

# Estimación de estado en la Central Termogas Machala utilizando Machine Learning

## Condition estimation at the Termogas Machala power plant using Machine Learning

Néstor Xavier Cruz-Carrillo<sup>1</sup>; Carlos Iván Quinatoa-Caiza<sup>2</sup> ; Jefferson Alberto Porras-Reyes<sup>3</sup> ; Hendry Mauricio Jiménez-Bautista<sup>4</sup>; Nicolyn Damari Rivera-Hidalgo<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador, nestor.cruz.2@utc.edu.ec

<sup>2</sup>Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador, carlos.quinatoa7864@utc.edu.ec

<sup>3</sup>Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador, jefferson.porras0449@utc.edu.ec

<sup>4</sup>Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, hendry.jimenez@epn.edu.ec

<sup>5</sup>Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, nicolyn.rivera@epn.edu.ec

**Autor de correspondencia:** Néstor Xavier Cruz-Carrillo. nestor.cruz2@utc.edu.ec

Fecha de recepción: 9 de marzo de 2023 Fecha de aceptación: 9 de julio de 2023

**Resumen**– En el presente trabajo de titulación se analizó el estado de la Central Termogas Machala, la problemática del proyecto es garantizar grandes retos para conseguir una continuidad; garantizar el abastecimiento de energía eléctrica de forma eficiente y aprovechamiento de los recursos naturales minimizando el impacto ambiental, la central termogas Machala trabaja con ciclo combinado, cuenta con 8 unidades generadoras que corresponden a Machala I y Machala II y la potencia total es 187 MW. Con base en la programación en lenguaje Python, utilizando la librería de Pyomo para el proceso de optimización, esta permitió analizar las variables de costos de combustible, potencia y energía eléctrica de la central, la función objetivo corresponde a minimizar los costos de generación de energía eléctrica y las restricciones están asociadas a costos de arranque, parada y el balance de potencia. Por otra parte, para la resolución del problema se usó GNU Linear Programming Kit (GLPK), debido a que el tipo de programación propuesta es entero lineal mixta; a través del análisis realizados se pudo observar qué generadores térmicos pueden operar al mismo tiempo, formar planes de mantenimiento para la salida de generadores de forma programada y cuál es la energía total producida.

**Palabras clave:** Central termogas, ciclo combinado, Pyomo, Python, optimización.

**Abstract**– In the present titling work, the state of the Machala Termogas Power Plant was analyzed, the problem of the project is to guarantee great challenges to achieve continuity and guarantee the supply of electrical energy efficiently and use of natural resources and minimizing environmental impact, The Machala thermogas plant works with a combined cycle, it has 8 generating units that correspond to Machala I and Machala II and the total power is 187 MW. Based on the programming in Python language using the Pyomo library for the optimization process, this allowed to analyze the variables of costs of fuel, power and electrical energy of the plant, the objective function corresponds to minimizing the costs of electrical energy generation and the restrictions are associated with start-up, stop and power balance costs. On the other hand, to solve the problem, the GNU Linear Programming Kit (GLPK) is used, because the type of programming proposed is mixed linear integer; Through the analysis carried out, it was possible to observe which thermal generators can operate at the same time, form maintenance plans for the output of generators on a scheduled basis and what is the total energy produced.

**Keywords:** Combined cycle, Pyomo, Python, optimization, thermogas plant.

**Citar este artículo como:** Cruz-Carrillo, N. X., Quinatoa-Caiza, C. I., Porras-Reyes, J. A., Jiménez-Bautista, H. M., & Rivera-Hidalgo, N. D. (2023). Estimación de estado en la Central Termogas Machala utilizando Machine Learning, *ITECKNE*, vol. 20, (2) 2023. pp. 85 - 91 DOI: <https://doi.org/10.15332/iteckne.v20i2.2983>

## 1. INTRODUCCIÓN

La problemática del proyecto es garantizar grandes retos para conseguir continuidad y garantizar el abastecimiento de energía eléctrica de forma eficiente y aprovechamiento de los recursos naturales, minimizando el impacto ambiental, la Central Termogas Machala trabaja con ciclo combinado y la potencia total es 187 MW, en la actualidad el consumo eléctrico se incrementa de forma constante, la falta de gas en la Central Termogas Machala conlleva no abastecer la demanda máxima de generación de energía [1].

