



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ELÉCTRICA**

**Análisis de la eficiencia en calderas pirotubulares utilizando  
un algoritmo genético y aprendizaje por refuerzo**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

Ingeniero Mecánico Electricista

**AUTORES:**

De La Cruz Otiniano, Dario Daniel ([orcid.org/000-0003-2440-6307](https://orcid.org/000-0003-2440-6307))

Pizan Tarazona, Edwin Alain ([orcid.org/0000-0002-0887-6475](https://orcid.org/0000-0002-0887-6475))

**ASESORA:**

Mg. Serrepe Ranno, Miriam Marcela ([orcid.org/0000-0001-9342-1717](https://orcid.org/0000-0001-9342-1717))

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Generación, Transmisión y Distribución

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

TRUJILLO– PERÚ

2023

## **Dedicatoria**

Con mucho esfuerzo y ganas de seguir adelante va dedicada, en primer lugar, a Dios y a mis padres Santos Santiago De La Cruz Sare y Fedelina Benigna Otiniano Laureano que están siempre en cada instante de mi vida apoyándome con sus consejos y amor hacia mí.

Darío

En primer lugar, agradecer a Dios por haberme guiado mí camino, brindarme la salud y las fuerzas para salir adelante; a mis padres, esposa e hija por el apoyo moral e incondicional y por la confianza que depositaron en mi durante nuestra formación profesional en la carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

Edwin

## **Agradecimiento**

Mi más sincero agradecimiento a la Universidad César Vallejo por brindarnos la oportunidad de seguir con nuestros estudios superiores, con los contribuyeron a realización de mi tesis. Gracias a nuestros padres, esposa e hija y hermanos que me han apoyado todo el tiempo, sin ustedes no lo hubiésemos podido lograr, ustedes son mi fortaleza, mi mayor alegría y mi vida entera. Quiero extender mi agradecimiento a la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, en especial a la Mg. Serrepe Ranno, Miriam Marcela, quien en todo momento nos aportó con sus conocimientos durante el proceso de realización de este trabajo de investigación.

Darío y Edwin

## Declaratoria de autenticidad del asesor



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

### Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, SERREPE RANNO MIRIAM MARCELA, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, asesor de Tesis titulada: "Análisis de la Eficiencia en Calderas Piro-tubulares Utilizando un Algoritmo Genético y Aprendizaje por Refuerzo", cuyos autores son PIZAN TARAZONA EDWIN ALAIN, DE LA CRUZ OTINIANO DARIO DANIEL, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 9.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TRUJILLO, 12 de Diciembre del 2023

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
SERREPE RANNO MIRIAM MARCELA DNI: 06437594 ORCID: 0000-0001-9342-1717	Firmado electrónicamente por: SRANNOMM el 14- 12-2023 09:43:23

Código documento Trilce: TRI - 0694068



## Declaratoria de originalidad de los autores



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

### Declaratoria de Originalidad de los Autores

Nosotros, PIZAN TARAZONA EDWIN ALAIN, DE LA CRUZ OTINIANO DARIO DANIEL estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Análisis de la Eficiencia en Calderas Piro-tubulares Utilizando un Algoritmo Genético y Aprendizaje por Refuerzo", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
EDWIN ALAIN PIZAN TARAZONA DNI: 41234859 ORCID: 0000-0002-0887-6475	Firmado electrónicamente por: EPIZANT el 12-12-2023 17:17:37
DARIO DANIEL DE LA CRUZ OTINIANO DNI: 46174746 ORCID: 0000000324406307	Firmado electrónicamente por: DARCRUZOT el 12-12-2023 17:01:14

Código documento Trilce: TRI - 0694069

## Índice de contenidos

Carátula.....	i
Dedicatoria .....	ii
Agradecimiento .....	iii
Declaratoria de autenticidad del asesor .....	iv
Declaratoria de originalidad de los autores.....	v
Índice de contenidos .....	vi
Índice de tablas .....	vii
Índice de figuras.....	viii
Resumen .....	ix
Abstract .....	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	5
III. METODOLOGÍA .....	8
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	8
3.2. Variables y operacionalización .....	9
3.3. Población, muestra, muestreo .....	9
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	10
3.5. Procedimientos .....	11
3.6. Método de análisis de datos .....	11
3.7. Aspectos éticos .....	11
IV. RESULTADOS.....	12
V. DISCUSIÓN .....	21
VI. CONCLUSIONES .....	23
VII. RECOMENDACIONES.....	24
BIBLIOGRAFIA.....	25
ANEXOS .....	30

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Datos de funcionamiento promedio de la caldera .....	12
<b>Tabla 2.</b> Parámetros de flujo por semana .....	13
<b>Tabla 3.</b> Datos de combustible para la caldera.....	14
<b>Tabla 4.</b> Eficiencia de la caldera.....	15
<b>Tabla 5.</b> Seudocódigo Aprendizaje de refuerzo y algoritmo genético .....	17
<b>Tabla 6.</b> Presupuesto del modelo.....	20

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema de diseño de investigación .....	8
<b>Figura 2.</b> Diagrama de Flujo de Algoritmo .....	16
<b>Figura 3.</b> Proyección de la eficiencia por meses .....	18
<b>Figura 4.</b> Eficiencia de la caldera proyectada por años .....	19



## Resumen

La presente investigación cuyo título es Análisis de la eficiencia en calderas pirotubulares utilizando un algoritmo genético y aprendizaje por refuerzo cuya finalidad fue determinar la eficiencia de las calderas pirotubulares utilizando un algoritmo genético

– aprendizaje por refuerzo, La población fueron las seis calderas pirotubulares de la empresa agroindustrial, sin embargo la muestra trabajado solo fue una de ellas.

El procedimiento consistió en la toma de datos de la caldera para que sirva como base para el desarrollo del algoritmo que servirá como modelo predictivo.

La investigación concluyó con la determinación de los cálculos de eficiencia térmica de la caldera con un total del 27% de eficiencia que es un valor bajo para el análisis de eficiencia.

**Palabras Claves:** Algoritmo genético, aprendizaje por refuerzo, caldero, eficiencia térmica.

## **Abstract**

The present research whose title is Analysis of the efficiency in fire tube boilers using a genetic algorithm and reinforcement learning whose purpose was to determine the efficiency of the tubular boilers using a genetic algorithm - reinforcement learning. The population was the six fire tube boilers of the company agroindustrial, however the sample worked was only one of them.

The procedure consisted of collecting data from the boiler to serve as a basis for the development of the algorithm that will serve as a predictive model.

The investigation concluded with the determination of the thermal efficiency calculations of the boiler with a total of 27% efficiency, which is a low value for the efficiency analysis.

**Keywords:** Boiler, genetic algorithm, **reinforcement learning**, thermal efficiency.

## I. INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales generan una cantidad significativa de calor residual que podría reingresar al proceso y establecer una valiosa fuente de energía para la continuidad de los procesos como lo indica (Mihelić-Bogdanić y Špelić, 2022). Esta recuperación de calor es lo que significa alcanzar la optimización energética, lograr la minimización de los costos de producción y el evidente impacto en la contaminación ambiental.

Por su parte Rusovs *et al.*, (2023) determinó que la calefacción de gas natural en su proceso quema al gas natural y tienen que expulsar gases de combustión calientes. En cuanto a la temperatura de escape para gases que se generan en la combustión en calderas de gas oscila entre los 70°C a 120°C de los sistemas combinados de refrigeración, calefacción y energía y está en el intervalo de 120°C a 150°C; y, comparándolas con el de las centrales eléctricas de gas natural, la temperatura está entre los 90°C a 130°C.

La mayoría de los cambios climáticos no son solo el resultado de la actividad humana, sino también de modelos comerciales que dañan el medio ambiente. El intento de lograr un equilibrio ecológico es una respuesta al desafío que plantea esta situación. La combustión de combustibles líquidos genera emisiones a la atmósfera de contaminantes, uno de estos grupos son los óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre e hidrocarburo (Tic y Guziałowska-Tic, 2023).

