

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL**



## **TESIS**

**“DISEÑO DE PROTOCOLOS DE AUTOMATIZACIÓN PARA OPTIMIZAR LA  
EFICIENCIA TÉRMICA EN CALDERAS”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

**ELABORADO POR**

**CESAR ALONSO MENDOZA SAMAME**

**ID 0009-0009-5452-3636**

**ASESOR**

**Dr. Ing. ALDO MAX DELGADO ACEVEDO**

**ID 0000-0002-6643-5846**

**LIMA – PERÚ**

**2025**

---

|                              |                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Citar/How to cite            | Mendoza Samame[1]                                                                                                                                                                                     |
| Referencia/Reference         | [1] C. Mendoza Samame. " <i>Diseño de protocolos de automatización para optimizar la eficiencia térmica en calderas</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025. |
| Estilo/Style:<br>IEEE (2020) |                                                                                                                                                                                                       |

---



---

|                                |                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Citar/How to cite              | (Mendoza, 2025)                                                                                                                                                                                                         |
| Referencia/Reference           | Mendoza, C. (2025). <i>Diseño de protocolos de automatización para optimizar la eficiencia térmica en calderas</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI. |
| Estilo/Style:<br>APA (7ma ed.) |                                                                                                                                                                                                                         |

---



***Dedicatoria***

*A mis padres por apoyarme en todo este proceso.*

**Agradecimientos**

Agradezco a mis padres por brindarme educación, a la Universidad Nacional de Ingeniería por formarme profesionalmente y a mi asesor por guiarme en este proceso.

## **Resumen**

Este proyecto de tesis tiene como objetivo principal mejorar la eficiencia térmica de las calderas en un 5% mediante la implementación de protocolos de automatización, específicamente a través del uso de un control PID y el control de oxígeno. Este trabajo subraya la necesidad de regular el uso de combustibles fósiles en procesos industriales como la operación de calderas.

Los objetivos específicos incluyen la implementación de un control PID, la integración del control de oxígeno y la evaluación de la relación beneficio-costos del proyecto. Las hipótesis planteadas sostienen que tanto el control PID como el control de oxígeno pueden incrementar la eficiencia térmica en al menos un 5%, y que la relación beneficio-costos será favorable (mayor a la unidad).

En el desarrollo de la investigación, se utiliza un modelo matemático de una caldera de 400 BHP basado en referencias previas y se realiza la simulación del proceso con ayuda de los softwares TIA Portal, Python y Visual Studio Code, ajustando los parámetros PID para garantizar la estabilidad del sistema.

La evaluación económica emplea el indicador de la relación beneficio-costos, el cual fue de 11.7, demostrando la viabilidad económica del proyecto. Los resultados confirman que el control PI de oxígeno logra una mejora del 7% en la eficiencia térmica, cumpliendo con los objetivos establecidos.

**Palabras clave:** control PID, eficiencia, caldera, automatización.

## **Abstract**

This thesis project aims to improve the thermal efficiency of boilers by 5% through the implementation of automation protocols, specifically using a PID controller and oxygen control. The work emphasizes the need to regulate the use of fossil fuels in industrial processes such as boiler operation.

The specific objectives include the implementation of a PID controller, the integration of oxygen control, and the evaluation of the project's cost-benefit ratio. The proposed hypotheses assert that both the PID controller and oxygen control can increase thermal efficiency by at least 5%, and that the cost-benefit ratio will be favorable (greater than one).

In the investigation, it is used a mathematical model of a 400 BHP boiler is developed based on previous references and a system is simulated throughout softwares such as TIA Portal, Python and Visual Studio Code, adjusting the PID parameters to ensure system stability.

The economic evaluation uses the cost-benefit ratio indicator, which was calculated to be 11.7, demonstrating the economic viability of the project. The results confirm that the oxygen PI control achieves a 7% improvement in thermal efficiency, meeting the established objectives.

**Keywords:** PID control, efficiency, boiler, automation.

## Tabla de contenido

|                                                             |       |
|-------------------------------------------------------------|-------|
| Resumen .....                                               | 5 V   |
| Abstract .....                                              | 6 VI  |
| Introducción .....                                          | 11 XI |
| Capítulo I. Parte introductoria del trabajo .....           | 1     |
| 1.1. Generalidades .....                                    | 1     |
| 1.2. Descripción del problema de investigación .....        | 1     |
| 1.3. Objetivos de estudio .....                             | 2     |
| 1.3.1. Objetivo general .....                               | 2     |
| 1.3.2. Objetivos específicos .....                          | 2     |
| 1.4. Antecedentes investigativos .....                      | 5     |
| Capítulo II. Marco teórico y conceptual .....               | 9     |
| 2.1. Marco teórico .....                                    | 9     |
| 2.2. Marco conceptual .....                                 | 16    |
| Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación ..... | 20    |
| Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados .....       | 63    |
| Conclusiones .....                                          | 65    |
| Recomendaciones .....                                       | 66    |
| Referencias bibliográficas .....                            | 67    |
| Anexos .....                                                | 70    |

## **Lista de tablas**

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Matriz de consistencia.....                                                                                 | 4  |
| Tabla 2: Operacionalización de variables .....                                                                       | 5  |
| Tabla 3: Parámetros del controlador PID obtenidos del método de respuesta a la<br>frecuencia de Ziegler-Nichols..... | 16 |
| Tabla 4: Entradas y salidas analógicas del controlador.....                                                          | 30 |
| Tabla 5: Presupuesto del sistema de control PID.....                                                                 | 61 |
| Tabla 6: Eficiencia vs. Costo operativo anual de combustible .....                                                   | 62 |



## Lista de figuras

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Diagrama de bloques con Python.....                             | 25 |
| Figura 2: Diagrama de Bode con Python.....                                | 26 |
| Figura 3: Especificaciones técnicas de calderas.....                      | 28 |
| Figura 4: Creación del proyecto en TIA Portal.....                        | 31 |
| Figura 5: Configuración del dispositivo .....                             | 32 |
| Figura 6: Adición del nuevo dispositivo.....                              | 33 |
| Figura 7: Selección del PLC .....                                         | 34 |
| Figura 8: Desprotección del PLC (I) .....                                 | 35 |
| Figura 9: Desprotección del PLC (II) .....                                | 36 |
| Figura 10: Desprotección del PLC (III).....                               | 37 |
| Figura 11: Desprotección del PLC (IV) .....                               | 38 |
| Figura 12: Módulo PLC en TIA Portal .....                                 | 39 |
| Figura 13: Adición del módulo de expansión .....                          | 40 |
| Figura 14: Interfaz del "Ladder" del TIA Portal .....                     | 41 |
| Figura 15: Selección del bloque "Cyclic Interrupt".....                   | 42 |
| Figura 16: Configuración del tiempo de ciclo del "Cyclic interrupt" ..... | 43 |
| Figura 17: Selección del bloque de función .....                          | 44 |
| Figura 18: Inserción del bloque de función en el "Cyclic Interrupt" ..... | 45 |
| Figura 19: Selección del PID Compact en el bloque de función.....         | 46 |
| Figura 20: Creación del "PID Compact" .....                               | 47 |
| Figura 21: Inserción de las variables en el PID Compact.....              | 48 |
| Figura 22: Visualización de las variables.....                            | 49 |
| Figura 23: Configuración de la variable de entrada .....                  | 50 |
| Figura 24: Configuración de las entradas y salidas del PID.....           | 51 |
| Figura 25: Configuración de los límites de la variable controlada .....   | 52 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 26: Escalamiento con las cuentas del PLC.....                                   | 53 |
| Figura 27: Configuración de los límites de advertencia de la variable controlada ..... | 54 |
| Figura 28: Configuración de los límites del valor de salida .....                      | 55 |
| Figura 29: Configuración de los parámetros PID .....                                   | 56 |
| Figura 30: Compilación del programa .....                                              | 57 |
| Figura 31: Simulación de variables la caldera en Python con PID.....                   | 58 |
| Figura 32: Visualización de variables de la caldera en Python sin PID.....             | 59 |
| Figura 33: Pérdidas de eficiencia térmica .....                                        | 64 |
| Figura 34: Boleta de PLC, módulo de expansión y HMI .....                              | 71 |
| Figura 35: Cotización Software TIA Portal V19 .....                                    | 72 |
| Figura 36: Cotización analizador de gases .....                                        | 73 |
| Figura 37: Certificado de Licencia de TIA Portal.....                                  | 74 |



## **Introducción**

En el contexto industrial actual, las calderas desempeñan un papel esencial como generadoras de vapor, siendo fundamentales en sectores tan diversos como la producción de energía, la manufactura de alimentos y la industria química. No obstante, su operación depende en gran medida del uso de combustibles fósiles, lo que genera altos costos operativos y un impacto ambiental significativo debido a las emisiones de gases de efecto invernadero. A nivel global, el consumo de estos combustibles representa más del 85% de la energía utilizada, contribuyendo directamente al calentamiento global (Tsoumalis et al., 2022).

Un desafío clave en la operación de calderas radica en el control preciso de parámetros como la presión, la temperatura y la relación aire-combustible. Históricamente, estos se han manejado de forma manual, lo que dificulta mantener condiciones óptimas de manera constante, especialmente en entornos industriales con demandas variables. La ausencia de automatización disminuye la eficiencia térmica, eleva el consumo de combustible y aumenta el riesgo de fallos operativos. En este contexto, la automatización emerge como una solución prometedora para mejorar el desempeño de las calderas, optimizar el uso de energía y reducir las emisiones contaminantes.

Este trabajo de tesis aborda esta problemática mediante el diseño e implementación de protocolos de automatización para calderas, con el objetivo principal de incrementar su eficiencia térmica en al menos un 5%. Para lograrlo, se propone integrar un sistema de control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y un control de oxígeno, estrategias esenciales para optimizar procesos térmicos. El control PID permitirá una regulación precisa de las variables operativas, mientras que el control de oxígeno garantizará una combustión eficiente al ajustar la relación aire-combustible. Además, se evaluará la viabilidad económica de estas soluciones mediante un análisis beneficio-costos, asegurando su sostenibilidad.

La metodología incluye la modelación dinámica del sistema de la caldera con herramientas como la transformada de Laplace y la linealización de variables, seguida de la simulación y ajuste del controlador PID utilizando TIA Portal, Python y Visual Studio Code. Finalmente, se realizará un análisis económico para determinar la rentabilidad del proyecto.

Este documento se estructura en ocho capítulos que detallan el desarrollo del proyecto. El Capítulo 1 presenta el planteamiento metodológico, incluyendo antecedentes, problema, objetivos e hipótesis. El Capítulo 2 aborda el marco teórico, explorando conceptos de termodinámica, control de procesos y automatización. El Capítulo 3 describe el desarrollo de la investigación que abarca la parte de la simulación del proceso y la evaluación económica, mientras que el Capítulo 4 discute los resultados obtenidos. Los Capítulos 5 y 6 ofrecen conclusiones y recomendaciones, respectivamente. Finalmente, los capítulos 7 y 8 incluyen las referencias bibliográficas y los anexos.

Con este proyecto, se busca contribuir al campo de la ingeniería química con una solución técnica innovadora y ofrecer una propuesta viable y escalable para la industria, alineada con los principios de sostenibilidad y eficiencia energética.

## **Capítulo I. Parte introductoria del trabajo**

### **1.1. Generalidades**

Las calderas industriales son equipos críticos en varios sectores (energía, alimentos, química), ya que generan vapor para procesos productivos. No obstante, dependen del uso de combustibles fósiles, lo que implica altos costos de operación y emisiones de gases de efecto invernadero. En este escenario, la automatización se plantea como una herramienta clave para mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental.

El manejo manual de parámetros como presión, temperatura y relación aire-combustible genera ineficiencias. Esto se traduce en baja eficiencia, mayor consumo de combustible y un aumento del riesgo de fallas operativas. Por lo tanto, se requiere un sistema automatizado que mantenga condiciones óptimas en calderas.

### **1.2. Descripción del problema de investigación**

Respecto al calentamiento global, se destaca entre las causas primarias el uso no controlado de combustibles fósiles, los cuales llegan a representar más del 85% del consumo energético en el mundo. Ello supone la prioridad de regular el uso de combustibles en procesos que los usen tales como la operación de calderas. (Tsoumalis et al., 2022).

Acerca de las calderas, es menester un control óptimo de los parámetros de operación; sin embargo, las condiciones de trabajo manual en las fábricas suponen una dificultad para esta tarea. Es por este motivo que el diseño de protocolos de automatización de calderas surgen como alternativa para atacar la realidad problemática de estos casos (Boobalan et al., 2020).