Por otro lado, en la actualidad el servicio eléctrico ecuatoriano de las centrales generadoras de electricidad ha disminuido por la falta de generación, falta de mantenimiento y planes de mejoras en las instalaciones. La Central Termogas Machala de ciclo combinado tiene la capacidad de transformar la energía calorífica de los gases de combustible a energía eléctrica, con este nombre se conoce a las centrales que utilizan gases naturales como combustible y para generar electricidad emplean turbinas a gas y de vapor [1].

El objetivo de este estudio es comprender la estimación del estado de la Central Termogas Machala utilizando Machine Learning, mediante los cálculos necesarios se pueden obtener los patrones de comportamiento y algoritmos, considerando la librería PYOMO de Python para la solución de problemas de optimización.

Con esta investigación se busca determinar mediante un análisis la estimación de estado para mejorar el funcionamiento de la Central Termogas Machala mediante la utilización de Machine Learning, para lo cual se pretende: definir la estimación de estado en la Central Termogas Machala; ejecutar el levantamiento de datos de la Central Termogas Machala; realizar una planificación de mantenimiento y pruebas de operación de la Central Termogas Machala de ciclo combinado, a través de un proceso de optimización y contribuir con el aprendizaje de algoritmos para la estimación de estado en la Central.

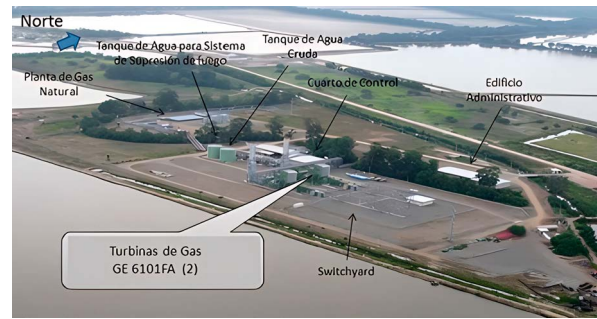
## 2. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

La orden de la construcción y operación de la Central Termoelectrónica Machala dio inicio el 2 de julio de 1996, cuando la empresa Energy Development Corporation EDC firma un contrato con el Estado Ecuatoriano para la explotación del gas natural en el Golfo de Guayaquil [2].

### 2.1 Ubicación geográfica

La central de generación Termogas Machala se encuentra ubicada en el sector Bajo Alto parroquia Tendales Cantón el Guabo Provincia del Oro como se indica en la Fig. 1.

Fig.1. PLANTA DE GENERACIÓN TERMOGAS MACHALA



Fuente: Los autores.

### 2.2 Características de la Central Termogas Machala

La central eléctrica Termogas Machala funciona con el gas que se extrae del Golfo de Guayaquil. La planta hasta inicios del 2011 generaba más de 130 MW de potencia que los entrega al Sistema Nacional Interconectado (SNI) y luego se distribuye a los consumidores finales [3].

La Central Termogas Machala dispone de dos áreas denominadas Machala 1 y Machala 2, como se puede observar en la figura 1, se encuentran ubicadas las unidades generadoras de gas natural 6FA, con 6 unidades generadoras de gas TM2500 [1]. La Central Termogas Machala tiene la potencia efectiva que se describe en la Tabla I:

TABLA I.  
POTENCIA EFECTIVA CENTRAL TERMOGAS MACHALA

Central	Unidad	Potencia Efectiva [MW]
Machala I	6FA1	64.6
	6FA2	64.6
Machala II	TM1	20
	TM2	20
	TM3	20
	TM4	20
	TM5	20
	TM6	19
TOTAL		248.2

Fuente: Los autores.

### 2.3 Desarrollo del modelo de optimización

Para la resolución del problema de optimización planteado se utiliza el algoritmo de Benders, este algoritmo permite la resolución de problemas no lineales enteros mixtos.

Se hace uso de la herramienta GLPK, kit de la programación lineal de GNU, programa de código abierto para la resolución de problemas de optimización lineal de gran escala y problemas de programación entero lineal mixta [8] [9].