Para Wilhelm (2023) manifestó que las calderas de gas natural tienen como proceso quemar gas en sus hornos, logrando obtener altas cantidades de vapor de agua y que se manifiesta por su alto grado de calor latente y de elementos tóxicos que están presentes en los gases de combustión, que por lo general van liberados de manera directa al ambiente con temperaturas de escape mayores a los 150°C, lo que ya implica una severa contaminación ambiental.

Según Madejski y Żymełka (2020) las empresas tienen una debilidad al no recopilar información que se relaciona con la cantidad de combustible consumido, tampoco sobre la generación de vapor y es evidente que estas variables no se midan

oportunamente, debido a que se le da importancia a la forma como se debe calcular la eficiencia térmica que se relaciona con la cantidad de masa de combustible.

Los Generadores de vapor son considerados equipos específicos para el almacenamiento de un fluido de trabajo a altas presiones. Se explica que estos equipos emplean una fuente de calor para lograr la conversión de agua en fase líquida en la fase de vapor de agua. Este mecanismo es de gran utilidad en diversas industrias que requieren de los sistemas de energía geotérmica, otros que requieren de los sistemas de energía solar y en otra cantidad de industrias que requieren de las plantas de energía nuclear (Bahmanyar, 2019). La combustión es un proceso en la que interviene el oxígeno y el combustible necesarios para proporcionar de energía al caldero que generará el vapor. La reacción química a la que se somete es llamada combustión. El proceso de combustión tiene la característica que el combustible al entrar en contacto con el oxidante se genera una reacción química muy rápida y se genera la liberación de calor llamada exotérmica (Yuan, 2023).

La optimización y el cálculo de eficiencias son dos tareas cruciales en diversos campos, desde la ingeniería y la gestión de recursos hasta la inteligencia artificial y la toma de decisiones. Dos enfoques poderosos para abordar estas tareas son los algoritmos genéticos y el aprendizaje por refuerzo. Estas técnicas, que a menudo se utilizan de manera conjunta, permiten encontrar soluciones óptimas y aprender estrategias efectivas para mejorar la eficiencia en una variedad de contextos (Steklain, Adames y Ganacim 2023).

Los algoritmos genéticos son una técnica de optimización basada en la selección natural y la evolución biológica. A través de un proceso iterativo de selección, cruce y mutación, los algoritmos genéticos pueden encontrar soluciones óptimas o aproximadas a problemas complejos. Estos algoritmos son especialmente efectivos cuando se enfrentan a problemas de alta dimensionalidad o cuando no se dispone de una fórmula matemática precisa para determinar la solución óptima (Sun, Silvestrov y Bakulin 2022).

Por otro lado, el aprendizaje por refuerzo es un enfoque que se inspira en la psicología conductual y se centra en aprender a través de la interacción con un entorno. Los agentes de aprendizaje de refuerzo toman decisiones secuenciales y

reciben retroalimentación en forma de recompensas o castigos, lo que les permite aprender estrategias óptimas para maximizar las recompensas a lo largo del tiempo. Este enfoque se ha aplicado en una amplia gama de problemas de toma de decisiones, desde juegos de mesa hasta robótica y gestión de recursos (Villa Acuna y Sun 2020).

En el cálculo de eficiencias, la combinación de algoritmos genéticos y aprendizaje por refuerzo se convierte en una potente herramienta. Los algoritmos genéticos pueden utilizarse para buscar combinaciones óptimas de variables o parámetros en un sistema, mientras que el aprendizaje por refuerzo permite adaptar las estrategias en tiempo real, teniendo en cuenta la retroalimentación del entorno. Este enfoque tiene aplicaciones en la gestión de recursos naturales, la optimización de procesos industriales, la planificación de rutas, la administración de carteras financieras y muchas otras áreas (Salah *et al.*, 2022).

La realidad problemática expuesta conlleva a plantear la siguiente *formulación del problema*: ¿Cómo determinar la eficiencia de calderas pirotubulares utilizando un algoritmo genético y aprendizaje por refuerzo?; y las siguientes preguntas específicas: ¿Cuáles son los parámetros térmicos en el funcionamiento de la caldera? ¿Cómo implementar algoritmo genético y aprendizaje por refuerzo para analizar la eficiencia de las calderas pirotubulares? ¿Cuál es la eficiencia de los calderos pirotubulares de vapor con el algoritmo implementado? ¿Cuál es beneficio/costo del uso de este sistema de análisis?

La investigación justifica un análisis de eficiencia de calderas es fundamental para optimizar el uso de energía en diversas industrias y procesos. El uso de un algoritmo genético que combina técnicas con el aprendizaje por refuerzo con modelado teórico permite abordar este problema. Al integrar la teoría de ingeniería de calderas con el aprendizaje por refuerzo, podemos mejorar la precisión de los modelos, lo que resulta en un mejor control y optimización de las calderas (EPA 2021).

Con respecto a la justificación tecnológica, la tecnología de aprendizaje de refuerzo ha avanzado significativamente en los últimos años, lo que la hace más accesible y efectiva. La combinación de algoritmos de aprendizaje automático con sensores y sistemas de control en tiempo real permite un monitoreo y control más

preciso de las calderas. Esto no solo aumenta la eficiencia, sino que también reduce el desgaste y el costo de mantenimiento (Reuter *et al.*, 2020).

Justificación social, la eficiencia energética es un tema de gran relevancia social debido a su impacto en la sostenibilidad ambiental y en la reducción de costos operativos. Al mejorar la eficiencia de las calderas, se disminuye el consumo de combustibles fósiles y, por lo tanto, se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, esto puede traducirse en precios más bajos para los consumidores y en la creación de empleos en el sector de la eficiencia energética (IEA 2019).

Justificación económica, la optimización de la eficiencia de las calderas tiene un claro impacto económico positivo. Se reducen los costos de operación y mantenimiento, lo que aumenta la rentabilidad de las empresas. Además, al disminuir el consumo de energía, se reducen las facturas de servicios públicos y se aumenta la competitividad. La investigación en este ámbito tiene un alto potencial para generar un retorno de la inversión significativo (Kamal, Al-Ghamdi y Koc 2019).

Para dar respuesta a la problemática, se plantea el siguiente **objetivo general**: Determinar la eficiencia de las calderas pirotubulares utilizando un algoritmo genético – aprendizaje por refuerzo. Para lograr el desarrollo del objetivo general, se proyectan los siguientes **objetivos específicos**: Determinar los parámetros térmicos en el funcionamiento de la caldera, implementar un algoritmo genético y aprendizaje por refuerzo, evaluar la eficiencia de la caldera pirotubular con el análisis ejecutado y evaluar el beneficio / costo de nuestro análisis.

Para dar una respuesta a la formulación de problema, se plantea la siguiente **hipótesis**: La eficiencia de la caldera pirotubular se puede analizar a través de un algoritmo genético y aprendizaje por refuerzo.

## II. MARCO TEÓRICO

Las calderas pirotubulares se caracterizan por tener tubos que atraviesan la cámara de combustión, donde el calor es transferido al agua circundante para generar vapor. La eficiencia de estas calderas depende de diversos factores, incluyendo la temperatura de los gases de combustión, la transferencia de calor a través de los tubos y la combustión completa del combustible (Śladewski *et al.*, 2017).

Valencia *et al.*, (2022) en su investigación publicada en Ecuador, explicaron que en el mundo el consumo de energía eléctrica tiene una tendencia positiva del consumo y asegura que la subida de precios de los combustibles fósiles sobre las consecuencias en el medio ambiente ha orientado esfuerzos para desarrollar recursos energéticos alternativos. En consecuencia, el reemplazar los combustibles fósiles con alternativas de energía renovable lograrán una mejor eficiencia energética. Una de las energías renovables es la biomasa que se define como las plantas vivas y algunos desechos orgánicos que se generan por las plantas y los seres humanos, la biomasa está disponible y que a partir de ella se puede generar el calor y la electricidad y además tiene un bajo nivel de azufre que reduce la emisión por combustión

Según Proszak (2020), manifestó que para obtener una unidad de masa de vapor que no contiene gotas de agua, es decir vapor saturado seco saturado se suma a la cantidad de calor sensible para lograr la conversión del líquido a su punto de ebullición y a su calor latente de vaporización corresponde a la cantidad total de calor necesarios para cumplir el objetivo de llevar el líquido a vapor.