El presente trabajo busca atacar el problema de la escasez de automatización y mejorar la eficiencia térmica. De esta manera, resulta importante cuestionarse sobre si existe una correlación entre estas variables. Para resolver esta interrogante, se pretende



buscar una relación precisa entre el diseño de protocolos de automatización y varias variables clave de funcionamiento de la caldera, como la entalpía del vapor, la entalpía del agua y el poder calorífico del combustible. Estas preguntas reflexivas coadyuvarán a identificar las relaciones que afectan la eficiencia térmica de las calderas y cómo se pueden utilizar los protocolos de automatización para mejorar el rendimiento y disminuir las emisiones contaminantes.

### **Problema general**

- ¿Los protocolos de automatización mejorarán la eficiencia térmica de calderas?

### **Problemas específicos**

- ¿Cuál es el nivel de automatización que mejora la eficiencia térmica en calderas?
- ¿Cuál es el tipo de control que mejore la eficiencia térmica para los protocolos de automatización en calderas?
- ¿Es viable económicamente la propuesta de protocolos de automatización en calderas?

## **1.3. Objetivos de estudio**

### **1.3.1. Objetivo general**

- Determinar la eficiencia térmica en calderas mediante los protocolos de automatización.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar el nivel de automatización adecuado para la eficiencia térmica.
- Implementar el control PID de oxígeno como parte de los protocolos de automatización en calderas.
- Determinar la relación beneficio-costos de los protocolos de automatización en calderas.

## **Hipótesis**

### **Hipótesis general**

- La eficiencia térmica de calderas mejora en al menos un 5% mediante los protocolos de automatización.

### **Hipótesis específicas**

- Utilizando un control automatizado PID mejora la eficiencia térmica.
- El control de oxígeno es capaz de aumentar la eficiencia térmica en al menos un 5% mediante el método directo para los protocolos de automatización en calderas.
- La relación beneficio-costos para los protocolos de automatización en calderas es mayor que la unidad.

## Matriz de consistencia y operacionalización de variables

Tabla 1: Matriz de consistencia

| Problema                                                                                                                | Objetivos                                                                                                 | Hipótesis                                                                                                                                                                | Variables                                                  | Dimensiones                                                        | Metodología                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| P.G.- ¿Los protocolos de automatización mejorarán la eficiencia térmica de calderas?                                    | O.G.- Determinar la eficiencia térmica en calderas mediante los protocolos de automatización.             | H.G.- La eficiencia térmica de calderas mejora en al menos un 5% mediante los protocolos de automatización.                                                              | Variable 1: Protocolos de automatización                   | Nivel de automatización<br>Tipo de control<br>Viabilidad económica | Tipo: Investigación aplicada<br>Diseño: Correlacional |
| P.E.1.- ¿Cuál es el nivel de automatización que mejora la eficiencia térmica en calderas?                               | O.E.1.- Determinar el nivel de automatización adecuado para la eficiencia térmica.                        | H.E.1.- Utilizando un control automatizado PID mejora la eficiencia térmica.                                                                                             |                                                            | Entalpía de vapor de agua                                          | Enfoque: Cuantitativo                                 |
| P.E.2.- ¿Cuál es el tipo de control que mejore la eficiencia térmica para los protocolos de automatización en calderas? | O.E.2.- Implementar el control PID de oxígeno como parte de los protocolos de automatización en calderas. | H.E.2.- El control de oxígeno es capaz de aumentar la eficiencia térmica en al menos un 5% mediante el método directo para los protocolos de automatización en calderas. | Variable 2: eficiencia térmica en calderas piro-tubulares. | Entalpía de agua                                                   | Población: Calderas en una planta                     |
| P.E.3.- ¿Es viable económicamente la propuesta de protocolos de automatización en calderas?                             | O.E.3.- Determinar la relación beneficio-costos de los protocolos de automatización en calderas.          | H.E.3.- La relación beneficio-costos para los protocolos de automatización en calderas es mayor que la unidad.                                                           |                                                            | Poder calorífico del combustible                                   | Muestra: Caldera de 400 BHP                           |

Fuente: Elaboración propia, 2025

Tabla 2: Operacionalización de variables

| Variable                 | Definición conceptual                                                             | Definición operacional                                                  | Indicador |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Aire suministrado        | Es la cantidad de masa de aire que ingresa a la caldera como comburente           | Es el flujo de aire que ingresa a la caldera                            | Lb/h      |
| Combustible suministrado | Es la cantidad de masa de combustible que ingresa a la caldera para la combustión | Es el flujo de combustible que ingresa a la caldera                     | Lb/h      |
| Eficiencia térmica       | Es la relación entre el calor absorbido y el calor de combustión                  | Es el rendimiento logrado con el diseño de protocolos de automatización | %         |

Fuente: Elaboración propia, 2025

#### 1.4. Antecedentes investigativos

- a) Diseño experimental de automatización con sistemas de control de procesos Braumat y PLC S7- 416 para plantas de producción de bebidas en planta piloto Backus-ate

Centy (2019) realizó una implementación acercad de un sistema de control PID en casada para automatizar una caldera. Para dicha investigación se usó como variable independiente el módulo de entrenamiento para el sistema de control en cascada; por otro lado, las variables dependientes que se consideraron fueron la presión y la temperatura. Estas dos últimas estarían asociadas al lazo maestro y esclavo respectivamente. Los resultados de la tesis permitieron demostrar que el control de la presión presentaba una respuesta más rápida que el de la temperatura. Asimismo, con el incremento de la eficiencia térmica merced a la implementación de un economizador, se logró disminuir el



tiempo en un 37.5% en llegar al “set point”. Como resultado de esto, se disminuyó el consumo de combustible en un 20%.

- b) Mejora de la eficiencia térmica en calderas pirotubulares mediante la regulación de sus parámetros de combustión para una empresa pesquera

Huamanchumo & Moreno (2022) se enfocaron en aumentar la eficiencia térmica en calderas pirotubulares (variable dependiente) mediante la control y regulación de los parámetros de combustión (variable independiente). Para dicho estudio se emplearon calderas de 700, 800 y 600 BHP. Para la primera y la última se varió la presión de inyección del petróleo (combustible) de 40 a 50 psi. Además, se realizaron también pruebas a diferentes longitudes de llama de combustión: mínimo, 25, 50, 75 y 100, de los cuales se logró aceptar el régimen de 75% como el que permitía la mejor eficiencia térmica. Para la caldera de 700 BHP, se obtuvo un aumento de la eficiencia térmica en un 2.3%. Por otro lado, para la caldera de 800 BHP, subió en un 1.4%. Finalmente, para la caldera de 600 BHP, creció en un 5%.

- c) Sistema de Cogeneración de energía con Grupo Electrónico y vapor saturado para mejorar eficiencia del ciclo térmico y reducción de impactos medioambientales en la empresa Escobedo Sandoval S.A.C.

Tumbajulca & Valderrama (2021) realizaron una implementación de un sistema de cogeneración (variable independiente) con la finalidad de aumentar la eficiencia energética (variable dependiente). Las dimensiones consideradas de la primera variable fueron la auditoría energética y la energía eléctrica generada; por otro lado, para la segunda se consideraron la eficiencia térmica y el beneficio económico. Se llegaron a evaluar tres tipos de sistemas de cogeneración: con turbinas de vapor, con turbinas de gas y con precalentador de aire, siendo este último el que obtuvo el menor tiempo de recuperación de inversión (8 meses y 26 días). Finalmente, la eficiencia térmica de la caldera piro tubular de 60 BHP tuvo un aumento de 8.8%.

- d) Diseño del sistema de control de proceso de condensado de vapor en la producción de harina de pescado en la empresa KAISA, Los Olivos 2019

Cam (2020) trabajó en el diseño de un sistema de control del proceso de condensado de vapor. Para ello se estableció las siguientes actividades: análisis actual, diseño de control y simulación del sistema. Respecto a la primera tarea se analizó el calor suministrado por el vapor saturado, la composición del condensado para cada proceso y la llegada del condensado al tanque desaireador. En relación con la segunda actividad, se determinó la función de transferencia, los parámetros del controlador PID, la programación del PLC y la selección de los instrumentos. Finalmente, en cuanto a la tercera actividad, se logró simular el nivel del tanque desaireador con el PLC, con lo cual se consiguió un tiempo de estabilidad del sistema de 10 segundos.

- e) Estudio de mejora a una fábrica de aceite y cáscara deshidratada de limón realizada por corporación Primax para el cambio de matriz energética de petróleo diésel y residual a gas licuado de petróleo.

Sánchez (2020) realizó un trabajo para conseguir una mayor eficiencia de combustión mediante el cambio de combustible: GLP en vez de diésel y residual. Para la caldera de 150 BHP, la eficiencia tuvo un aumento de 8.4%. Por otro lado, la eficiencia de la caldera de 250 BHP llegó a subir un 10.4%. Por último, la de 600 BHP logró una mejora del 7.4%. En cuanto al análisis económico, los resultados fueron los siguientes: el VAN logrado fue de S/. 1099.312, el TIR fue de 32% y el periodo de recuperación obtenido fue de 2.47 años.

- f) Análisis de eficiencia térmica del proceso de generación de vapor en la Quesera Brayan del Cantón Salcedo

Saca (2021) se enfocó en realizar una mejora del estado técnico de los equipos en aras de aumentar la eficiencia térmica del sistema de generación de vapor. Esta mejora se fundamentó en mantenimientos correctivos e instrumentación para el control de los

parámetros de operación de la caldera. Los resultados que se obtuvieron fue que la eficiencia del sistema de generación y transporte de vapor aumentó en un 12%. Asimismo, se llegó a obtener un ahorro de 33.41% anual.

- g) Un controlador integrado basado en LabVIEW y IoT para PLC difuso para la automatización de una caldera.

Boobalan et al. (2020) logró desarrollar un prototipo del control de la potencia de vapor de una planta de calderas en una central eléctrica haciendo uso de un controlador PLC basado en lógica difusa. En el prototipo que se llegó a proponer consideró una válvula de vapor de la central térmica que se automatizó mediante un servomotor conectado a la válvula. La automatización tuvo como base los requisitos de carga y la lógica difusa desarrollada en LabVIEW. En este caso, la válvula de control neumático tuvo que ser reemplazada por un servomotor, lo que permitió conseguir un control preciso de la posición de la válvula de vapor según la demanda de carga requerida.

- h) Visión general de las tecnologías de optimización de calderas de gas natural y posibles aplicaciones en servicios de equilibrio de carga de gas.

Tsoumalis et al. (2022) se enfocaron cuestiones relacionadas a la eficiencia térmica y reducción de emisiones relacionadas con el gas natural en todas las etapas, desde el diseño hasta el funcionamiento de la caldera. La solución que se logró fue el uso de calderas de condensación, las cuales mostraron un aumento considerable en la eficiencia energética comparado a una caldera convencional.



## **Capítulo II. Marco teórico y conceptual**

### **2.1. Marco teórico**

#### **Primera ley de la termodinámica**

La primera ley de la termodinámica se basa en la conservación de la energía. En otras palabras, la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso solo se transforma. (Cengel & Boles, 2008)

De acuerdo con lo expuesto, se puede deducir que la energía total al inicio va a ser la misma a la energía total al final independientemente de los cambios físicos o químicos que hayan ocurrido dentro de un proceso.

#### **Calor y trabajo**

En relación con el calor y el trabajo, estas dos son las dos formas de transferencia de energía. La diferencia estriba en que se denomina calor cuando la fuerza impulsora de esta transferencia es la variación de temperatura; caso contrario, se denomina trabajo. Asimismo, señalan que la fuente impulsora de esta última es una fuerza que actúa sobre una distancia (Cengel & Boles, 2008).

De lo mencionado, se puede complementar que tanto el trabajo como el calor pueden transformarse de uno a otro siguiendo la primera ley. Esto debido a que ambos son tipos de energía; por lo tanto, la desaparición de uno es simplemente el surgimiento de otro a fin de que la energía total se conserve.

#### **Segunda ley de la termodinámica**

La segunda ley de la termodinámica hace referencia a la dirección en cómo se transfiere la energía. La transferencia de calor de manera espontánea va en una sola dirección: de un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura. No obstante, la transferencia de calor en el sentido opuesto es posible si es que hay una energía

adicional involucrada a fin de forzar el direccionamiento: proceso no espontáneo (Cengel & Boles, 2008).

De acuerdo con lo citado, se puede deducir que no un ciclo no puede producir trabajo neto si es que no existe un depósito adicional en el cual la energía sea transferida. En el contexto de la caldera, esta sería el depósito que suministre energía producto de la combustión. Por otro lado, el trabajo neto sería el calor transferido al agua (depósito adicional) para transformarse en vapor.

### **Eficiencia térmica**

Sobre la eficiencia térmica, esta corresponde a una medida del desempeño de una máquina térmica. En ese sentido, matemáticamente se puede definir como el cociente entre el trabajo neto que suministra el sistema entre el calor total que entra al mismo (Cengel & Boles, 2008).

Teniendo en cuenta lo estipulado en la segunda ley, se puede concluir que la eficiencia térmica siempre será menor a la unidad. Esto es una consecuencia con el hecho que siempre habrá una pérdida de calor en el proceso de transferir la energía al depósito adicional.