### 2.3.1 Problema maestro

Se plantea a través de la ecuación (1).

$$\text{Minimizar}_{x,\theta} f_1(x) + \theta$$

Sujeto a:

$$p(x) \leq 0 \quad (1)$$

$$\theta \geq f_2(Y^{(\nu-1)}) + \sum_{k=1}^n \gamma_k^{(\nu-1)} (x_k - x_k^{(\nu-1)})$$

$$\theta \geq 0$$

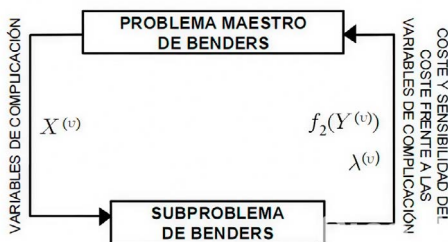
Donde:

- $\theta$  Variable continua y positiva.
- $\nu$  índice de iteración del algoritmo.
- $(\nu - 1)_k$  Valor constante que toma la variable  $x$  en la interacción  $\nu-1$ .
- $(\nu - 1)_k$  Sensibilidades de coste asociadas a las restricciones que fijan el valor de las variables de complicación.
- $(\nu - 1)$  Valor constante que toma la variable al resolver el subproblema de Benders en la iteración  $\nu-1$ .

Al resolver el problema maestro se obtiene como resultado el valor de las variables de complicación  $(\nu)$ , y el valor del coste aproximado al subproblema  $\theta^{(\nu)}$ . En la resolución del problema maestro se adiciona el proceso de Cortes de Bender que son restricciones que reconstruyen iterativamente la función del problema original [8].

La resolución del problema maestro y el subproblema de Benders requieren de un proceso de acoplamiento a lo que se le denomina intercambio de información, la información obtenida por el subproblema se envía al problema maestro de Benders para obtener una mejor aproximación de la función original, como se muestra en la imagen de la Fig. 2.

Fig. 2. PROCESO ACOPLAMIENTO DE INTERCAMBIO DE INFORMACIÓN DE LA DESCOMPOSICIÓN DE BENDERS

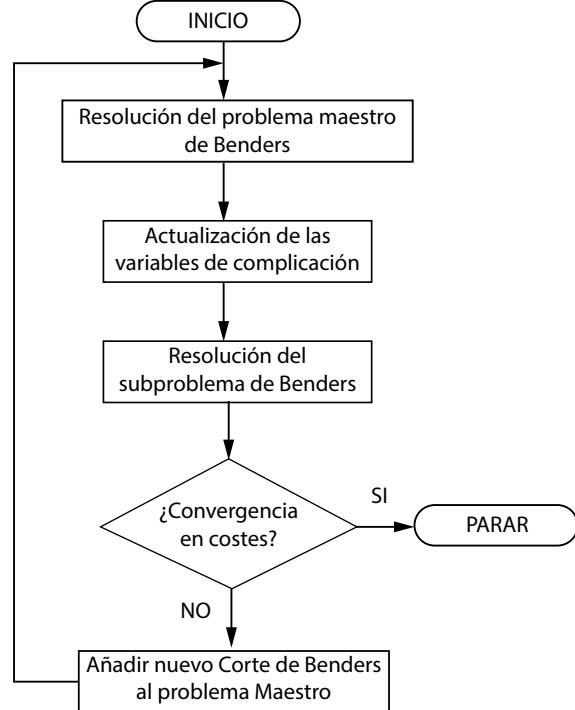


Fuente: Autores.

Fin de las iteraciones

El criterio de parada del proceso iterativo termina cuando las cotas inferior y superior convergen en un punto o están próximas a los límites. Las cotas del problema original se actualizan con la solución del problema maestro y subproblema de Benders en cada iteración. El proceso en el algoritmo que se muestra en el flujograma de la Fig. 3.

Fig. 3. FLUJOGRAMA DESCOMPOSICIÓN DE BENDERS



Fuente: Autores.