Según la investigación de Vera (2022) explicó que la aplicación de la transferencia de calor permite el enfriamiento de los gases de combustión y este proceso logra la disminución de las pérdidas de calor. El proceso de combustión mejora cuando el calor entregado al aire de la combustión ingresa al quemador; y este procedimiento permite la reducción del requerimiento de la cantidad de combustible en una proporción directa al calor transferido en el sistema del precalentador de aire. Como indicador en la

investigación se da a conocer que hay un ahorro en la relación del 1% por cada incremento de 20°F de temperatura en el aire de combustión.

Para Caetano (2019) la definición del poder calorífico consiste en determinar la relación de la cantidad de energía sobre la cantidad de masa o el volumen que se genera durante el desarrollo de la oxidación del gas (en el proceso de combustión). Las unidades que vinculan a esta variable tienen las siguientes unidades, energía por masa o volumen, KJ/Kg, KJ/m<sup>3</sup> o Kcal/Kg o Kcal/m<sup>3</sup>.

Por su parte la definición de caldera según la investigación de Wilhelm (2023) manifestó que se refiere al equipo que está construido para la producción de calor al quemar combustible, y que se establece como sistema que logra la producción de calor bajo el proceso de la quema de un combustible, el calor es transmitido a un fluido que por lo general es agua (fluido caloportador); dicho calor es transmitido al fluido en este caso generalmente es el agua (denominándolo caloportador).

En la investigación de Mamani *et al.*, (2021) que el biogás cuenta con un especial propósito en el tratamiento de residuos sólidos y la producción de energía y la aplicación más cercana es la calefacción en sistemas de producción. Se considera un excelente combustible que tiene aplicaciones en industrias diversas que permite el intercambio de energía para la producción de vapor (Korbag *et al.*, 2020).

Para Ramírez (2019) que en su trabajo de investigación analizó a los equipos de calderas pirotubulares, que indicó que su requerimiento en las industrias se sustenta por el requerimiento de vapor saturado. Son de alta capacidad para generar vapor entre un rango de 166.7 kg/s y con presiones altas que van de 1MPa a 2MPa. Las ventajas son el bajo costo, tienen una construcción particular y sencilla, ocupan espacios reducidos y además logran una eficiencia térmica dentro del 75% y si se aplican combustibles ecológicos mejoran las condiciones de operación y para la realización de un mantenimiento adecuado.

Caetano, (2019) en su investigación llegó a determinar que el biogás cumple un rol significativo para lograr la reducción de emisión de gases contaminantes de efecto invernadero. Asimismo, el biogás es usado como un combustible capaz de lograr la producción de calor y/o energía mecánica y también generar electricidad; todo esto



basados en fuentes renovables a partir de cultivos, residuos urbanos y agroindustriales.

Rubio *et al.*, (2020) define a las calderas pirotubulares de vapor como equipos muy importantes en toda organización industrial dado que su función consiste en añadirle energía a un fluido (generalmente es el agua), que posteriormente serán empleados en la generación de energía eléctrica mediante el empleo de turbinas, para obtener un sistema de refrigeración de alimentos, para la generación de vapor en la agroindustria. La caldera se dimensiona, según lo indicado por Mihelić (2022) aplicando el método directo, cuyo indicador se denomina la eficiencia energética. Una forma de medir el valor de la eficiencia de la caldera es dividir la producción de energía de una caldera sobre el valor total de energía dada a la caldera.

Descripción y partes de una caldera pirotubular:

Cuerpo de la caldera: es una estructura compuesta de material especial termo resistente apropiado para evitar que haya pérdida de energía al ambiente (Burton, 2021).

Tubo principal, conocido habitualmente como el “Hogar”, está constituido por el quemador que permite realizar la combustión del biocombustible y logra la producción de gases calientes, alcanzando altas temperaturas que bordean los 2000°C (Verdezoto, 2021).

Haz tubular. Cámara Trasera refrigerada: compuesta por la cámara posterior y que contiene el aire a una baja temperatura con la finalidad de obtener el vapor en movimiento. La caja delantera que es un espacio separado para el mantenimiento. La caja trasera es un espacio que se reserva para el mantenimiento. La Bancada que es básicamente la mesa que da la estabilidad a la caldera. Aislamiento es un aislante térmico que reduce la fuga de calor en el intercambio que podría ir al medio ambiente. Válvula de Vaciado: es un dispositivo que permite desalojar la biomasa que quedó como residuo de los procesos de combustión posterior al apagado del sistema (Leonel et al. 2019).

En la conversión del agua en estado líquido al estado de vapor, se trabaja con calor añadido que logran aumentar la temperatura del agua para que alcance el punto de ebullición correspondiente. Se sabe que el agua a la temperatura de 100°C alcanza su

punto de ebullición a la presión atmosférica, y el efecto es proporcional directo, aumenta la temperatura aumenta la presión. Asimismo, la temperatura de ebullición también se denomina temperatura de saturación del vapor que son propiedades para el agua (Lindsley, 1991).

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Tipo y diseño de investigación

##### **Tipo de investigación**

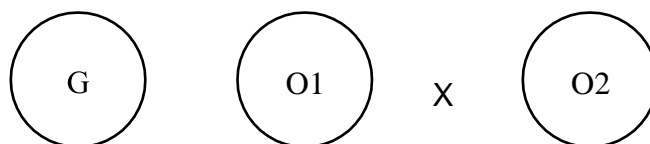
De acuerdo con lo indicado por Lozada, (2014) manifestó que una investigación aplicada logra la generación del conocimiento cuando se aplica directamente y en un periodo corto a la solución de un problema de la sociedad o empresarial. En este estudio se utilizarán las teorías algoritmos genéticos y aprendizaje por refuerzo, adicionando la teoría de la eficiencia energética de los calderos para evaluar el impacto del uso de combustibles ecológicos en los calderos pirotubulares de vapor.

##### **Diseño de investigación**

La definición dada por Hernández *et al.*, (2014) en la que manifestó que una investigación es de diseño experimental cuando las variables son sometidas a una manipulación. Este estudio es de diseño preexperimental, dado que se buscará determinar el impacto del combustible ecológico en el incremento de la eficiencia de calderos pirotubulares de vapor, sin tener un grupo de control. Se evaluará la situación de la variable dependiente antes y después de la intervención de la variable independiente.

##### **Figura 1**

Esquema de diseño de investigación



Donde:

G: Seis calderos pirotubulares de vapor

X: algoritmo genético y aprendizaje por refuerzo

O1: Eficiencia térmica (previo al análisis)

O2: Eficiencia térmica (posterior al análisis)

En el anexo 1 se observa la Matriz de operacionalización de variables

### **3.2. Variables y operacionalización**

#### **Variable independiente 1: Algoritmo genético y aprendizaje por refuerzo**

Un algoritmo genético y aprendizaje por refuerzo es aquel sistema donde los algoritmos genéticos se utilizan para optimizar políticas de comportamiento del agente de aprendizaje por refuerzo, como la estructura de las políticas, los hiperparámetros o la estrategia de exploración. Esta combinación permite aprovechar la capacidad de búsqueda y optimización de los algoritmos genéticos en la mejora de las estrategias de aprendizaje por refuerzo, lo que puede ser particularmente útil en aplicaciones de toma de decisiones y control en entornos complejos (Köksal Ahmed *et al.* 2022).

#### **Variable dependiente 2: Eficiencia de calderos pirotubulares**

Polupan *et al.*, (2021) indicaron que la eficiencia de caldero es la relación matemática entre la parte de calor absorbido por el fluido ya sea agua, vapor u otro sobre el calor liberado por el equipo térmico; y esa diferencia que existe entre el calor liberado y el calor absorbido está relacionada con la pérdida de calor que se da en el caldero.