### **Análisis dinámico de procesos**

Una vez que se haya seleccionado el sistema de estudio (caldera), es menester realizar el balance de materia y/o energía asociada a fin de relacionar las variables implicadas en el sistema. No obstante, teniendo en cuenta que en estas expresiones hay derivadas, su tratamiento se hace complejo sin el uso de herramientas matemáticas, las cuales se pasan a enlistar a continuación:



## Transformada de Laplace

De acuerdo con lo expuesto se puede señalar que la transformada de Laplace es una herramienta útil para relacionar las variables del proceso en expresiones más sencillas. Esta se define como  $f(t)$  mediante la siguiente ecuación (C. Smith & Corripio, 1991):

$$F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\} = \int_0^s f(t)e^{-st} dt \quad (2.1)$$

Donde:

$f(t)$  = Una función del tiempo

$F(s)$  = Transformada de Laplace respectiva

$s$  = Variable de la transformada de Laplace

$t$  = Tiempo

Cuando se utiliza la transformada de Laplace en el diseño del sistema de control, se considera como variables del sistema las variables manipuladas y controladas, señales del transmisor, perturbaciones, posición de la válvula, control, flujo a través de la válvula de control y todas las demás variables intermedias. o señales (C. Smith & Corripio, 1991).

## Linealización de variables

En cuanto a los procesos industriales, uno de los obstáculos que se llegan a presentar en los análisis dinámicos es que las relaciones entre las variables corresponden a expresiones no lineales; es decir, las potencias son distintas a la unidad. Desafortunadamente, no es posible analizar sistemas no lineales utilizando la transformada de Laplace (C. Smith & Corripio, 1991).

Con relación a lo dicho se puede destacar la relevancia transformar las relaciones de las variables a sistemas lineales: linealización. Para ello se hace uso de las series de Taylor y se aproximará la expresión tomando en cuenta el componente lineal (C. Smith & Corripio, 1991):

$$f(x) = f(x_0) + \frac{df}{dx}(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2!} \frac{d^2f}{dx^2}(x_0)(x - x_0)^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3f}{dx^3}(x_0)(x - x_0)^3 + \dots \quad (2.2)$$

La aproximación lineal radica en considerar todos los términos igual a cero, con excepción de los dos primeros (C. Smith & Corripio, 1991):

$$f(x) = f(x_0) + \frac{df}{dx}(x_0)(x - x_0) \quad (2.3)$$

Para funciones de más de una variable se utiliza la siguiente expresión (C. Smith & Corripio, 1991):

$$\begin{aligned} f(x, y) = f(x_0, y_0) &+ \frac{df}{dx}(x_0, y_0)(x - x_0) + \frac{df}{dy}(x_0, y_0)(y - y_0) \\ &+ \frac{1}{2!} \frac{d^2f}{dx^2}(x_0, y_0)(x - x_0)^2 + \frac{1}{2!} \frac{d^2f}{dy^2}(x_0, y_0)(y - y_0)^2 \\ &+ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(x_0, y_0)(x - x_0)(y - y_0) + \dots \end{aligned} \quad (2.4)$$

### Control de procesos

El control de procesos busca mantener condiciones deseables de parámetros tales como la temperatura, presión o pH a través de la regulación de un flujo que entra o sale del proceso a controlar. El sistema de control está compuesto por cuatro elementos principales: proceso, elemento de medición, controlador y elemento de control final (válvula de control). Cada uno de estos elementos puede asociarse a un elemento físico en particular de todo el sistema (Heselton, 2005).

En base a lo expuesto, para el caso de una caldera, mediante los flujos de aire y combustible suministrados se pueden controlar sus parámetros de operación. En este caso sería la concentración de oxígeno a la salida de la caldera.

## Control Proporcional, integral y derivativo (PID)

El control proporcional integral y derivativo (PID) tiene un algoritmo en la versión "estándar" que se puede describir de la siguiente manera (Astrom & Hagglund, 2002):

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.5)$$

Donde  $u$  corresponde a la variable de control y  $e$  es el error de control ( $e = y_{sp} - y$ ). Por tanto, la variable de control se obtiene sumando tres términos: el término P (proporcional al error), el término I (proporcional a la integral del error) y el término D (proporcional a la salida del error) (Astrom & Hagglund, 2002).

De lo señalado se puede destacar que, para el caso de la caldera, la variable  $u$  sería la concentración de oxígeno a la salida. Por otro lado, la variable  $e(t)$  correspondería a el exceso de aire.

## Función de transferencia

Es una función compleja que es definida de la siguiente forma (Hangos & Bokor, 2004):

$$Y(s) = H(s)U(s) \quad (2.6)$$

$$H(s) = \frac{b(s)}{a(s)} \quad (2.7)$$

Donde:

$Y(s)$ : Transformada de Laplace de la señal de salida

$U(s)$ : Transformada de Laplace de la señal de entrada

$H(s)$ : Función de transferencia del sistema

En donde  $b(s)$  y  $a(s)$  son polinomios de grado  $m$  y  $n$  respectivamente. Asimismo, al polinomio  $a(s)$  se le denomina polinomio característico. Por otro lado, cuando  $m$  es menor a  $n$  se dice que  $H(s)$  es propia; caso contrario, es impropia. Los procesos reales se expresan matemáticamente con funciones de transferencia propias (Hangos & Bokor, 2004).

Para la obtención de la función de transferencia del proceso se debe realizar un balance de masa o energía (depende de la naturaleza de este) en estado estacionario y no estacionario. A partir de ahí se realiza la transformada de Laplace al cambio entre el estado no estacionario y el estacionario. De la expresión obtenida, se despeja la variable a controlar en función de las demás variables. De la misma manera se obtiene la función de transferencia del elemento de medición, simplemente que el balance se realiza no en todo el proceso, sino en la zona de medición. Finalmente, la función de transferencia del controlador se obtiene a partir de relacionar el cambio de la variable a controlar con el cambio de otra variable por medio de una constante de sensibilidad denominada ganancia del controlador (Coughanowr, 2019).

En base a lo señalado, para el caso de la caldera, se realizaría un balance de masa de oxígeno en estado no estacionario a fin de relacionar la concentración de oxígeno con los flujos de aire y combustible. Estos también están relacionados con la variable exceso de aire, con lo cual se puede colocar en función de esta última el balance.

### **Estabilidad de los procesos**

En términos generales, en el día a día, se considera que un sistema es “estable” si no se ve demasiado afectado por las perturbaciones externas, sino que amortigua su efecto (Hangos & Bokor, 2004). Para que cualquier sistema sea estable, la parte real de todas las raíces del polinomio característico debe ser negativa (C. A. Smith, 2004).



En relación con lo mencionado, la concentración de oxígeno a la salida de la caldera no se debe ver afectado demasiado ante perturbaciones del proceso. Este es el objetivo para que la variable controlada sea estable.

### **Razón de amplitud (RA) y ángulo de fase ( $\theta$ )**

La razón de amplitud se define como el cociente de la amplitud de la señal de salida respecto a la amplitud de la señal de entrada. Por otro lado, el ángulo de fase es la magnitud, en grados o radianes, en que la señal de salida sufre un retardo o adelanto respecto a la señal de entrada. Cuando ( $\theta$ ) es positiva, corresponde a un adelanto; mientras que cuando ( $\theta$ ) es negativa, implica un retardo (C. Smith & Corripio, 1991)

$$RA = \frac{Y_0}{X_0} \quad (2.8)$$

En función a lo descrito, estos indicadores nos dan información acerca de la relación entre las señales. Esto tanto para las de entrada como para las de salida.

### **Diagrama de bode**

Los diagramas de Bode son una representación gráfica de la razón de amplitudes y el ángulo de fase de la función de transferencia (C. Smith & Corripio, 1991). Respecto a lo citado se infiere que este diagrama ayuda a visualizar gráficamente si un sistema es estable o no. En caso de que no lo sea, se requiere de un sistema de control que ajuste la función de transferencia a fin de que cumpla con el criterio de estabilidad de Bode.

### **Método de respuesta a la frecuencia en Ziegler Nichols**

Respecto al método de respuesta a la frecuencia, esta toma como base la curva de Nyquist de la función de transferencia de proceso, exactamente donde la curva interseca el eje real negativo. Se determinan los parámetros  $K_u$  y  $T_u$ , llamados última ganancia y último periodo. Estos se pueden determinar configurando los parámetros del controlador de manera que la acción de sea proporcional; es decir,  $T_i = \infty$  y  $T_d = 0$ . La ganancia aumenta lentamente hasta que el proceso comienza a oscilar. La ganancia en este momento es  $K_u$  y el período de oscilación es  $T_u$ . Debido a que la ganancia alrededor del

lazo debe ser igual a la unidad para sostener una oscilación, se derivan las siguientes fórmulas (Astrom & Hagglund, 2002):

$$K_u G(i\omega_u) = -1 \quad (2.9)$$

$$K_u = \frac{1}{|G(i\omega_u)|} \quad (2.10)$$

Tabla 3: Parámetros del controlador PID obtenidos del método de respuesta a la frecuencia de Ziegler-Nichols

| Controlador | K     | Ti    | Td      | Tp     |
|-------------|-------|-------|---------|--------|
| P           | 0,5Ku |       |         | Tu     |
| PI          | 0,4Ku | 0,8Tu |         | 1,4Tu  |
| PID         | 0,6Ku | 0,5Tu | 0,125Tu | 0,85Tu |

Fuente: (Astrom & Hagglund, 2002)

## 2.2. Marco conceptual

### Caldera

Es aquel contenedor cerrado y hermético en el que se calienta agua hasta llegar al estado gaseoso, todo ello bajo presión o vacío merced a la aplicación de calor de combustibles, electricidad, gases de recuperación o energía nuclear. En relación con la clasificación de calderas, existen dos tipos principales: pirotubulares y acuotubulares. La primera es aquella en la cual los gases producto de la combustión son conducidos por el interior de tubos; mientras que la segunda está diseñada para que el fluido de trabajo (agua) sea el que se transporte por el interior de los tubos (INACAL, 2018).

De lo expuesto anteriormente, se puede complementar que las calderas acuotubulares son capaces de obtener vapor sobrecalentado al poder direccionar el flujo de agua que circula a través de la tubería una segunda vez a fin de que se caliente más.

### **Aire de combustión y combustible**

Es el aire que ingresa a la cámara de combustión del equipo para que se oxide el combustible. En otras palabras, el aire suministrado es la cantidad de masa de aire que ingresa a la caldera como comburente. Acerca de los combustibles, se definen como toda aquella sustancia capaz de reaccionar con un comburente (oxígeno) al estar en contacto con una fuente de ignición. Como consecuencia de esto, se produce la combustión (INACAL, 2008).

De lo señalado anteriormente, se puede agregar que el combustible suministrado es la cantidad de masa de esta sustancia que ingresa a la caldera para la combustión con el oxígeno presente en el aire suministrado.

### **Eficiencia térmica en calderas**

Es el cociente entre el calor absorbido y el calor de combustión (expresado en porcentaje). Sobre su determinación, existen dos métodos: directo e indirecto. Para el método directo se toma en cuenta la relación de energía de salida con la de entrada. Las fórmulas se muestra a continuación (INACAL, 2008):

$$\eta = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_c} \times 100 \quad (2.11)$$

$\dot{Q}_a$ : Calor absorbido por el fluido de trabajo por unidad de tiempo (KW).

$\dot{Q}_c$ : Calor de combustión del combustible por unidad de tiempo (KW).

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1) \quad (2.12)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot PCS \quad (2.13)$$

$\dot{m}_a$ : Flujo de masa del fluido de trabajo que sale de la caldera (Kg/s).

$\dot{m}_c$ : Flujo de masa del combustible (Kg/s).

$h_2$ : Entalpía del fluido de trabajo tomada a la salida de la caldera (KJ/Kg).



$h_1$ : Entalpía del fluido de trabajo tomada a la entrada de la caldera (KJ/Kg).

$PCS$ : Poder calorífico superior del combustible (KJ/Kg).

### **Control de tasa de combustión - ajuste de oxígeno**

En relación con el control de la combustión, uno de los aspectos críticos es la capacidad de regular la proporción que existe entre el oxígeno del aire y el combustible suministrados a la caldera. Es menester controlar esta relación; caso contrario, operar este equipo con un exceso de combustible puede desencadenar en una explosión (Gilman, 2005). Por otro lado, para controlar el oxígeno en la caldera se debe de tomar en cuenta la relación aire-combustible que ingresa a la caldera. Asimismo, el oxígeno medido que se considera corresponde a los gases de escape a la salida de la caldera (Heselson, 2005).

De lo señalado se puede acotar que, a través del envío de la señal del controlador a la válvula de control, se hace un ajuste del combustible suministrado para regular proporción de flujos con el aire suministrado.