### 2.3.2 Función Objetivo

La función objetivo (J) se representa en la ecuación (2).

$$J = \sum_{t=1}^T C_T \times P_g^t + C_g^A \times Y_g^t + C_g^P \times W_g^t \quad (2)$$

Donde:

- $C_T$  Costos totales de producción.
- $P_g^t$  Potencia generada por la g-ésima unidad térmica en un tiempo t.
- $C_g^A$  Costo fijo de arranque la g-ésima unidad térmica.
- $Y_g^t$  Variable binaria asociada al acople de la g-ésima unidad térmica (1= arranca, 0= no arranca).
- $C_g^P$  Costo fijo de parada la g-ésima unidad térmica.
- $W_g^t$  Variable binaria asociada a la parada de la g-ésima unidad térmica (1= está parada, 0= no está parada).

### 2.3.3 Restricciones

Las restricciones están asociadas a un balance de potencia relacionado con el límite de potencia mínima y máxima de los generadores termoeléctricos [4], además se agrega las restricciones por los costos de arranque y apagado por parte de los generadores, como se describe en las ecuaciones (3) y (4).

$$E_g^{min} \leq E_g^t \leq E_g^{max} \quad (3)$$

Costos:

$$C_{on\_d} \times Y_g^t \geq C_{on\_d}(Y_g^t - Y_g^{t-1})$$

$$C_{off\_d} \times W_g^t \geq C_{off\_d}(W_g^t - W_g^{t-1}) \quad (4)$$

Donde:

$C_{on\_d}$  Costo de arranque de la unidad generadora.

$C_{off\_d}$  Costo de parada de la unidad generadora.

$Y_g^t$  Variable binaria asociada al acople de la g-ésima unidad térmica (1= arranca, 0= no arranca).

$W_g^t$  Variable binaria asociada a la parada de la g-ésima unidad térmica (1= está parada, 0= no está parada).

De forma general con respecto a las restricciones lógicas de acoplamiento para cada generador térmico se debe considerar que:

Si la unidad térmica está acoplada en el periodo (t-1) y también acoplada en el periodo (t), la unidad ya estuvo operando en (t-1) [7].

- Si la unidad térmica está acoplada en el periodo (t-1) y desacoplada en el periodo (t), la unidad paró en (t) [7].
- Si la unidad térmica está desacoplada en el periodo (t-1) y acoplada en el periodo (t) entonces se ha efectuado el arranque en (t) [7].
- Si la unidad térmica está desacoplada en el periodo (t-1) y también desacoplada en el periodo (t) entonces no se ha efectuado el arranque [7].
- Para la programación se utilizan los datos expresados en las tablas de II a V.

TABLA II.  
DEMANDA REQUERIDA PERIODO 2015-2022

AÑO	DEMANDA [MW]
2015	800
2016	560
2017	780
2018	890
2019	450
2020	560
2021	630
2022	660

Fuente: Autores.

TABLA III.  
CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR KWH

AÑO/EQUIPO	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
6FA1	4894.55	4889.3	5362.7	5776.85	4161.13	4193.44	4097.86	2310.39
6FA2	1343.29	4692.4	4964.54	4976.93	3929.96	1490.87	1569.73	1725.51
TM1	1667.91	1475.6	1274.79	621.01	617.99	1064.75	17.6	0
TM2	1356.64	1639.63	1145.69	589.72	337.86	553.61	277.54	357.43
TM3	1613.96	892.42	884.73	976.86	400.1	571.88	141.83	1065.48
TM4	1363.04	1538.02	1266.58	844.65	415.38	450.55	725.99	800.39
TM5	1053.41	940.94	987.83	263.06	406.54	802.06	1232.92	744.46
TM6	0	536.63	260.63	38.5	45.59	214.01	9.93	69.15

Fuente: Autores.

TABLA IV.  
COSTO DE COMBUSTIBLE (CTVS/KWH)

AÑO/EQUIPO	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
6FA1	0.0355	0.0356	0.0353	0.0354	0.0354	0.0354	0.0357	0.0359
6FA2	0.0355	0.0356	0.0354	0.0355	0.0354	0.0354	0.0358	0.0000
TM1	0.0354	0.0354	0.0353	0.0354	0.0355	0.0354	0.0358	0.0360
TM2	0.0353	0.0351	0.0352	0.0355	0.0355	0.0354	0.0358	0.0360
TM3	0.0355	0.0354	0.0354	0.0356	0.0355	0.0354	0.0358	0.0360
TM4	0.0354	0.0352	0.0352	0.0354	0.0355	0.0354	0.0358	0.0360
TM5	0.0354	0.0354	0.0355	0.0355	0.0355	0.0354	0.0358	0.0360
TM6	0.0000	0.0357	0.0360	0.0358	0.0357	0.0357	0.0358	0.0364

Fuente: Autores.