### **3.3. Población, muestra, muestreo**

#### **Población:**

La población está conformada por cada uno de los elementos que poseen las mismas propiedades o características relacionadas con las variables de

investigación. En este caso la población está formada por seis calderas pirotubulares de la empresa agroindustrial

- **Criterios de inclusión:** para la investigación se trabajará con las calderas que se encuentran operativas o desarrollando actividad para la generación de vapor. Dichas calderas deben tener la capacidad de poder obtener su data de eficiencia de manera presencial para que sea optimizada a través del algoritmo genético.
- **Criterios de exclusión:** se excluyen las calderas que no han tenido mantenimiento dentro de los seis últimos meses (podrían fallar en la toma de datos).

**Muestra:** Se trabajará con una sola caldera.

### 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

#### **Técnicas de recolección de datos:**

Para la investigación se usará la Técnica de observación para la toma de datos de los parámetros de entrada del sistema híbrido, así como se usará también el análisis documental para verificar la eficiencia que se ha venido dando en las calderas.

#### **Instrumentos de recolección de datos:**

La guía de observación y la ficha de registro documental de investigación.

La variable sistema híbrido será alimentado a través de la data histórica de la eficiencia de las calderas pirotubulares los cuales serán registradas en la ficha de registro. Además, la guía de observación servirá para analizar cada una de las variaciones que se ha venido presentando en los valores de eficiencia que se tiene.

### **3.5. Procedimientos**

Para calcular la eficiencia de la caldera pirotubular, se iniciará con la recolección de un conjunto de datos históricos que incluya información relevante sobre la caldera, como la temperatura del agua de entrada, la presión, el flujo de combustible, la eficiencia real de la caldera y otros parámetros que puedan influir en la eficiencia. Después se procede a limpiar y preprocesar los datos para eliminar valores atípicos, manejar valores faltantes y normalizar las características. Como siguiente paso, se definió la arquitectura del algoritmo genético con aprendizaje por refuerzo, esto incluye la estructura de la red neuronal para el aprendizaje por refuerzo y los parámetros que se optimizarán mediante algoritmos genéticos. Finalmente, se implementa el sistema híbrido en un entorno real de monitoreo de calderas, considerando los datos que han sido obtenidos en la recolección inicial.

### **3.6. Método de análisis de datos**

De los datos obtenidos serán agrupados y analizados mediante la estadística descriptiva. Hernández *et al.*, (2014) manifestó que el análisis de dato puede ser analizados mediante el empleo de la estadística descriptiva, con ello permitirá dar respuesta a la pregunta de investigación y hacer un contraste con la hipótesis planteada. Los datos serán registrados en una hoja de cálculo de Excel y el algoritmo genético – aprendizaje por refuerzo se realizará en un software de programación.

### **3.7. Aspectos éticos**

Se han considerado el derecho de autor de todas las extracciones de párrafos o textos de autores consultados y con la normativa ISO se han citado a todos los autores. Así mismo, se tomó en cuenta el reglamento de la Universidad César Vallejo para considerar todos los artículos de referencia. Para el uso de la información se han considerado hacer el documento de autorización de consentimiento con el representante legal de la empresa (Anexo 03), trabajando

los datos con la intención profesional y usando los datos tal cual han sido recolectados, guardando el nivel de confidencialidad correspondiente.

#### IV. RESULTADOS

Para los parámetros térmicos de entrada del modelo propuesto que contempla iniciar con los datos de trabajo de la caldera, en la cual se emplean tanto los datos promedios de agua, combustible y vapor tal como se visualiza en la Tabla 1.

**Tabla 1** Datos de funcionamiento promedio de la caldera

ITEM	DATO DE CALDERA	VALOR
1	Presión	30 bar
2	Flujo de vapor	20 Tn/h
3	Temperatura de vapor	320 °C
4	Tipo de combustible	Bagazo de caña
5	Temperatura del combustible	32 °C
6	Temperatura del horno	725°C
7	Temperatura de ingreso de aire	130°C
8	Temperatura de ingreso de agua	95°C

En la Tabla 2, se obtuvieron los parámetros de trabajo del vapor, como son el flujo de vapor en el cual podemos ver el historial de cada uno de los valores, para este caso se realizó en análisis documental de cada uno de los meses de funcionamiento de la caldera por lo que se presentó el promedio del valor de manera semanal para una mejor visualización de los datos.

**Tabla 2** Parámetros de flujo por semana

<b>Semana</b>	<b>Flujo Másico (Ton/h)</b>
1	16.6383
2	16.1481
3	16.5596
4	16.9257
5	16.3465
6	16.3388
7	16.3777
8	16.664
9	16.9598
10	16.5481
11	16.1824
12	16.5195
13	16.0921
14	16.147
15	16.3555
16	16.0335
17	16.7809
18	16.7221
19	16.7033
20	16.6283
21	16.4601
22	16.6584
23	16.9024
24	16.5944
25	16.6436
<b>Promedio</b>	16.517204

Así mismo, en la Tabla 3 se tienen los valores de trabajo del combustible dentro del mismo periodo de tiempo que se tiene que en la tabla 1 y 2.

**Tabla 3** Datos de combustible para la caldera

<b>Semana</b>	<b>Consumo de bagazo (Ton/h)</b>	<b>Producción de vapor (Ton/h)</b>	<b>Índice de generación (Ton de vapro / Ton de bagazo)</b>
1	9.0657	16.6383	1.84
2	9.0041	16.0335	1.78
3	9.0045	16.0921	1.79
4	9.1489	16.147	1.76
5	9.1595	16.1481	1.76
6	9.1843	16.1824	1.76
7	9.2621	16.3388	1.76
8	9.2733	16.3465	1.76
9	9.3033	16.3555	1.76
10	9.3236	16.3777	1.76
11	9.3838	16.4601	1.75
12	9.408	16.5195	1.76
13	9.5012	16.5481	1.74
14	9.5024	16.5596	1.74
15	9.6002	16.5944	1.73
16	9.6197	16.6283	1.73
17	9.6798	16.6436	1.72
18	9.8121	16.6584	1.70
19	9.8178	16.664	1.70
20	9.8291	16.7033	1.70
21	9.8796	16.7221	1.69
22	9.9149	16.7809	1.69
23	9.9227	16.9024	1.70
24	9.9537	16.9257	1.70
25	9.9798	16.9598	1.70
<b>Promedio</b>	9.501364	16.517204	1.74

Con la finalidad de poseer una data histórica de la eficiencia se realizó el cálculo usando la fórmula directa con los datos obtenidos.



$$\eta = \frac{Q (H - h)}{q * GCV} \times 100$$

Donde:

Q = cantidad de vapor generado

H = entalpía del vapor

h = entalpía del agua

GCV = potencial calorífico del combustible

**Tabla 4** Eficiencia de la caldera

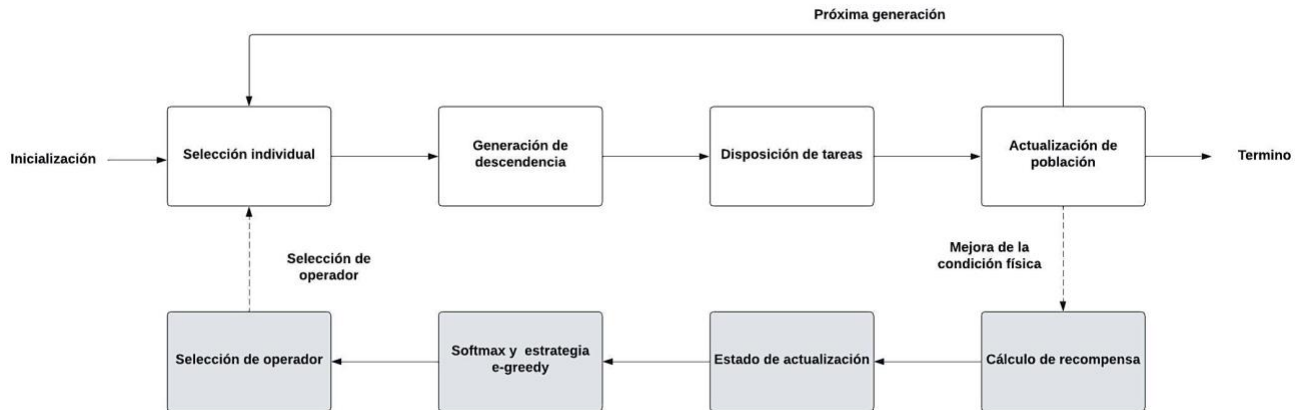
<b>Semana</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
1	28.49
2	27.64
3	27.74
4	27.39
5	27.36
6	27.35
7	27.38
8	27.36
9	27.29
10	27.26
11	27.23
12	27.25
13	27.03
14	27.05
15	26.83
16	26.83
17	26.69
18	26.35
19	26.35
20	26.38
21	26.27
22	26.27