### **Ingeniería de procesos**

La ingeniería de procesos está relacionada mayormente con el diseño de equipos. No obstante, para este caso el equipo de estudio (caldera) ya está puesta en marcha. Asimismo, los equipos involucrados (PLC y sensor de oxígeno) se pueden acoplar al equipo en cuestión. Con lo cual solamente es necesario la descripción de estos, así como una estimación de los costos involucrados para su implementación. Esta último se incluirá como parte de las actividades del plan de trabajo en la determinación de la relación beneficio- costo del proyecto.

### **Controlador lógico programable**

Actualmente, los controladores lógicos programables (PLC) son utilizados principalmente como controladores de sistemas de fabricación automatizados (AMS), además el PLC generalmente se programa usando un diagrama "Ladder". (Guedes, 2010).



En relación con lo expuesto se puede agregar que el diagrama "Ladder" es una herramienta útil para entender las señales de entrada y salida del PLC.

### **Sensores**

Un sensor es un dispositivo que detecta o mide una cantidad física (Sinclair, 2001). Respecto a lo descrito se puede agregar que la información que detecta el sensor será de utilidad para el PLC, el cual utiliza dichas señales para enviar una acción automática a una válvula de control.

## Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

### Análisis dinámico

La ecuación que relaciona las variables: concentración de oxígeno a la salida de la caldera y el flujo de aire de la caldera es la siguiente (Pellegrinetti & Bentsman, 1996):

$$O_2 = \frac{100(qa - qfFAR)}{(qa + qf)AIRO_2} \quad (3.1)$$

Donde:

O<sub>2</sub>: Porcentaje de oxígeno remanente después de la combustión

FAR: Relación másica entre aire y combustible para la combustión completa.

AIRO<sub>2</sub>: Relación másica entre aire y oxígeno en el aire atmosférico.

Qa: Flujo másico de aire.

Qf: Flujo másico de combustible.

Para calcular AIRO<sub>2</sub> se tomó en cuenta el porcentaje de oxígeno presente en el aire.

- **Composición en volumen del aire:**
  - Oxígeno (O<sub>2</sub>): 21% en volumen.
  - Nitrógeno (N<sub>2</sub>): 79% en volumen
- **Masas molares:**
  - O<sub>2</sub>: 32 g/mol
  - N<sub>2</sub>: 28 g/mol

### Cálculo de la fracción másica

Asumiendo un número de moles de aire de 100:

- Número de moles de O<sub>2</sub>: 21
- Número de moles de N<sub>2</sub>: 79

**Masa para cada componente:**

- Masa de O<sub>2</sub>: 21 moles×32 g/mol=672 g
- Masa de N<sub>2</sub>: 79 moles×28 g/mol=2212 g

**Masa de aire:**

$$672 \text{ g (O}_2\text{)} + 2212 \text{ g (N}_2\text{)} = 2884 \text{ g}$$

**Porcentaje en masa de O<sub>2</sub>:**

$$672 \text{ g} / 2884 \text{ g} \times 100 \approx 23.3\%$$

$$AIRO_2 = \frac{\text{Masa de aire}}{\text{Masa de oxígeno}} \quad (3.2)$$

$$AIRO_2 = \frac{100}{23.3} = 4.29 \quad (3.3)$$

Tomando en consideración un retardo de primer orden, la ecuación diferencial que rige este sistema es la siguiente (Pellegrinetti & Bentsman, 1996):

$$\dot{x}_2 = \left[ \frac{100(qa - qfFAR)}{(qa + qf)AIRO_2} - x_2 \right] \frac{1}{TAIR} \quad (3.4)$$

Donde:

TAIR: Constante de tiempo

Asimismo, el espacio de estados es el que se muestra a continuación (Pellegrinetti & Bentsman, 1996):

$$\dot{x} = A_p x + B_p u \quad (3.5)$$

$$y = C_p x + D_p u \quad (3.6)$$

$$A_p = \begin{bmatrix} -0.005509 & 0.00000 & 0 & -0.1588 \\ 0.000000 & -2.2062 & 0 & 0.00000 \\ -0.01216 & 0.00000 & 0 & -0.5672 \\ 0.000000 & 0.00000 & 0 & -0.040 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0.28000 & 0.000 & -0.01348 & 0.00 \\ -9.3750 & 7.658 & 0.000000 & 0.00 \\ 0.00000 & 0.000 & 0.73170 & 0.00 \\ 0.02999 & 0.000 & 0.000000 & 0.04 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$C_p = \begin{bmatrix} 14.210 & 0 & 0.0000 & 0.000 \\ 0.0000 & 1 & 0.0000 & 0.000 \\ 0.3221 & 0 & 0.1434 & 11.16 \\ 0.4133 & 0 & 0.0000 & 19.28 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$D_p = \begin{bmatrix} 0.000 & 0 & 0.0000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.0000 & 0 \\ 1.272 & 0 & -0.208 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.0000 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

A partir de las matrices de espacio de estado se obtienen la función de transferencia

(Pellegrinetti & Bentsman, 1996):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0055 & 0.00 & 0 & -0.1588 \\ 0.000000 & -2.2 & 0 & 0.0000 \\ -0.0122 & 0.00 & 0 & -0.5672 \\ 0.00000 & 0.00 & 0 & -0.004 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0.280 & 0.00 & -0.013 & 0.00 \\ -9.38 & 7.66 & 0.0000 & 0.00 \\ 0.000 & 0.00 & 0.7317 & 0.00 \\ 0.0299 & 0.00 & 0.0000 & 0.04 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14.21 & 0 & 0.0000 & 0.00 \\ 0.000 & 1 & 0.0000 & 0.00 \\ 0.322 & 0 & 0.1434 & 11.16 \\ 0.4133 & 0 & 0.0000 & 19.28 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.000 & 0.0000 & 0.00 \\ 0.0000 & 0.000 & 0.0000 & 0.00 \\ 1.272 & 0.000 & -0.208 & 0.00 \\ 0.0299 & 0.000 & 0.0000 & 0.00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}$$



Donde:

x1: Variable de estado de presión en el domo (kgf/cm<sup>2</sup>)

x2: Variable de estado de y2 (%)

x3: Densidad del fluido en el sistema (kg/m<sup>3</sup>)

x4: Variable exógena relacionada a la demanda de vapor (0-1)

y1: SCPx1, describe la presión en el domo superior (PSI)

y2: x2, describe el nivel de oxígeno (porcentaje)

y3 = SCWCXW1 (vwd – CXW2), describe el nivel de agua (pulgada)

y4 = q<sub>s</sub>, describe el flujo másico de vapor (Kg/s)

u1 = Tasa de flujo de combustible (0-1)

u2 = Tasa de flujo de aire (0-1)

u3 = Tasa de flujo de agua de alimentación a la caldera (0-1)

Wd: Demanda de vapor

Asimismo, se adjuntan las ecuaciones que enlazan estas variables:

$$y_1 = SCPx_1 \quad (3.13)$$

$$y_2 = x_2 \quad (3.14)$$

$$y_3 = SCWCXW1(vwd - CXW2) \quad (3.15)$$

$$y_4 = q_s \quad (3.16)$$

Asimismo, las ecuaciones que relacionan las variables del proceso con las variables normalizadas son las siguientes (Pellegrinetti & Bentsman, 1996):

$$qf = QFCFu_1 \quad (3.17)$$

$$qa = QACAu_2 \quad (3.18)$$

$$qfw = QCFWu_3 \quad (3.19)$$

Donde:

QFCF: Factor de conversión de flujo de combustible

QACA: Factor de conversión de flujo de aire

QCFW: Factor de conversión de flujo de agua

Desglosando las matrices quedaron las siguientes ecuaciones:

$$\dot{x}_1 = -0.005509x_1 - 9.375x_4 + 0.2800u_1 - 0.01348u_3 \quad (3.20)$$

$$\dot{x}_2 = -2.2062x_2 - 9.375u_1 + 7.658u_2 \quad (3.21)$$

$$\dot{x}_3 = -0.01216x_1 - 0.5672x_4 + 0.7317u_3 \quad (3.22)$$

$$\dot{x}_4 = -0.040x_4 + 0.02999u_1 + 0.040x_4 \quad (3.23)$$

Considerando que para este proyecto se evaluó solamente el nivel de oxígeno, se usó la segunda ecuación (Pellegrinetti & Bentsman, 1996):

$$\dot{x}_2 = -2.2062x_2 - 9.375u_1 + 7.658u_2 \quad (3.24)$$

$$y_2 = x_2 \quad (3.25)$$

$$\dot{y}_2 = -2.2062y_2 - 9.375u_1 + 7.658u_2 \quad (3.26)$$

$$sY_{2(s)} = -2.2062Y_{2(s)} - 9.375U_{1(s)} + 7.658U_{2(s)} \quad (3.27)$$

$$Y_{2(s)} = -\frac{9.375U_{1(s)}}{s + 2.2062} + \frac{7.658U_{2(s)}}{s + 2.2062} \quad (3.28)$$

A partir de esta función de transferencia se procedió a calcular los parámetros PID. Para ello se utilizaron los programas de Phyton y Visual Studio Code.