TABLA V.  
ENERGÍA NETA [kWh]

AÑO/EQUIPO	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
6FA1	433279.7701	427093.428	440357.486	488657.18	518791.565	373367.267	371937.467	353363.759
6FA2	423102.5263	416881.796	413944.236	437756.828	423601.971	325645.266	127765.249	0
TM1	116452.215	124360.929	137677.276	117294.772	55594.8701	55099.1741	94424.8016	1527.73927
TM2	141854.3183	158781.925	154873.018	111942.123	54688.337	32153.8818	48659.9589	24353
TM3	84163.45277	126438.364	81491.3336	79474.252	84667.3063	35401.02	50720.6737	13038.4184
TM4	114269.4636	153224.101	143980.659	118878.266	75467.965	37558.7024	40089.3692	60928.7457
TM5	116394.3868	126964.984	86230.2578	94333.7723	22936.1118	37145.6809	67843.2518	100771.35
TM6	0	96792.5595	48149.9665	22075.1085	2993.16998	5.725097	18768.2382	6077.83474

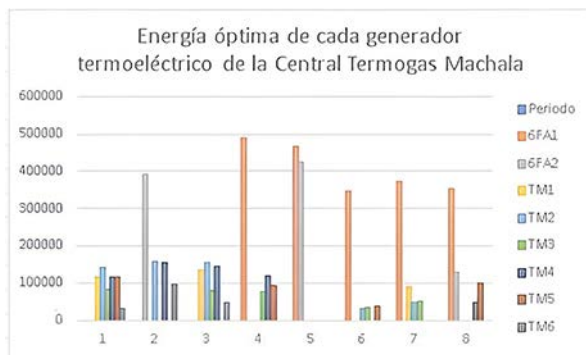
Fuente: Autores.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al realizar la programación entero lineal mixto, realizada en Python-Pyomo con las ecuaciones descritas en la sección 2, se obtuvieron los resultados descritos en la Tabla VI.

Para el abastecimiento óptimo de la demanda energética requerida por la central, no todos los generadores operarán al mismo tiempo, es por esta razón que de acuerdo con la demanda requerida los generadores se acoplarán, según la gráfica de la Fig. 4:

Fig. 4. ENERGÍA ÓPTIMA CENTRAL TERMOGAS MACHALA



Fuente: Autores.

TABLA VI.  
ENERGÍA ELÉCTRICA DE CADA GENERADOR TÉRMICO DE LA CENTRAL TERMOGAS MACHALA

AÑO/EQUIPO	ENERGÍA ÓPTIMA [kWh]							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
6FA1	0	0	0	488657.18	466398.03	345299.42	371937.47	353363.76
6FA2	0	392957.19	0	0	423601.97	0	0	128321.46
TM1	113940.22	0	133805.17	0	0	0	88681.9	0
TM2	141854.32	158781.92	154873.02	0	0	32153.88	48659.96	0
TM3	82611.31	0	79996.94	78130.78	0	35401.02	50720.67	0
TM4	114269.46	153224.1	143980.66	118878.27	0	0	0	47543.42
TM5	116394.39	0	0	94333.77	0	37145.68	0	100771.35
TM6	30930.3	95036.79	47344.21	0	0	0	0	0

Fuente: Autores.