<b>23</b>	26.44
<b>24</b>	26.39
<b>25</b>	26.38
<b>Promedio</b>	27.00

Como segundo objetivo se tuvo que implementar un algoritmo basado algoritmo genético con aprendizaje profundo, por lo que se considerará el diagrama de flujo presentado en la figura 2 (Song *et al.* 2023). En el diagrama se visualiza como se busca la mejora del individuo a través del algoritmo genético y el aprendizaje por refuerzo nos permite realizar la predicción de los valores de eficiencia.

**Figura 2**

Diagrama de Flujo de Algoritmo



Fuente: Song *et al.* (2023)

A partir de ello, se realizó un pseudocódigo basado en la literatura encontrada para ello se visualiza en la Tabla 5, que el proceso consiste en el ingreso de distintos valores de población y los parámetros de las redes neuronales.

**Tabla 5** Seudocódigo Aprendizaje por refuerzo y algoritmo genético

```

%Entrada: tamaño de la población  $N_p$ , función objetivo  $\alpha, \epsilon$ , operador
cruzado  $C_o$ , operador mutación  $M_o, L$  y parámetros de red neuronal  $T$ .

%Salida: Solución

1 %Inicializar los parámetros del algoritmo y la población;
2 Establecer  $t = 1, num\_eval = 0, local\_best = 0, count = 0, global\_best =$ 
 $0, global\_best\_individual = [], local\_best\_individual = []$ ;
3 Inicializar  $Q = table(C_o, M_o)$ ;
4 While  $num\_eval < MFE$  do
5     for  $p = 1$  a  $N_p$  do
6          $\rho(s_i, a_j) \leftarrow$  Usar estrategia  $softmax(Q_t(s_i, a_j), T)$ ;
7          $A_p^t \leftarrow$  Seleccione acción con  $Q - Learning(\epsilon, \rho(s_i, a_j, T))$ ;
8          $indi_p^{t-1} \leftarrow$  Selección de individuo en la ruleta  $(P_{t-1}, F_{t-1})$ ;
9          $indi_p^t \leftarrow$  Operación de evolución  $(indi_p^{t-1}, A_p^t)$  // Una
Combinación de cruce y operadores de mutación;
10         $S_p^t \leftarrow$  Generar un  $plan(indi_p^t, T, TW)$  // Usar selección de
ventana de tiempo de tarea Algoritmo;
11         $F_p^t \leftarrow$  Evaluación de aptitud física  $S_p^t$  por Eq.7
12         $R_t \leftarrow$  Calcule la recompensa  $(F_t, F_{t-1})$ ;
13         $Q_{t+1} \leftarrow$  Calcular valores de  $Q(S_t, A_t, R_t, \alpha, \gamma)$ ;
14         $t \leftarrow t + 1$ ;
15         $num\_eval \leftarrow num\_eval + 1$ ;
16         $local\_best \leftarrow$  Encuentre la aptitud máxima de la población actual  $(P_t)$ ;
17        if  $local\_best > global\_best$  then
18             $global\_best \leftarrow local\_best$ ;
19             $global\_best\_individual \leftarrow local\_best\_individual$ ;
20        else
21            if el conteo no es igual a  $Thre$ , then
22                //Retener individuos de élite

```

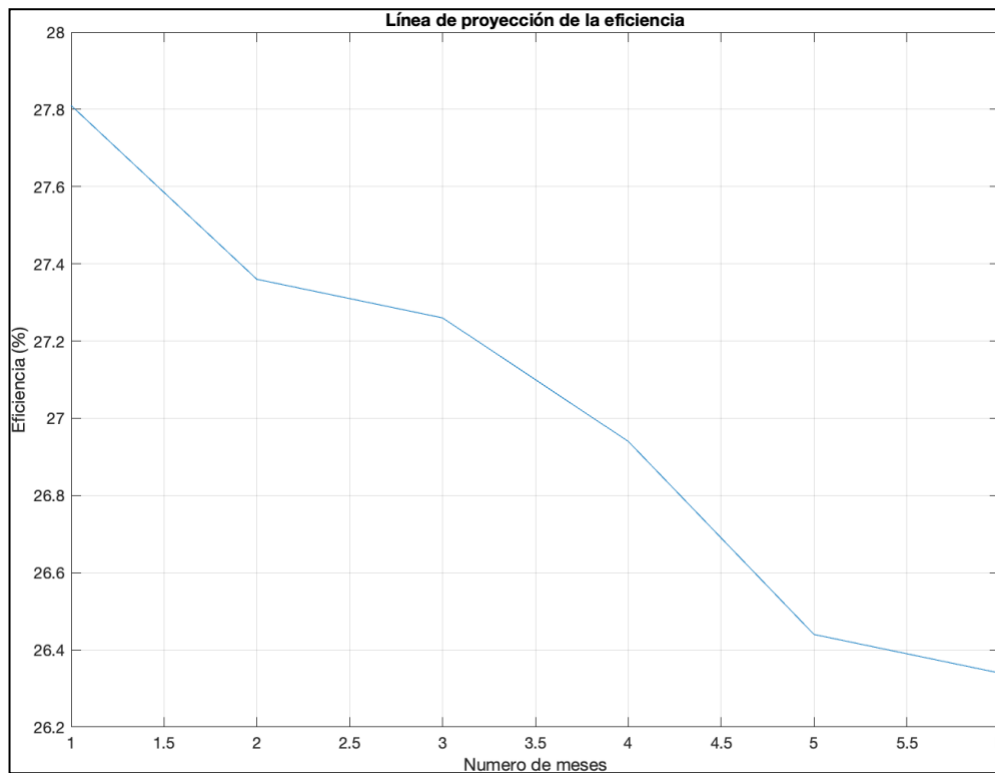
```
23   $P_t \leftarrow$  Reemplace el individuo de selected_id con  
global_best_individual;  
24  if el local_best  $\leq$  last_local_best, then  
25      count  $\leftarrow$  count + 1;  
26  last_local_best  $\leftarrow$  local_best.
```

Con el algoritmo se ha obtenido una línea de predicción de nuestra eficiencia considerando en la Figura 3 proyectada por cada uno de los meses de trabajo de la caldera lo cual nos servirá para poder analizar la proyección a futuro de nuestra eficiencia.

