto, U. Campora, M. Laviola y R. Zaccone, "Simulation and performance comparison between diesel and natural gas engines for marine applications," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 231, n° 2, pp. 690-704, May 2017.
- [5] X. Llamas y L. Eriksson, "Control-oriented modeling of two-stroke diesel engines with exhaust gas recirculation for marine applications," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 233, n° 2, pp. 551-574, May 2018.
- [6] J. Yin, T. Su, Z. Guan, Q. Chu, C. Meng, L. Jia, J. Wang y Y. Zhang, "Modeling and validation of a diesel engine with turbocharger for hardware-in-the-loop applications," *Energies*, vol. 10, n° 5, p. 685, May 2017.
- [7] P. Shah, R. Sekhar y P. Singh, «Predictive modeling of a bio-fuelled diesel engine using system identification approach,» in *6th international conference on renewable energy: Generation and applications (icrega)*, Al Ain, United Arab Emirates, 2021, p. 95-100.