Diagrama de Bloques:  $Y_2(s)$  en función de  $U_1(s)$  y  $U_2(s)$

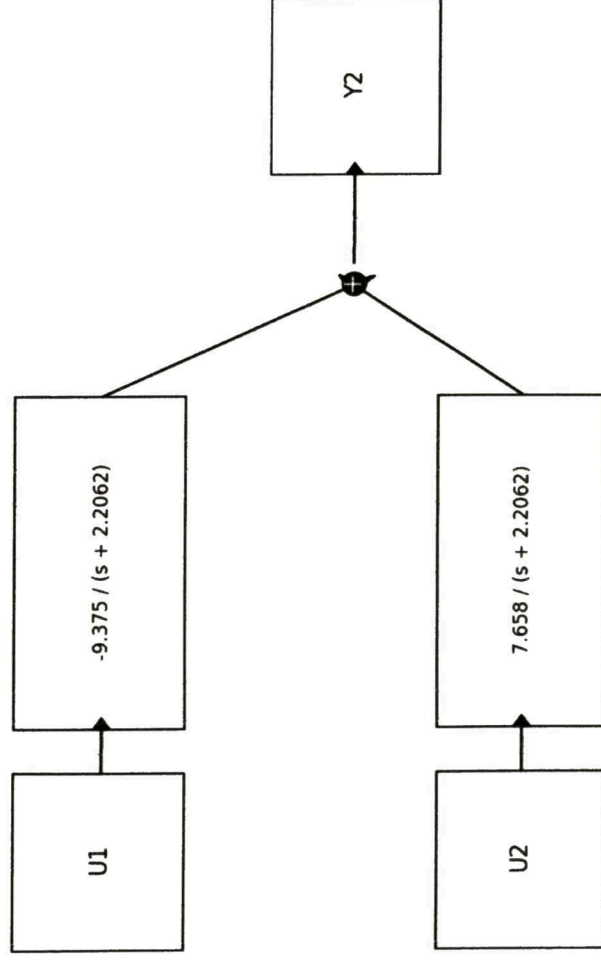


Figura 1: Diagrama de bloques con Python

Fuente: Elaboración propia, 2025

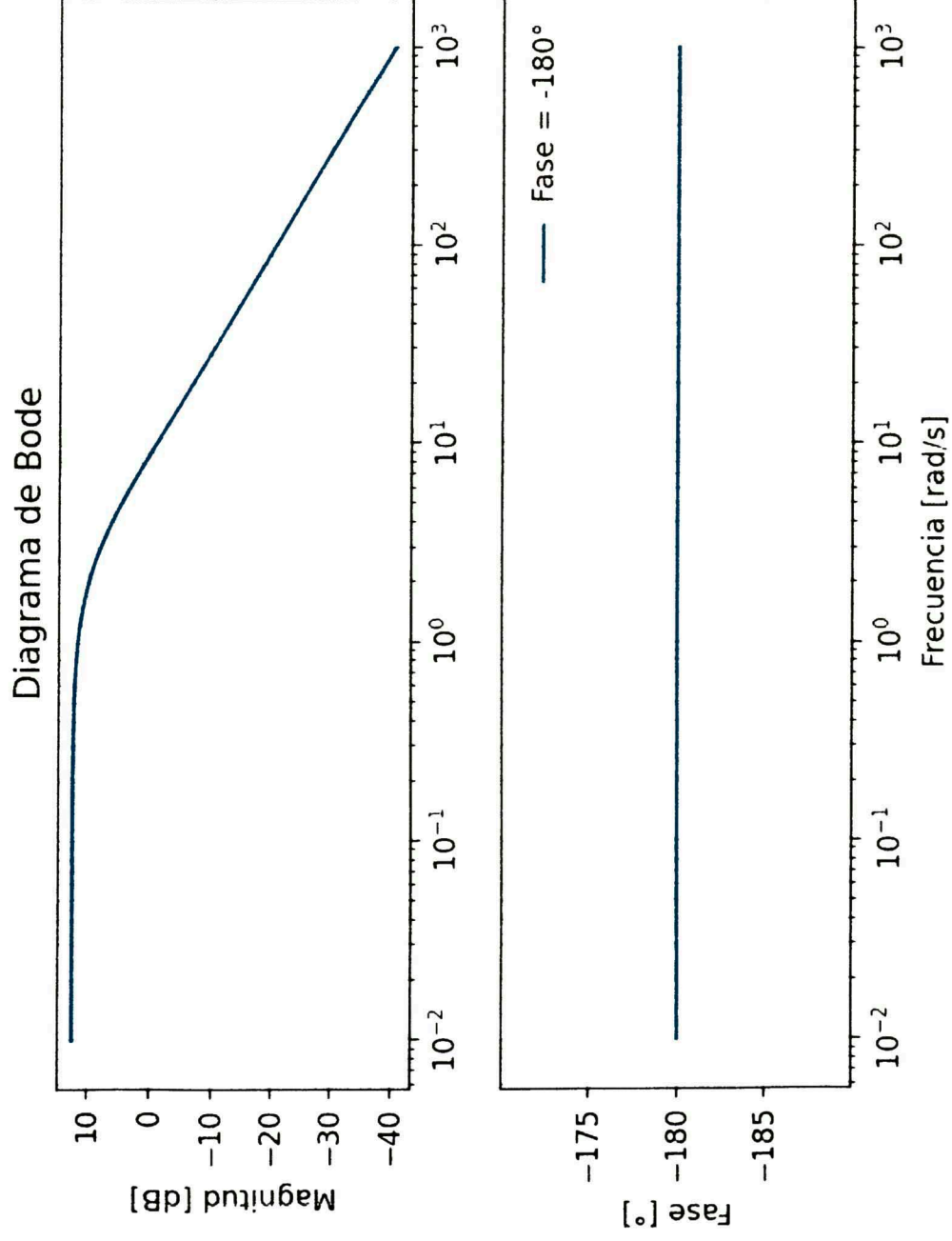


Figura 2: Diagrama de Bode con Python

Fuente: Elaboración propia, 2025



De la gráfica se puede visualizar que todas las fases están a -180, es decir, que la última frecuencia podría tomar cualquier. En este caso se optará por un valor cercano al origen: 0.1.

$$\omega_u = 0.1 \text{ rad/s} \quad (3.29)$$

A partir de este valor podemos calcular  $G(j\omega)$  directamente de la función:

$$G(j\omega) = \frac{-9.375}{j\omega + 2.2062} \quad (3.30)$$

En bajas frecuencias ( $\omega \approx 0$ ):

$$|G(j0)| = \frac{9.375}{2.2062} \approx 4.25 \quad (3.31)$$

$$K_u = \frac{1}{4.25} = 0.24 \quad (3.32)$$

$$T_u = \frac{2\pi}{0.1} = 62.8 \quad (3.33)$$

$$K = 0.6 * 0.24 = 0.14 \quad (3.34)$$

$$T_i = 0.5 * 628 = 31.4 \quad (3.35)$$

$$T_d = 0.125 * 628 = 7.85 \quad (3.36)$$

Asimismo, se muestran las especificaciones técnicas de la caldera de 400 BHP recogida del catálogo de la marca de la caldera (Colmaquinas, 2023):

**HORIZONTALES 150 P.S.I.G. PRESIÓN DE DISEÑO:**

| DATOS TÉCNICOS                    |                             | BHP       | 200       | 250        | 300        | 350        | 400        | 500        | 600        | 700        |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| CAPACIDAD DE LA CALDERA           | Btu/h                       | 6,695,000 | 8,368,750 | 10,042,500 | 11,716,250 | 13,390,000 | 16,737,500 | 20,085,000 | 23,432,500 | 27,567,647 |
| PRODUCCIÓN DE VAPOR               | lb/h                        | 6,900     | 8,625     | 10,350     | 12,075     | 13,800     | 17,250     | 20,700     | 24,150     | 28,559     |
| SUPERFICIE DE CALENTAMIENTO       | ft <sup>2</sup>             | 1,000     | 1,250     | 1,500      | 1,750      | 2,000      | 2,500      | 3,000      | 3,500      | 4,173      |
| LIBERACIÓN TÉRMICA                | Btu/ft <sup>2</sup> /h      | 137,279   | 174,170   | 211,061    | 247,952    | 284,843    | 362,719    | 440,595    | 518,471    | 614,151    |
| PESO NETO CALDERA                 | lb                          | 17,803    | 24,853    | 31,903     | 38,953     | 46,003     | 58,133     | 70,263     | 82,393     | 94,523     |
| CONTENIDO DE AGUA A NIVEL NORMAL  | gal                         | 1,609     | 1,673     | 1,737      | 1,801      | 1,865      | 2,328      | 2,791      | 3,254      | 3,717      |
| PESO DEL AGUA A NIVEL NORMAL      | lb                          | 13,425    | 13,948    | 14,471     | 14,994     | 15,517     | 19,416     | 23,315     | 27,214     | 31,113     |
| EFICIENCIA DE LA CALDERA          | %                           | 78.76     | 78.76     | 78.76      | 78.76      | 78.76      | 78.76      | 78.76      | 78.76      | 78.76      |
| CONSUMO DE ACEITE No. 2           | (138000 Btu/gal)            | 57.1      | 71.3      | 85.6       | 99.9       | 114.2      | 142.7      | 171.2      | 200.0      | 228.8      |
| CONSUMO DE ACEITE No. 6           | (150000 Btu/gal)            | 52.5      | 65.6      | 78.8       | 91.9       | 105.0      | 131.3      | 157.5      | 183.8      | 210.0      |
| CONSUMO DE GAS NATURAL            | (1000 Btu/ft <sup>3</sup> ) | 7,876.5   | 9,845.6   | 11,814.7   | 13,783.8   | 15,752.9   | 19,691.2   | 23,629.4   | 27,567.6   | 31,506.8   |
| CONSUMO DE GAS NATURAL            | (35315 Btu/m <sup>3</sup> ) | 223.0     | 278.8     | 334.6      | 390.3      | 446.1      | 557.6      | 669.1      | 780.6      | 914.0      |
| DIMENSIONES (PULGADAS)            |                             |           |           |            |            |            |            |            |            |            |
| DIAMETRO INTERIOR CALDERA         |                             | 72        | 78        | 84         | 90         | 96         | 102        | 108        | 114        | 120        |
| LONGITUD TOTAL DE LA CALDERA      | A                           | 234 3/4   | 237 1/8   | 269 3/4    | 259 1/2    | 301 1/4    | 316 7/16   | 334 3/4    | 341        | 341        |
| ALTURA TOTAL DE LA CALDERA        | B                           | 105 11/16 | 109       | 112 4/7    | 115 1/2    | 115 1/2    | 121        | 129 3/8    | 133 9/16   | 133 9/16   |
| LONGITUD TOTAL DEL CUERPO         | C                           | 199       | 199.625   | 224        | 214        | 255.75     | 270 15/16  | 289        | 291 1/2    | 291 1/2    |
| ALTURA DE LA BASE                 | D                           | 6         | 6         | 6          | 8          | 8          | 8          | 8          | 8          | 12         |
| ANCHO DE LA BASE                  | E                           | 72        | 78        | 84         | 84         | 84         | 90         | 96         | 102        | 102        |
| LONGITUD DE LA BASE               | F                           | 203 1/2   | 202.625   | 235        | 234        | 260        | 265 1/2    | 285        | 285        | 285        |
| DE LA BASE INFERIOR CUERPO        | G                           | 22 1/2    | 22.5      | 22.625     | 23         | 23         | 22 1/2     | 23         | 23 1/16    | 23 1/16    |
| DEL FRENTE CALDERA A FRENTE BASE  | H                           | 35 1/2    | 37 1/2    | 45 1/2     | 45 1/2     | 45 1/2     | 45 1/2     | 45 1/2     | 49 1/2     | 49 1/2     |
| ESPACIO DE REMOCIÓN DE TUBOS      | I                           | 178       | 174.625   | 197        | 201        | 229        | 241 15/16  | 254        | 255        | 255        |
| LOCALIZACIÓN SALIDA DE HUMO       | J                           | 9         | 11        | 11         | 12         | 12         | 13         | 15         | 17         | 17         |
| LOCALIZACIÓN SALIDA DE VAPOR      | K                           | 42 3/4    | 52.625    | 57.75      | 62         | 69.75      | 72 3/16    | 71 3/4     | 67 1/2     | 67 1/2     |
| LOCALIZACIÓN ALIMENTACIÓN DE AGUA | L                           | 93 3/4    | 94 5/8    | 96 1/4     | 109 1/2    | 123 1/2    | 132 15/16  | 128 3/4    | 105        | 105        |
| DIAMETRO CONEXIÓN PARA (PULGADAS) |                             |           |           |            |            |            |            |            |            |            |
| SALIDA DE VAPOR                   | 1                           | 4         | 4         | 4          | 6          | 6          | 6          | 6          | 6          | 6          |
| VALVULA DE SEGURIDAD              | 3a                          | 1 1/4     | 1.5       | 1.5        | 2          | 2          | 2          | 2          | 2          | 2          |
|                                   | 3b                          | 1 1/4     | 1.5       | 1.5        | 2          | 2          | 2          | 2          | 2          | 2          |
| ALIMENTACIÓN DE AGUA              | 4                           | 2         | 2         | 2          | 2 1/2      | 2 1/2      | 2 1/2      | 2 1/2      | 2 1/2      | 2 1/2      |
| PURGA CONTINUA                    | 5                           | 2         | 2         | 2          | 2          | 2          | 2          | 2          | 2          | 2          |
| PURGA DE FONDO                    | 6                           | 2         | 2         | 2          | 2          | 2          | 2          | 2          | 2          | 2          |
| DIAMETRO INTERIOR DE HUMO         | 7                           | 18        | 22        | 22         | 24         | 24         | 26         | 30         | 34         | 34         |

**Figura 3: Especificaciones técnicas de calderas**

Fuente: (Colmaquinas, 2023)

En el caso de la caldera del proyecto, esta corresponde a una de 400 BHP, a continuación, se muestran los detalles de esta:

A partir de las especificaciones técnicas de la caldera, se procedió a calcular el flujo de combustible considerando gas natural (PCS=9.667Kcal/Nm<sup>3</sup>).

$$85 = \frac{13390000 BTU/h}{\dot{m}_c \left( \frac{9.667 kcal}{Nm^3} \right) \left( \frac{Nm^3}{0.737 kg} \right) 3.9683 BTU/kcal} \times 100 \quad (3.38)$$

$$\dot{m}_c = QFCF = 302645 kg/h \quad (3.39)$$

Teniendo en cuenta la relación estequiométrica en masa con el oxígeno que ingresa al quemador (2:1) y el porcentaje másico de oxígeno (23.3%) se puede calcular el flujo de aire:

$$\frac{\dot{m}_a}{302645} = \frac{4}{0.233} = 17.17 = FAR \quad (3.40)$$

$$\dot{m}_a = q_a = 5196414 kg/h \quad (3.41)$$

De acuerdo con (Gearo, 1983), el porcentaje mínimo de exceso de oxígeno a la salida de la chimenea considerando gas natural está en el rango de 0.5 a 3%. Para este caso se consideró el promedio: 1.75%. A partir de ello, se calculó el flujo de combustible considerando ese exceso de oxígeno.

$$1.75 = \frac{100(5196414 - qf(17.17))}{(5196414 + qf)(4.29)} \quad (3.42)$$

$$qf = 278705 kg/h \quad (3.43)$$

## Programación

Se hizo uso del software TIA PORTAL V19. En primer lugar, se procedió con la definición de variables correspondientes a las entradas y salidas analógicas conectadas al PLC.