Donde:

### Figura 3

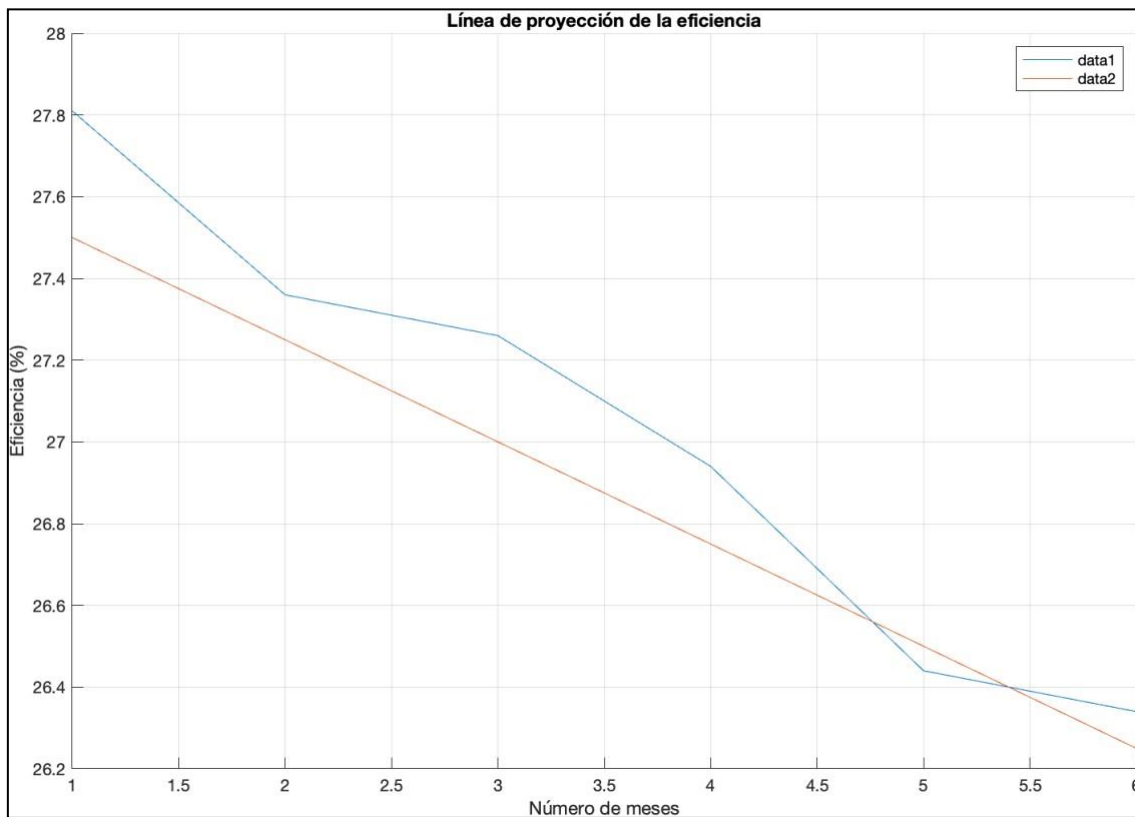
Proyección de la eficiencia por meses



En la figura 4, podemos observar una línea de tendencia que utilizaremos para predecir los nuevos valores de la eficiencia y se puede utilizar para hacer la predicción en años. Para esta figura la línea azul está dada por los valores de eficiencia dado por el algoritmo y la línea roja la línea de tendencia.

**Figura 4**

Eficiencia de la caldera proyectada por años



Como último punto se realizó un análisis económico de la implementación del sistema, por lo que en primer lugar debemos analizar los efectos positivos de dicho algoritmo. El algoritmo servirá para poder disminuir las paradas por mantenimiento ya que se sabrá por anticipado en que mes del año se tendrá una disminución de la eficiencia. En segundo lugar, los gastos de ahorro serán en lo que es logística, ya que se planificará la compra de repuestos y de cambios en el diseño a trabajar.

Según la tabla 6 podemos ver el detallado de nuestro presupuesto para poder analizar su eficiencia.

**Tabla 6** Presupuesto del modelo

<b>Rubros</b>	<b>Aporte monetario</b>
- Modelado en RL-GA	3500.00
- Planner	2000.00
- Operador de caldera	1500.00
TOTAL	7,000.00

En la tabla 6 podemos observar el detallado de los gastos que se utilizarán para poder determinar la eficiencia de la caldera y así poder tener un mejor detalle de las fechas del año donde la eficiencia bajaría y generaría una menor cantidad de vapor.

## V. DISCUSIÓN

Con respecto al primer objetivo de cálculo de propiedades térmicas, en nuestro caso se realizaron los cálculos teóricos utilizando el cálculo directo a través de las fórmulas de cada uno, con lo cual se obtuvieron valores cercanos al 27%. Por el contrario, (Wang *et al.* 2020) adoptaron un método de computación suave basado en datos para medir la eficiencia de la caldera incorporando modelos difusos fuera de línea y operaciones en línea. Sin embargo, Madejski y Żymełka (2020) también realizaron cálculos energéticos por el método indirecto y el cálculo de las pérdidas individuales de la caldera. El modelo termodinámico fue desarrollado para simular el funcionamiento de la caldera bajo cargas parciales. La precisión de los resultados del modelo se verificó con tres cargas parciales diferentes. El modelo termodinámico se creó utilizando el *software Epsilon Professional* y un enfoque de modelado termodinámico de 0 dimensiones. En los tres casos, se puede evidenciar que los valores de eficiencia de la caldera son fácilmente calculables, considerando los parámetros de trabajo, tanto del agua como del vapor.

Para el segundo objetivo que se consistió en analizar la implementación del algoritmo de predicción, para nuestro caso se utilizó un algoritmo genético con aprendizaje por refuerzo, en el cual el algoritmo genético sirvió para poder dar una optimización a los datos obtenidos en el primer objetivo específico y el aprendizaje por refuerzo, nos sirvió para poder encontrar la curva de predicción de la eficiencia térmica. Esto tiene concordancia con nuestra hipótesis donde se aseguraba que se podía predecir los valores de eficiencia usando el algoritmo planteado, siendo específicos, con el cual pudimos obtener la predicción en meses futuros. En comparación a (C.L, D.S y Sonoli 2018) quienes establecieron un modelo estadístico para la eficiencia de la caldera utilizando pérdidas importantes de la caldera, para su caso el rendimiento depende principalmente a las pérdidas en tuberías y en el interior, por lo que no se encuentra un modelo de predicción acorde al rendimiento de nuestra caldera. Además, (Jiang *et al.*, 2021) mostraron que el sistema de predicción de la eficiencia energética de la combustión de calderas basado en el aprendizaje por refuerzo profundo propuesto es

eficaz y preciso, y funciona bien en el proceso de predicción, dando mínimos valores de error. Todo esto nos lleva a aseverar, que los modelos predictivos pueden ser utilizados para poder obtener valores futuros de las propiedades de un determinado fenómeno.

Finalmente, en cuestión al análisis económico se realizó el cálculo de costos directos e indirectos para obtener un valor final de S/. 3439.00 lo que es menor al análisis de un mantenimiento correctivo.



## VI. CONCLUSIONES

1. La eficiencia térmica de nuestra caldera se determinó con un total 27 % de eficiencia que es un valor bajo para el análisis de eficiencia, sin embargo, es parecido a los demás valores de otras calderas existentes en el mercado. Además, el valor de dicha eficiencia ha sido calculado de manera analítica para cada una de las semanas de trabajo de los primeros seis meses del año. Este valor nos demuestra que la cantidad de vapor generado es muy poca con respecto a la cantidad de combustible que se ha producido.
2. La implementación del algoritmo genético con aprendizaje por refuerzo permitió en primer lugar mejorar la data de entrada, que en este caso es la eficiencia teórica de los primeros meses, para luego poder predecir los valores de eficiencia térmica en los meses posteriores que fueron corroborados con la data que se tiene de los meses siguientes y son muy próximos a ellos.
3. Se encontraron los valores del costo de implementación del algoritmo llegando a un promedio de S/. 7000.00 que es recuperable en menos de 2 años la inversión que se tuvo. Los gastos son netamente de gastos del modelo sin considerar lo que se utilice para mejorar la eficiencia de la caldera ya que estos son gastos fijos en el programa de mantenimiento.

## **VII.RECOMENDACIONES**

Es necesario determinar una simulación de la eficiencia de la caldera y poder analizar el efecto del tiempo en la eficiencia. Dicha eficiencia se debe comparar con los valores numéricos determinados con el método analítico.

El análisis de la eficiencia debe ser realizado utilizando otro tipo de combustible ecológico, como puede ser cascarilla de arroz, cuyo potencial calorífico es mucho mayor que el bagazo de azúcar utilizado en esta tesis. Se recomienda tener data real con la cascarilla de arroz para poder constatar con el modelo planteado.