- **Periodo 1:** Con un total de generación eléctrica de 600 MWh, se acoplan los generadores TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 y TM6, con una demanda de 119 MW.
- **Periodo 2:** Con un total de generación eléctrica de 800 MWh, se acoplan los generadores 6FA2, TM2, TM4 y TM6 con una demanda de 124 MW.
- **Periodo 3:** Con un total de generación eléctrica de 560 MWh, se acoplan los generadores TM1, TM2, TM3, TM4 y TM6, con una demanda de 99 MW.
- **Periodo 4:** Con un total de generación eléctrica de 780 MWh, se acoplan los generadores 6FA1, TM3, TM4 y TM5 con una demanda de 125 MW.
- **Periodo 5:** Con un total de generación eléctrica de 890 MWh, se acoplan los generadores 6FA1 y 6FA2, con una demanda de 130 MW.
- **Periodo 6:** Con un total de generación eléctrica de 450 MWh, se acoplan los generadores 6FA1, TM2, TM3 y TM5 con una demanda de 125 MW.
- **Periodo 7:** Con un total de generación eléctrica de 560 MWh, se acoplan los generadores 6FA1, TM1, TM2 y TM3, con una demanda de 125 MW.
- **Periodo 8:** Con un total de generación eléctrica de 630 MWh, se acoplan los generadores 6FA1, 6FA2, TM4 y TM5 con una demanda de 170 MW.

### 3.1 Comprobación

Se da paso a la comprobación de los resultados con el *software* de paga GAMS. En la imagen de la Fig. 5 se visualiza la información del problema y la del SOLVE; el número de variables analizadas son 129, el número de constantes 137 y una función objetivo.

Fig.5. INFORMACIÓN DEL PROBLEMA PLANTEADO

```
# -----
# Problem Information
# -----
Problem:
- Name: unknown
  Lower bound: 242251.172551
  Upper bound: 242251.172551
  Number of objectives: 1
  Number of constraints: 137
  Number of variables: 129
  Number of nonzeros: 319
  Sense: minimize
# -----
# Solver Information
# -----
Solver:
- Status: ok
  Termination condition: optimal
  Statistics:
    Branch and bound:
      Number of bounded subproblems: 5427
      Number of created subproblems: 5427
  Error rc: 0
  Time: 0.40218424797058105
# -----
```

Fuente: Autores.

En la imagen de la Fig. 6 se muestran los resultados obtenidos del proceso de optimización, los resultados al ser comparados con la Tabla VI son exactamente iguales.

Fig.6. RESULTADOS OBTENIDOS

```
# -----
# Solution Information
# -----
Solution:
- number of solutions: 1
  number of solutions displayed: 1
- Gap: 0.0
  Status: optimal
  Message: None
  Objective:
    obj:
      Value: 242251.17255100008
  Variable:
    E[G1,T4]:
      Value: 488657.18
    E[G1,T5]:
      Value: 466398.03
    E[G1,T6]:
      Value: 345299.42
    E[G1,T7]:
      Value: 371937.47
    E[G1,T8]:
      Value: 353363.76
    E[G2,T2]:
      Value: 392957.19
    E[G2,T5]:
      Value: 423601.97
    E[G2,T8]:
      Value: 128321.46
    E[G3,T1]:
      Value: 113940.22
    E[G3,T3]:
      Value: 133805.17
```

Fuente: Autores.

### 4. CONCLUSIONES

La Central Termogas Machala actualmente produce una energía eléctrica de 630 MWh con la operación de los generadores térmicos 6FA1, 6FA2, TM4 y TM5, el generador TM6 en el 2022 se encuentra fuera de servicio y según la investigación realizada entrará en vigor en el 2024 con el proyecto de expansión.

La optimización se realizó conforme a los costos del combustible, y la energía generada dio como resultado una energía promedio óptima anual de 242,25 MWh, lo que determina un adecuado funcionamiento de la Central Termogas, con ciclo combinado, cabe recalcar que el costo de combustible promedio es de 0,036 ctvs/kWh.

Conforme a los resultados obtenidos, el mantenimiento y pruebas que se deben ejecutar será en función del acoplamiento y no de ciertos generadores térmicos, acorde a la demanda requerida, por ejemplo, en el periodo 6 se acoplan los generadores 6FA1, TM2, TM3 y TM5, los generadores térmicos 6FA2, TM1, TM4 y TM6 en ese periodo deben someterse a pruebas y ejecutarse el respectivo mantenimiento.

Con el uso del lenguaje de programación Python con la librería Pyomo se pudo implementar un algoritmo para determinar el acoplamiento de generadores térmicos conforme al despacho económico requerido y el costo del combustible.

Se pueden realizar estudios para implementar un algoritmo que determine una proyección de despacho económico de la Central Termogas Machala y adaptarlo al código desarrollado en este trabajo de investigación.