Tabla 4: Entradas y salidas analógicas del controlador.

| Tipo    | Instrumentos                       | Entradas físicas del controlador |
|---------|------------------------------------|----------------------------------|
| Entrada | Sensor de concentración de oxígeno | IW0.0                            |
| Salida  | Válvula reductora                  | QW0.0                            |

Fuente: Elaboración propia, 2025



En primer lugar, se procedió con crear el proyecto TESIS\_CALDERA en el TIA portal:

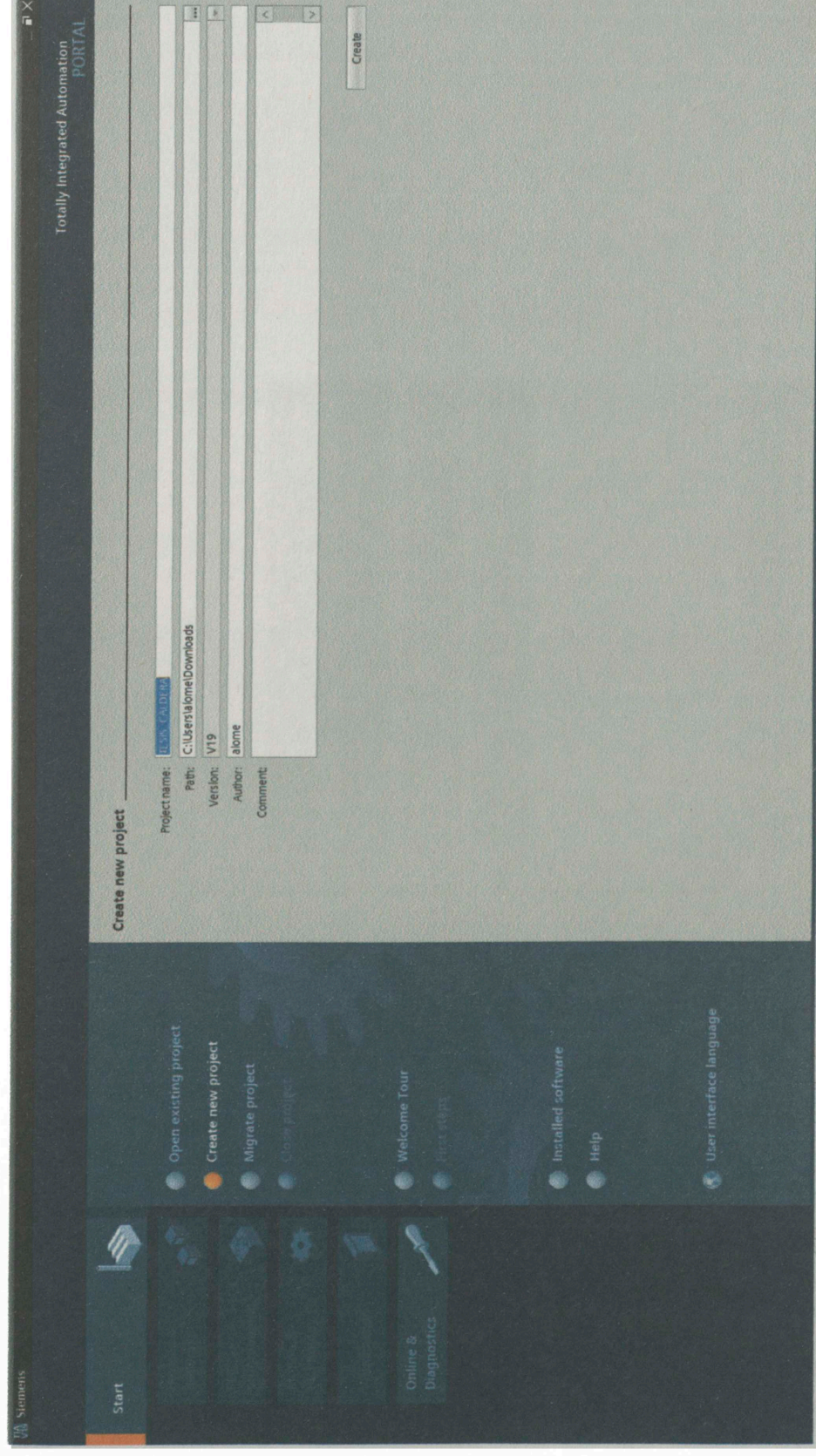


Figura 4: Creación del proyecto en TIA Portal

Fuente: Elaboración propia, 2025



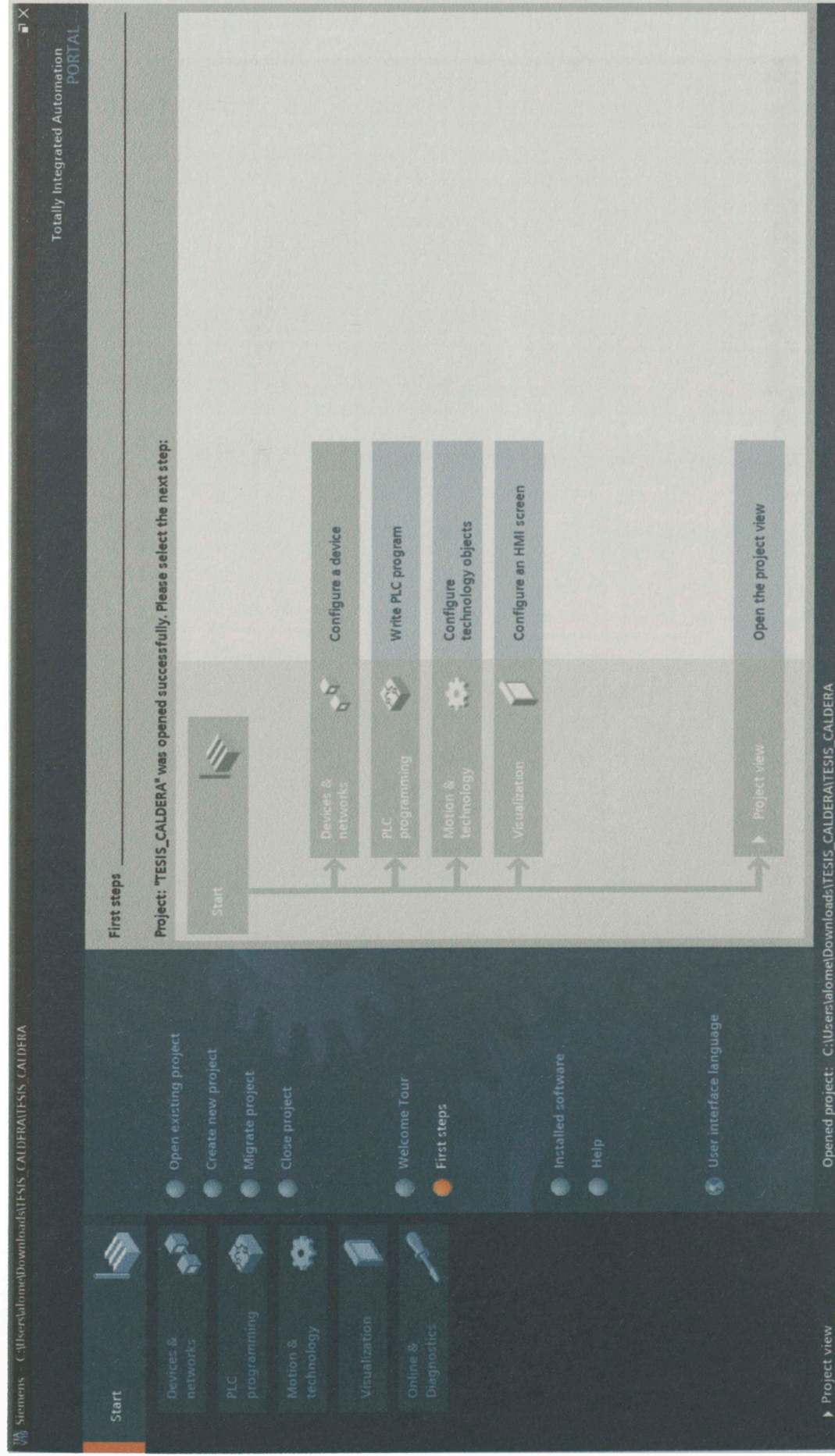


Figura 5: Configuración del dispositivo