## BIBLIOGRAFIA

- Arias Lafargue, T., & López Ríos, L. (2015). Propuesta tecnológica para el aprovechamiento energético del bagazo de cebada malteada de la cervecería Hatuey, 1(1).
- Burton, P. (2021). No solo es con gas: conozca los sistemas para calefaccionar el agua, 1(1).
- C.L, C., D.S, J. y SONOLI, S., 2018. Multiple Linear Regression Analysis for Prediction of Boiler Losses and Boiler Efficiency. *International Journal of Instrumentation and Control Systems*, vol. 8, no. 2, ISSN 2319412X. DOI 10.5121/ijics.2018.8201.
- Caetano Barbieri, R., & Costa Campo, J. C. (2019). Análisis de la Eficiencia Energética de una Caldera Industrial Alimentada por Leña, 9(1).
- Caetano, R. (2019, 10 14). Análisis de la Eficiencia Energética de una Caldera Industrial Alimentada por Leña. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i1.1606>.
- Camacho Villanueva, C. I., & Grande Tovar, C. D. (2020). Bagazo de malta (BSG): biorresiduo con potencial aplicación a nivel funcional, material y energético, 19(1).
- Casas Rodríguez, S., & Guerra Casas, L. D. (2020). La gallinaza, efecto en el medio ambiente y posibilidades de reutilización, 32(3).
- Chlebnikovas, A., & Paliulis, D. (2021). Possibilities and Generated Emissions of Using Wood and Lignin Biofuel for Heat Production, 14.
- Cruel Preciado, M. (2022). Uso de biocombustibles en Ecuador: Una mirada desde la protección de los derechos de la naturaleza.
- Díaz Barrios, S., & Pérez Acosta, O. G. (2021). Uso del biodiesel en motores de combustión interna destinados a actividades ganaderas.
- EPA, 2021. State Energy Efficiency: Benefits and Opportunities. 2021. S.l.: s.n.
- Filipshchuk, A. N., & Kolbasenko, O. V. (2021). Technology for Improving Technical, Economic and Ecological Efficiency of Boiler Plants Using Physico-Chemical Correction of the Water-Fuel Emulsions Composition, 3(5).

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). Metodología de la investigación. Mexico DF: Mc Graw Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.

Hugo Clavin, M. (2017). Medición continua de poder calorífico en gas natural, 5.

IEA, 2019. Multiple Benefits of Energy Efficiency. International Energy Agency, no. 30,

Jena, M. C., & Mishra,, S. K. (2023). Un estudio sobre el impacto económico, de eficiencia y ambiental (EEE) de diferentes combustibles utilizados en calderas para ayudar a la toma de decisiones en la conversión de combustible y mejorar la sostenibilidad.

JIANG, H., CAI, Z., ZHANG, T. y PENG, C., 2021. Prediction of Boiler Combustion Energy Efficiency via Deep Reinforcement Learning. Chinese Control Conference, CCC. S.l.: s.n., vol. 2021-July. DOI 10.23919/CCC52363.2021.9549779.

KAMAL, A., AL-GHAMDI, S.G. y KOC, M., 2019. Revaluing the costs and benefits of energy efficiency: A systematic review. 2019. S.l.: s.n.

KÖKSAL AHMED, E., LI, Z., VEERAVALLI, B. y REN, S., 2022. Reinforcement learning-enabled genetic algorithm for school bus scheduling. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations, vol. 26, no. 3, ISSN 15472442. DOI 10.1080/15472450.2020.1852082.

Kuleshov, V. I., & Krakovetskiy, A. A. (2022). Fuel-Supply Mechanism in the ZOTA Maxima 150 Solid-Fuel Boiler, 42(11).

Lozada, J. (2014). Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industrial. Ciencia América, 3(1), 34-39. <https://doi.org/ISSN-e 1390-9592>

MADEJSKI, P. y ŻYMEŁKA, P., 2020. Calculation methods of steam boiler operation factors under varying operating conditions with the use of computational thermodynamic modeling. Energy, vol. 197, ISSN 03605442. DOI 10.1016/j.energy.2020.117221.

Mamani, J., Llumipanta, F., & Ramos, S. (2021). Sistemas de producción de biogás: fundamento, técnicas de mejora, ventajas y desventajas, 11(2).

Mena, R. (2022). Solid Fuel Boilers (solid Fuel Boiler With Manual Fuel Loading 250 Kw, Solid Fuel Boiler With Manual Fuel Loading 200 Kw, Solid Fuel Boiler With Manual Fuel Loading 50 Kw).

MIHELIC-BOGDANIC, A. y ŠPELIC, I., 2022. Energy Efficiency Optimization in Polyisoprene Footwear Production. Sustainability (Switzerland), vol. 14, no. 17, ISSN 20711050. DOI 10.3390/su141710799.

Mihelić, A. (2022). Optimización de la eficiencia energética en la producción de calzado de poliisopreno. Croacia: <https://doi.org/10.3390/su141710799>.

Norbert, É., & László, K. (2021). Operational Testing of a Solid Fuel Boiler with Different Fuels, 14.

Nunes, L. J., & Gordina, R. (2019). Evaluation of the utilization of woodchips as fuel for industrial boilers, 223.

Plazas Santamaría, D. (2018). The production of ecological fuels, a danger for food security in Colombia, 13(2).

Polupan, G., Jarquin, G., Carvajal, I., & Pysmenny, Y. (2021). Desarrollo de Recuperadores de Energía para Calderas Basados en Elementos Bifásicos, 22(5).

Proszak, D., Rabczak, S., & Rybak Wilusz, E. (2020). Ecological and Financial Effects of Coal-Fired Boiler Replacement with Alternative Fuels, 21(1).

Rastegarpour, S., & Mariotti, A. (2023). Mejora de la eficiencia energética para la industria calderas a través de un sistema de recuperación de calor de condensación de gases de combustión con enfoque MPC no lineal, 229.

REUTER, M., PATEL, M.K., EICHHAMMER, W., LAPILLONNE, B. y POLLIER, K., 2020. A comprehensive indicator set for measuring multiple benefits of energy efficiency. Energy Policy, vol. 139, ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2020.111284.

Rubio Ramirez, C. R., & Martheyn Lizarazo, G. (2019). Metodología para el cálculo del desempeño térmico de turbuladores helicoidales en calderas de vapor: modelo matemático y simulación, 24(3).

Rubio Ramirez, C. R., Martheyn Lizarazo, G., & Vera Duarte, L. E. (2020). Metodología para el cálculo del desempeño térmico de turbuladores helicoidales en calderas de vapor: modelo matemático y simulación, 24(3).

RUSOVŠ, D., JANSONŠ, L., ZELTINS, N. y GEIPELE, I., 2023. Efficient Heat Recovery from Hydrogen and Natural Gas Blend Combustion Products. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, vol. 60, no. 2, ISSN 08688257. DOI 10.2478/lpts-2023-0009.

SALAH, I., MABROOK, M.M., RAHOUMA, K.H. y HUSSEIN, A.I., 2022. Energy efficiency optimization in adaptive massive MIMO networks for 5G applications using genetic algorithm. *Optical and Quantum Electronics*, vol. 54, no. 2, ISSN 1572817X. DOI 10.1007/s11082-021-03507-5.

Serbin, S., & Radchenko, M. (2023). Improving Ecological Efficiency of Gas Turbine Power System by Combusting Hydrogen and Hydrogen-Natural Gas Mixtures, 16(9).

ŚLADEWSKI, Ł., WOJDAN, K., ŚWIRSKI, K., JANDA, T., NABAGŁO, D. y CHACHUŁA, J., 2017. Optimization of combustion process in coal-fired power plant with utilization of acoustic system for in-furnace temperature measurement. *Applied Thermal Engineering*, vol. 123, ISSN 13594311. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.078.

STEKLAIN, A., ADAMES, M. y GANACIM, F., 2023. Improving reflexive surfaces efficiency with genetic algorithms. *Journal of Instrumentation*, vol. 18, no. 3, ISSN 17480221. DOI 10.1088/1748-0221/18/03/P03008.