Para estudios posteriores, tener en cuenta, para el despacho, más tipos de generación de energía eléctrica, de forma tal que se pueda desarrollar un *software* que permita obtener respuestas cercanas a las realidades que abarquen una cantidad mayor de datos y que se puedan comparar los resultados obtenidos con un *software* de licencia gratuita.

Con respecto al lenguaje de programación utilizado para estudios posteriores se puede mejorar el código para leer datos directamente desde la hoja de Excel sin entrada manual. Y de igual manera brindar la respuesta en una hoja de Excel en un formato diseñado para la comodidad del usuario.

### 5. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca, «Proyecto Central Termogas Machala», 2015. [En línea]. Available: [https://ecuadoropenforbusiness.com/proyectos/proyectos\\_publicos/Energia/ENERGIA%20Termogas%20Machala.pdf](https://ecuadoropenforbusiness.com/proyectos/proyectos_publicos/Energia/ENERGIA%20Termogas%20Machala.pdf). [Último acceso: 7 diciembre 2022].
- [2] W. G. Galarza Mora, «Evaluación de los impactos al recurso agua derivados de la operación de una Central Termoeléctrica "TERMOGAS MACHALA"», Universidad de Guayaquil, Guayaquil, 2017.

- [3] F. F. Calle Morocho, «Determinación de los beneficios económicos y ambientales por la Conservación de la Central Termogas Machala I a una central con ciclo combinado», Universidad de Cuenca, Cuenca, 2018.
- [4] N. Connor, «Ciclo Combinado», Thermal Engineering, 09 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-turbina-de-vapor-descripcion-y-caracteristicas-definicion/>. [Último acceso: 6 diciembre 2022].
- [5] Instituto Catalán de Energía, «La energía: Ciclo combinado», Gencat, 2018. [En línea]. Available: <https://icaen.gencat.cat/es/energia/formes/electricitat/tecnologies/combinat/#:~:text=El%20ciclo%20combinado%20es%20una,grandes%20centrales%20productoras%20de%20electricidad.> [Último acceso: 7 diciembre 2022].
- [6] C. A. Izaguirre Casquete, «Análisis de un sistema de control distribuido para generación eléctrica con motores de combustión interna en una central termoeléctrica», Universidad Católica de Guayaquil, Guayaquil, 2015.
- [7] F. A. Gaviria Cataño y J. C. Gómez Leal, «Metodología de optimización para microrredes eléctricas en zonas no interconectadas», Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2018.
- [8] D. Saborido del Catillo-Luna, «Desarrollo de aplicación en Python para simulación y análisis del mercado eléctrico», Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.
- [9] R. A. Constante Moya, «Desarrollo de una herramienta computacional para la planificación operativa de corto plazo de sistemas eléctricos de Potencia en base algoritmo LOBO GRIS», Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022.
- [10] M. J. Moscoso Vásconez, «Herramienta computacional, en lenguaje Python para la solución del problema de despacho hidrotérmico de corto plazo considerando la red eléctrica con un flujo óptimo de potencia de corriente continua y el efecto de las pérdidas», Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022.
- [11] A. Makhorin, «GLPK (GNU Linear Programming Kit)» 2021. [En línea]. Available: <https://www.gnu.org/software/glpk/#introduction>. [Último acceso: 12 marzo 2023].
- [12] C. Troncoso y R. Torres, «SEEDS:Herramienta Educativa para Estudios de Coordinación Hidrotérmica», IEEE, Santiago, 2018.
- [13] H. Valencia, «Modelo de programación de la operación de un sistema hidrotérmico con flujo óptimo de potencia utilizando herramientas convencionales de optimización», Universidad de El Salvador, Universitaria, 2018.
- [14] S. Pérez, «Optimización del despacho hidrotérmico en el corto plazo basado en el modelo programación lineal entero mixto», Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2015.
- [15] Pyomo, «Flexible Modeling of Optimization Problems in Python», 2018. [En línea]. Available: <https://www.pyomo.org/about>.
- [16] R. Python, «Recursos Python», [En línea]. Available: <https://recursospython.com/guias-y-manuales/convertir-qt designer-a-codigo-python/>.