Fuente: Elaboración propia, 2025



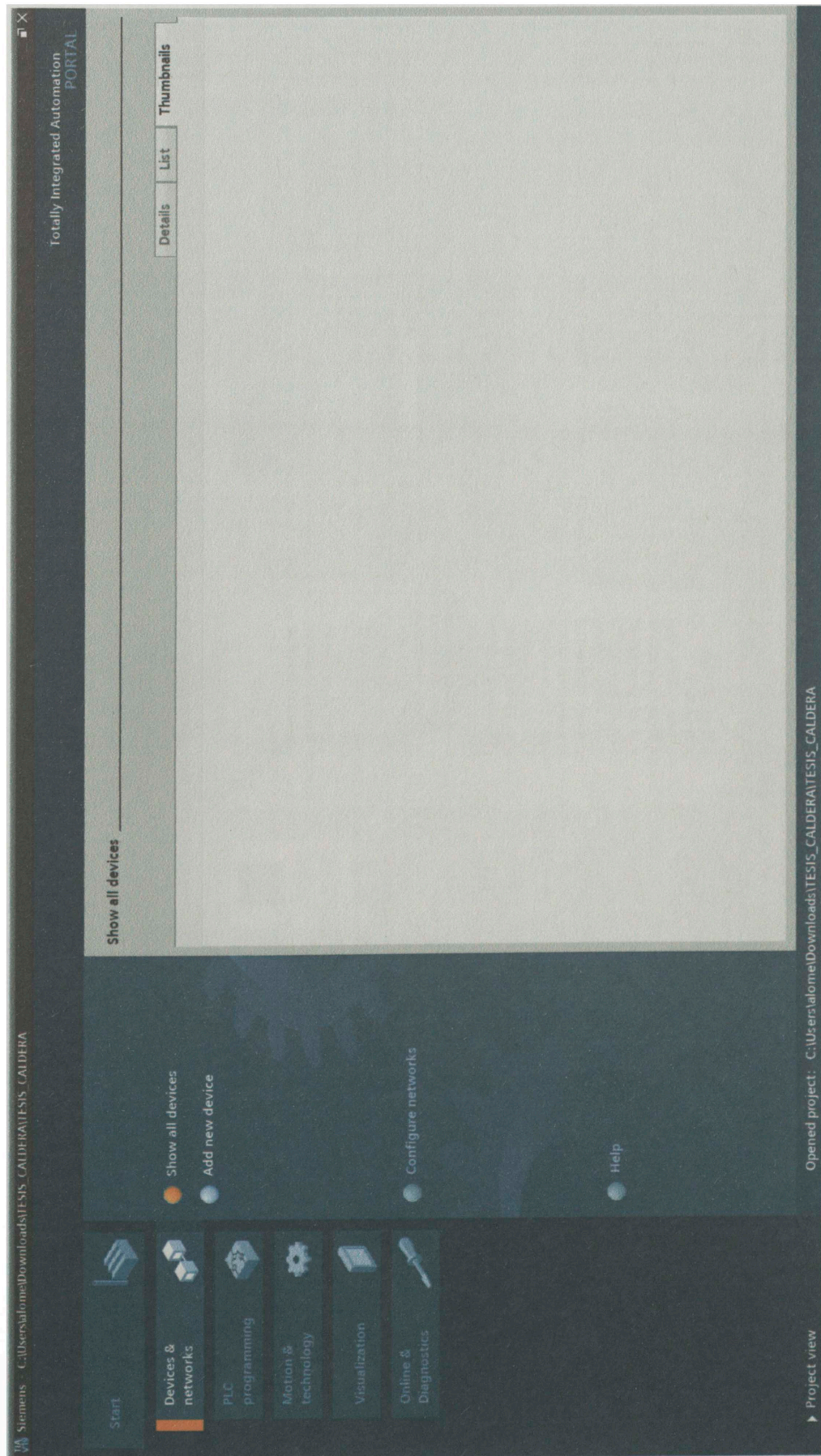


Figura 6: Adición del nuevo dispositivo

Fuente: Elaboración propia, 2025



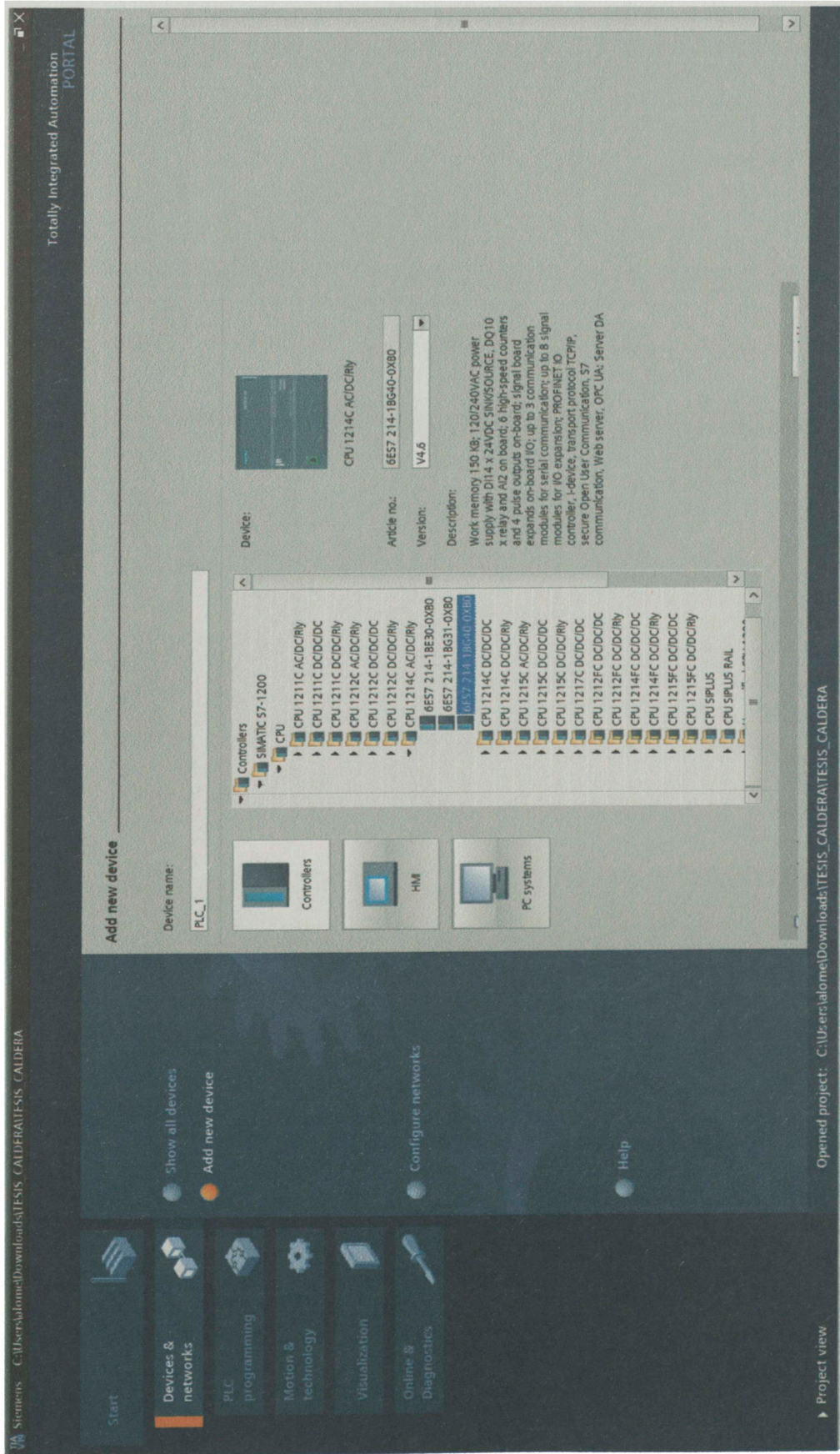


Figura 7: Selección del PLC

Fuente: Elaboración propia, 2025



En este caso deseleccionamos las protecciones a fin de que el software se pueda conectar a los PLC y simuladores: PLC SIM.

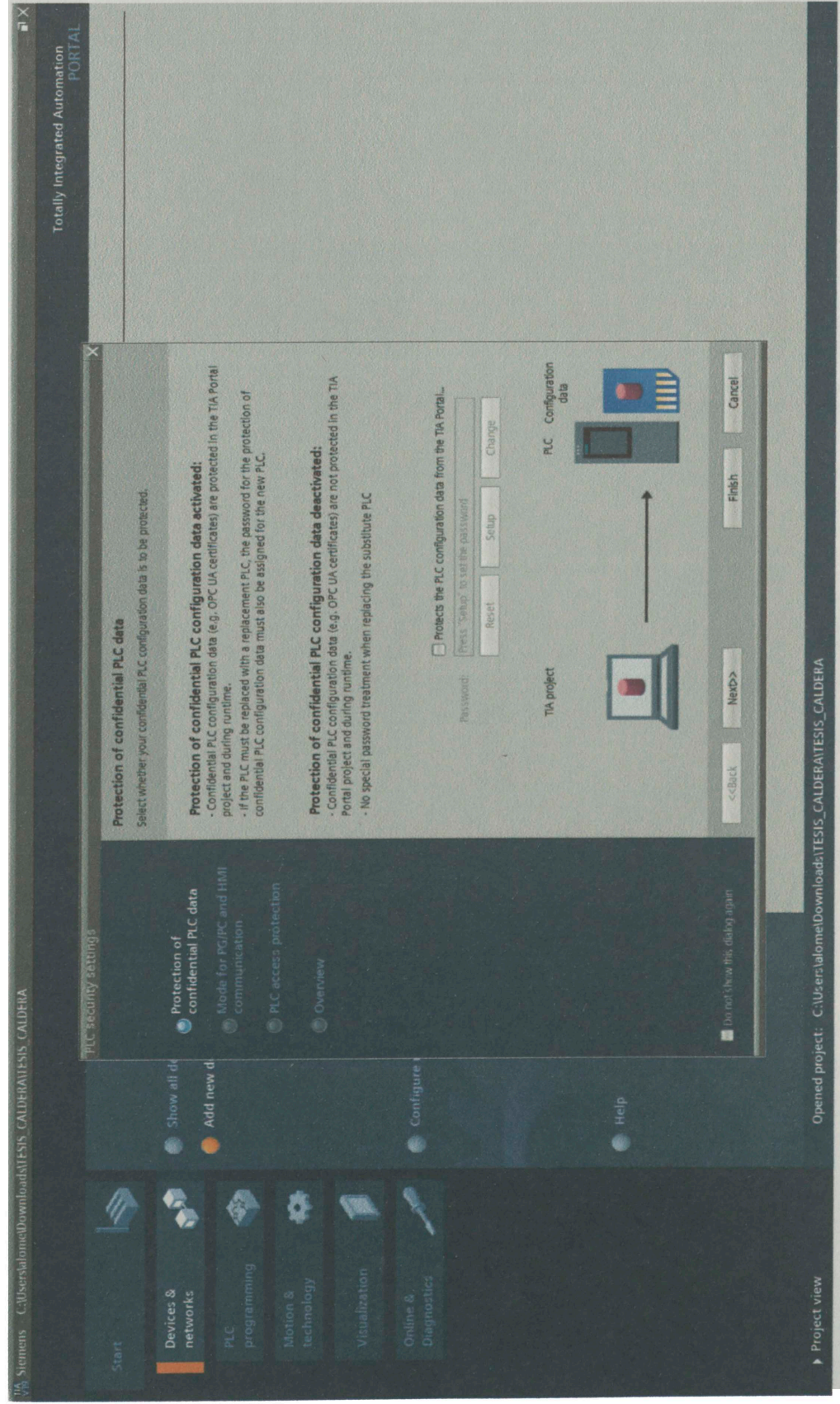


Figura 8: Desprotección del PLC (I)

Fuente: Elaboración propia, 2025



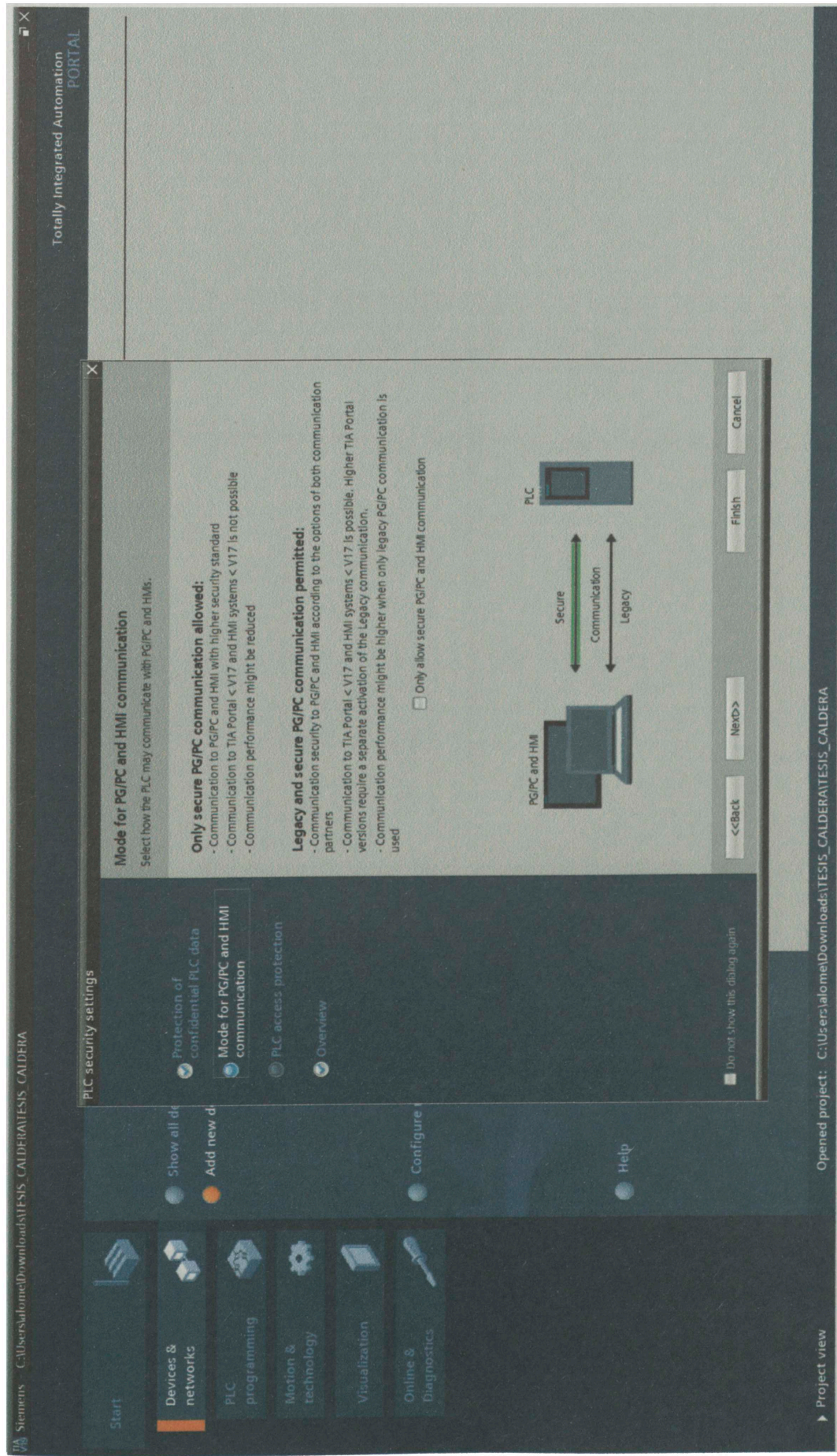


Figura 9: Desprotección del PLC (II)

Fuente: Elaboración propia, 2025



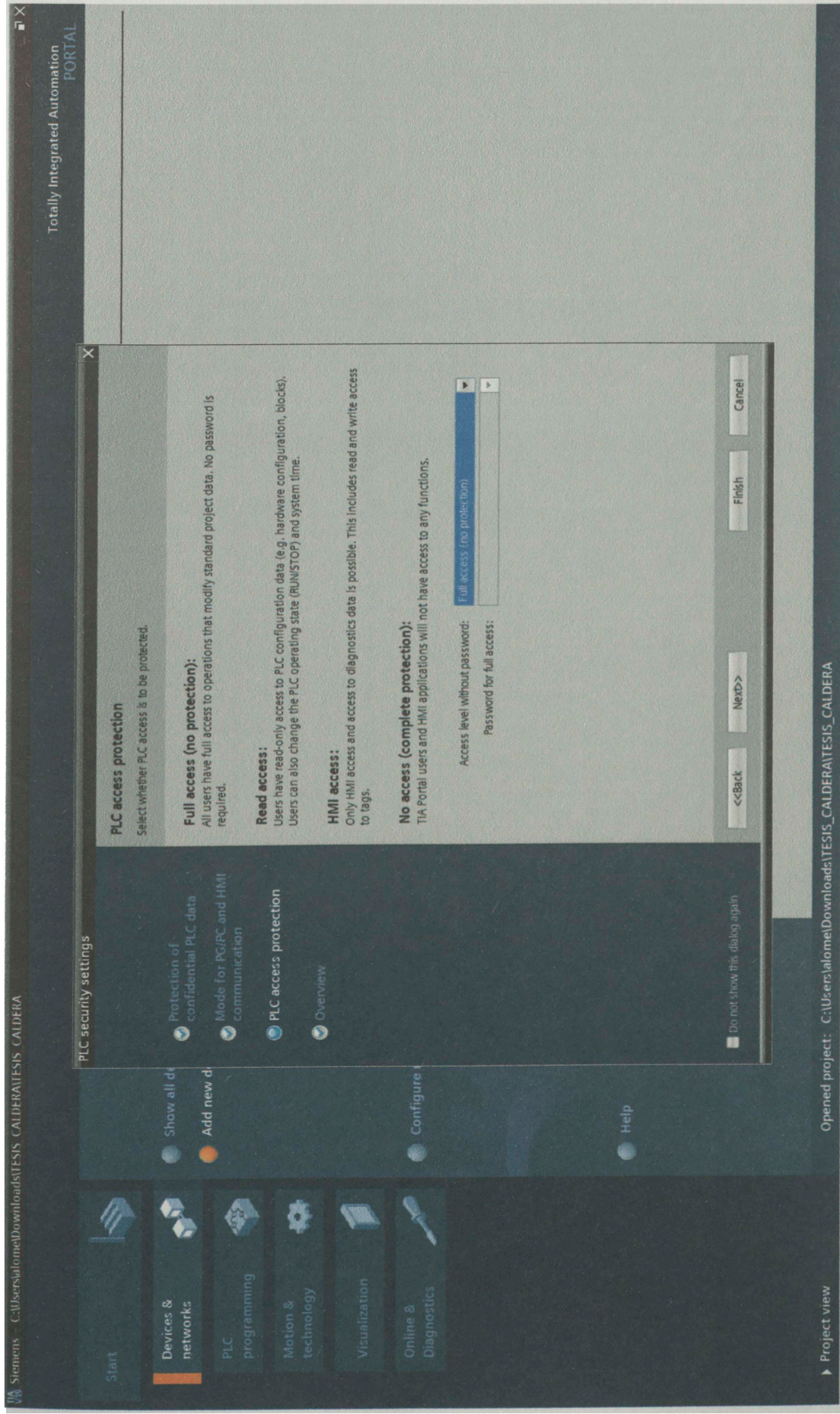


Figura 10: Desprotección del PLC (III)