SUN, Y., SILVESTROV, I. y BAKULIN, A., 2022. Enhancing 3-D Land Seismic Data Using Nonlinear Beamforming Based on the Efficiency-Improved Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 26, no. 5, ISSN 19410026. DOI 10.1109/TEVC.2022.3149579.

Systems, P. (2017). Recuperación de calor de gases de combustión. Alemania: [http://www.bbs.bilfinger.com/fileadmin/power\\_steinmuller/Mediathek/Broschuere\\_Rauchgasw\\_rmenutzung\\_BBS\\_web\\_E.pdf](http://www.bbs.bilfinger.com/fileadmin/power_steinmuller/Mediathek/Broschuere_Rauchgasw_rmenutzung_BBS_web_E.pdf).

TIC, W.J. y GUZIAŁOWSKA-TIC, J., 2023. A System of Improving Energy and Ecological Efficiency, Using the Example of Fuel Oil Combustion in Power Plant Boilers. *Energies*, vol. 16, no. 3, ISSN 19961073. DOI 10.3390/en16031107.

Valencia Bautista, E., Angulo Guerrero, R., Farfán Bone, J., & Verá Lozano, C. (2022). Una revisión del suministro de energía renovable y las tecnologías de eficiencia energética, 7(4).

Vera Viera, R. A. (2022). Trampas de vapor para la mejora de la eficiencia energética en el sector industrial, 7(3).

Verdezoto, L., & Parco, F. (2021). Energía renovable a partir de la biomasa de la caña de azúcar, 8(1).

VILLA ACUNA, Y.P. y SUN, Y., 2020. An efficiency-improved genetic algorithm and its application on multimodal functions and a 2D common reflection surface stacking problem. *Geophysical Prospecting*, vol. 68, no. 4, ISSN 13652478. DOI 10.1111/1365-2478.12920.

Villa Zura, M. P. (2021). *Biocombustibles, una alternativa ecológica para el desarrollo sostenible en el Ecuador provincia de Imbabura*.

WANG, Y.F., WANG, M.X., LIU, Y., YIN, L., ZHOU, X.R., XU, J.F. y ZHANG, X.Y., 2020. Fuzzy modeling of boiler efficiency in power plants. *Information Sciences*, vol. 542, ISSN 00200255. DOI 10.1016/j.ins.2020.06.064.

Wilhelm Jan, T., & Guzialowska Tic, J. (2023). A System of Improving Energy and Ecological Efficiency, Using the Example of Fuel Oil Combustion in Power Plant Boilers, 16(3).

Wilhelm Jan, T., & Guzialowska Tic, J. (2023). Un Sistema de Mejora de la Eficiencia Energética y Ecológica, Utilizando el Ejemplo de Combustión de Fuel Oil en Calderas de Centrales Térmicas, 16.

Yuan Hao, S., & Tian Xiang, H. (2023). Un enfoque de predicción híbrido para mejorar la eficiencia de transferencia de calor de una central eléctrica caldera de carbón, 9.

Zambrano Zambrano, G., García Macías, V., & Cedeño Palacios, C. (2021). Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) para la obtención de fibras de celulosa, 8(1).

## ANEXOS

### Anexo 1

Tabla de operacionalización de variable

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
<b>Variable independiente:</b> Algoritmo genético – aprendizaje por refuerzo	Un algoritmo genético-aprendizaje por refuerzo es aquel sistema donde los algoritmos genéticos se utilizan para optimizar políticas de comportamiento del agente de aprendizaje de refuerzo, como la estructura de las políticas, los hiperparámetros o la estrategia de exploración. complejos (Köksal Ahmed et al. 2022).	La definición operacional de un sistema híbrido genético-aprendizaje de refuerzo implica una descripción detallada de cómo se combinan y operan los componentes de algoritmos genéticos y aprendizaje de refuerzo en la eficiencia de las calderas.	Parámetros del algoritmo	Tamaño de la población	Razón
<b>Variable dependiente:</b> Eficiencia de la Caldera peritubular de vapor	Polupan et al., (2021) indicaron que la eficiencia de caldero es la relación entre la cantidad de calor absorbido por el fluido ya sea agua, vapor u otro sobre el calor liberado por el equipo térmico	La Eficiencia de la caldera se expresa como el 100% menos las pérdidas por gases secos de chimenea, menos las pérdidas por humedad en dichos gases. Esto explica que la eficiencia de la caldera siempre tendrá un menor valor que la eficiencia de combustión.	Eficiencia energética	Relación aire combustible. Temperatura de los gases de chimenea. Temperatura de agua de alimentación. Temperatura del aire de combustión. Presión de Vapor Pérdidas de calor en la carcasa de la caldera.	Intervalo Intervalo Intervalo Intervalo Intervalo Razón Intervalo



Instrumento - Guía de Observación

**Anexo 2**

Instrumento de Recolección de Datos

Tipo de Combustible	Poder Calorífico teórico	Cantidad (kg)	Aplicado a la Caldera Núm.	Tiempo de consumo (horas)	Estado de las superficies

Esquema de la caldera

Agua de alimentación, Temperatura: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Firma del investigador

Firma del jefe de mantenimiento

Instrumento Ficha de Registro Documental

<b>Caldero Núm.</b>	<b>Tº Agua Alimentación</b>	<b>Presión (MPa)</b>	<b>Calor absorbido (MJ)</b>	<b>Calor liberado (MJ)</b>	<b>Eficiencia</b>

Fecha: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Firma del investigador

Firma del jefe de mantenimiento

### Anexo 3

Modelo de consentimiento y/o asentimiento informado

#### **AUTORIZACIÓN DE USO DE INFORMACIÓN DE EMPRESA**

Yo, Ing. **Carlos Enrique Quiroz Carbonell** identificado con DNI ...40125524..., en mi calidad de ...JEFE DE MANTENIMIENTO del área de INGENIERÍA de la empresa AGROINDUSTRIAL DEL PERÚ S.A.C con R.U.C N°20506475288 ubicada en la ciudad de Trujillo – La Libertad

#### **OTORGO LA AUTORIZACIÓN,**

Al señor **Edwin Alain Pizan Tarazona / Darío Daniel De La Cruz Otiniano**

Identificado(s) con DNI N°.....41234859 /...46174746 de la Carrera profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica para que utilice la siguiente información de la empresa:

- Datos de las calderas, consumo de combustible, cantidad de agua de alimentación
- Datos históricos de la empresa y del área de mantenimiento.

Con la finalidad de que pueda desarrollar su ( ) Informe estadístico, ( X)Trabajo de Investigación, ( )Tesis para optar el Título Profesional.

(X) Publique los resultados de la investigación en el repositorio institucional de la UCV.

Indicar si el Representante que autoriza la información de la empresa, solicita mantener el nombre o cualquier distintivo de la empresa en reserva, marcando con una "X" la opción seleccionada.

(X) Mantener en reserva el nombre o cualquier distintivo de la empresa; o

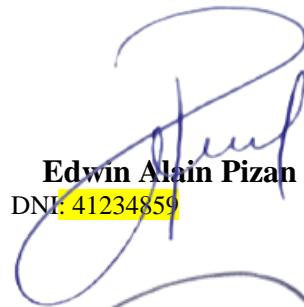
( ) Mencionar el nombre de la empresa.




AGROINDUSTRIAL  
DEL PERÚ S.A.C.  
CARLOS QUIROZ CARBONELL  
JEFE DE MANTENIMIENTO ZONA MC

Firma y sello del Representante Legal  
**DNI: 40125524**

El Estudiante declara que los datos emitidos en esta carta y en el Trabajo de Investigación, en la Tesis son auténticos. En caso de comprobarse la falsedad de datos, el Estudiante será sometido al inicio del procedimiento disciplinario correspondiente; asimismo, asumirá toda la responsabilidad ante posibles acciones legales que la empresa, otorgante de información, pueda ejecutar.



**Edwin Alain Pizan Tarazona**  
DNI: 41234859



**Darío Daniel De La Cruz Otiniano**  
DNI: 46174746