Fuente: Elaboración propia, 2025



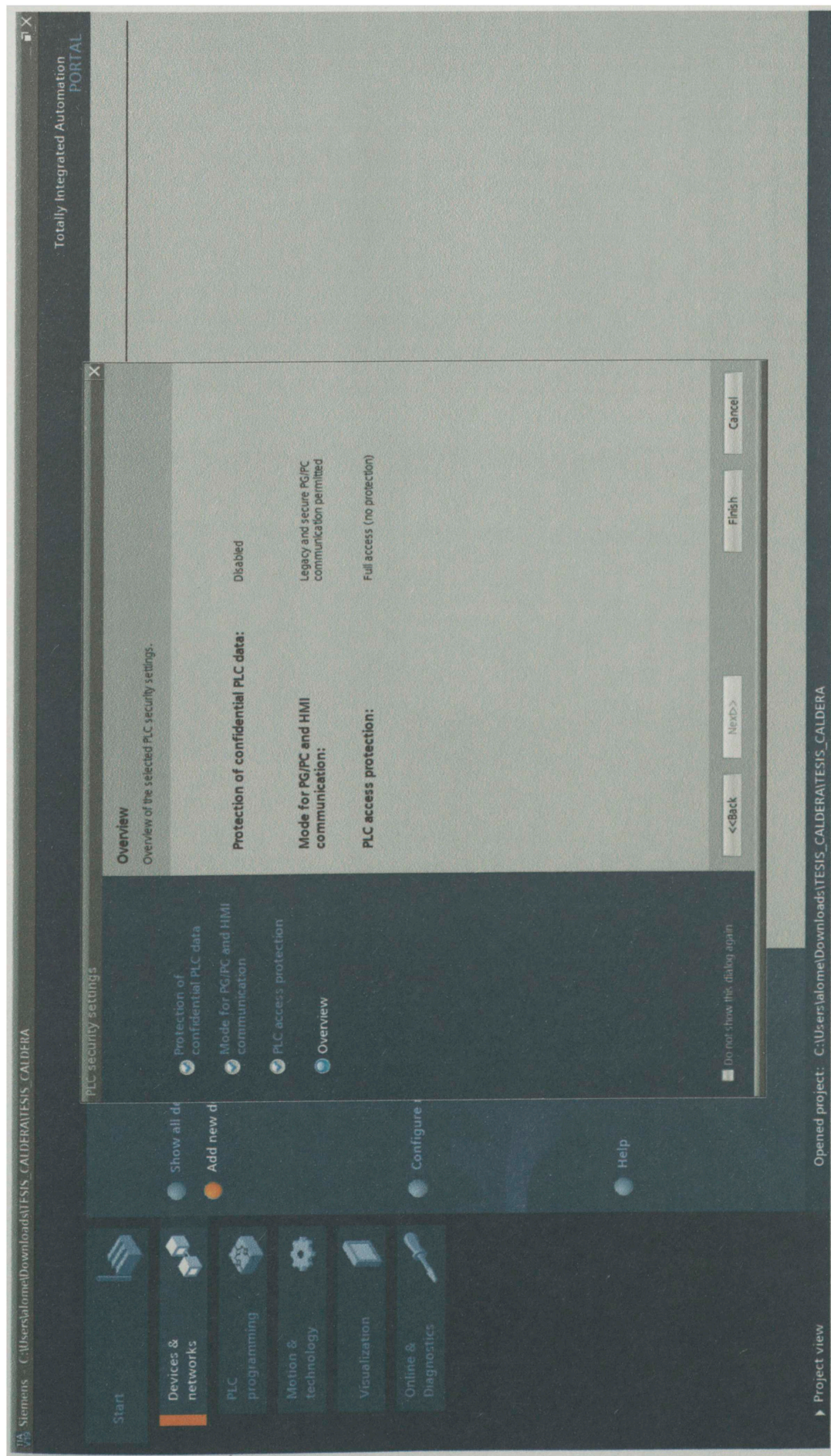


Figura 11: Desprotección del PLC (IV)

Fuente: Elaboración propia, 2025



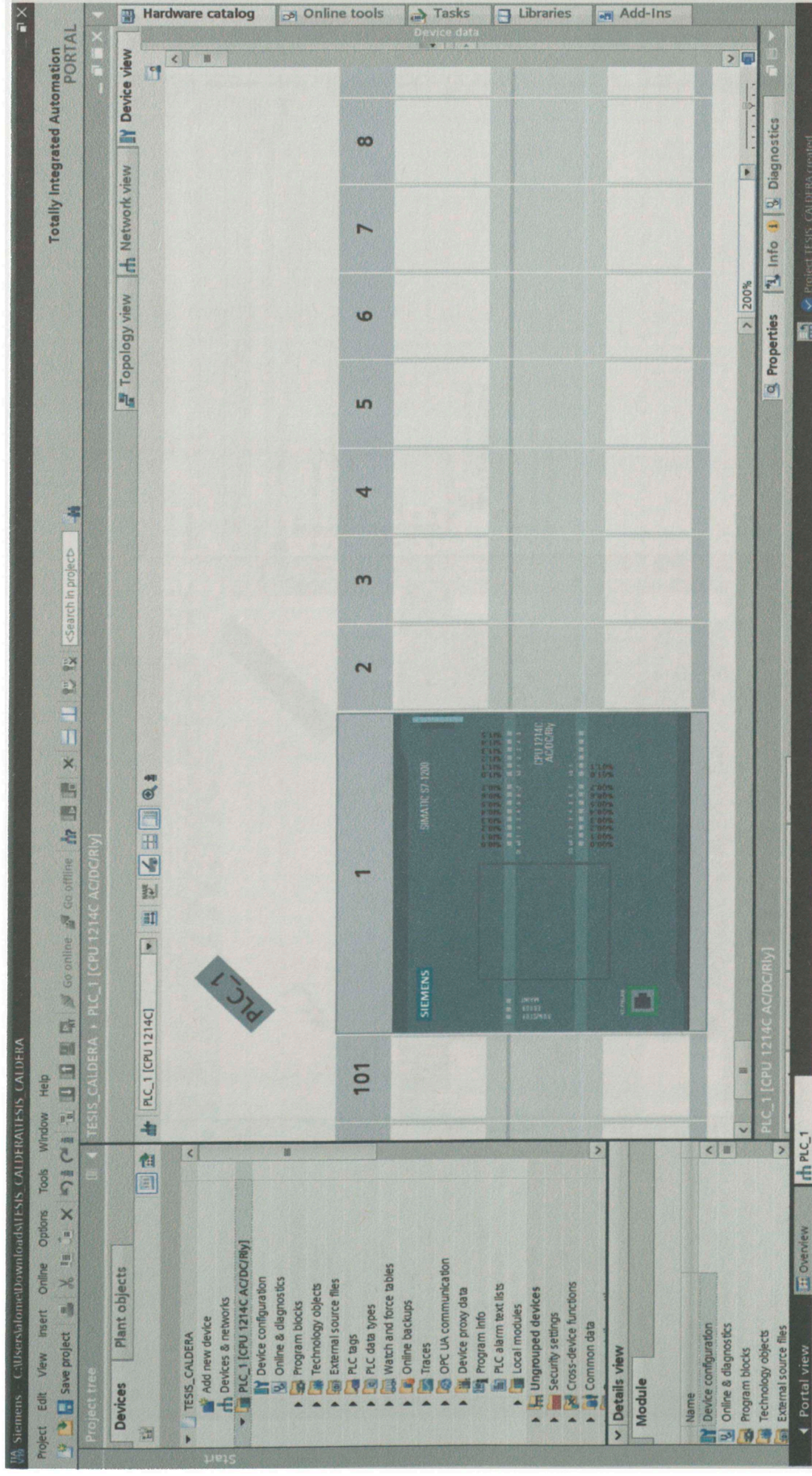


Figura 12: Módulo PLC en TIA Portal

Fuente: Elaboración propia, 2025



En este caso se añadió un módulo de expansión de salidas analógicas ya que este PLC solo cuenta con salidas digitales:

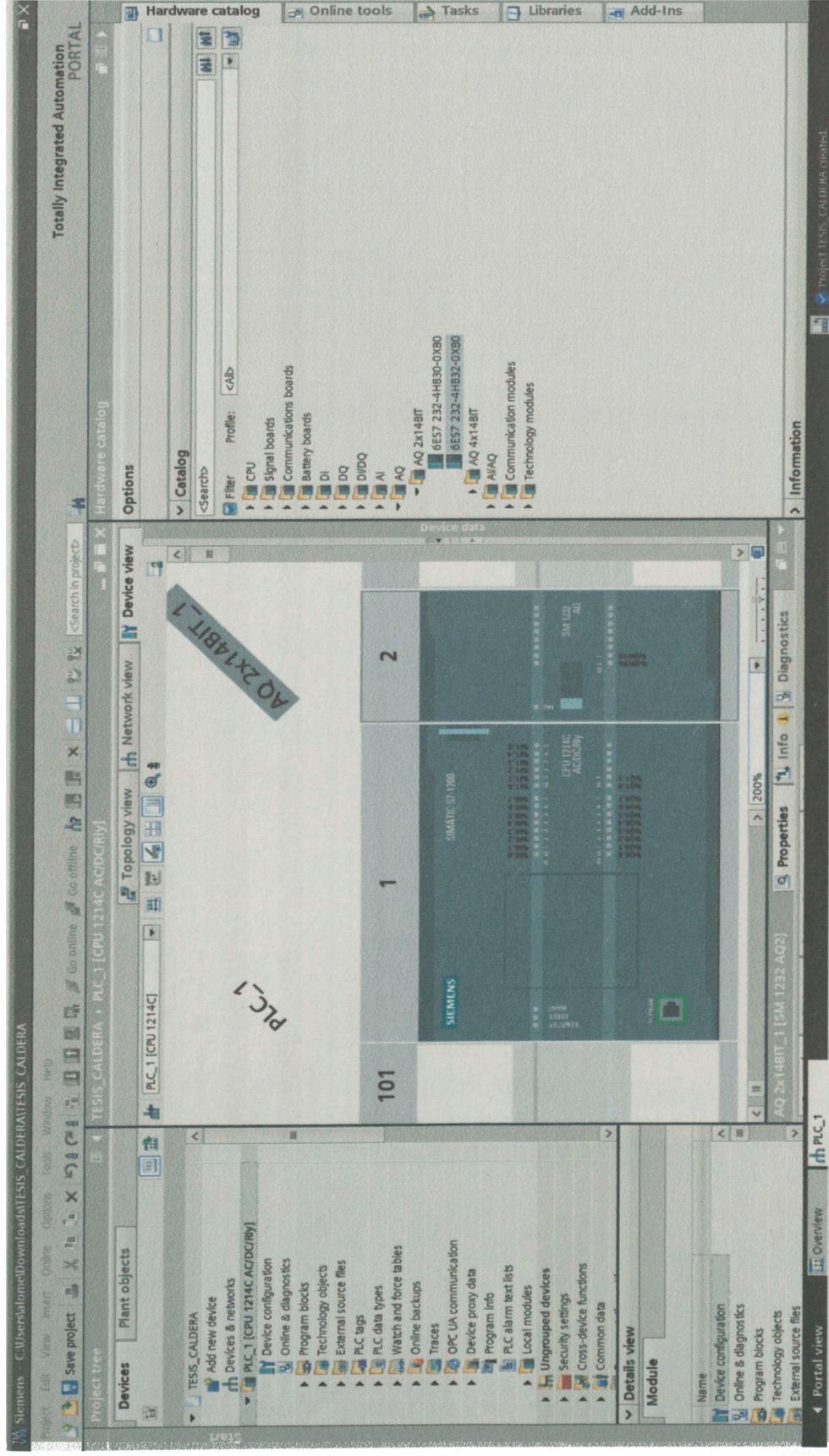


Figura 13: Adición del módulo de expansión

Fuente: Elaboración propia, 2025



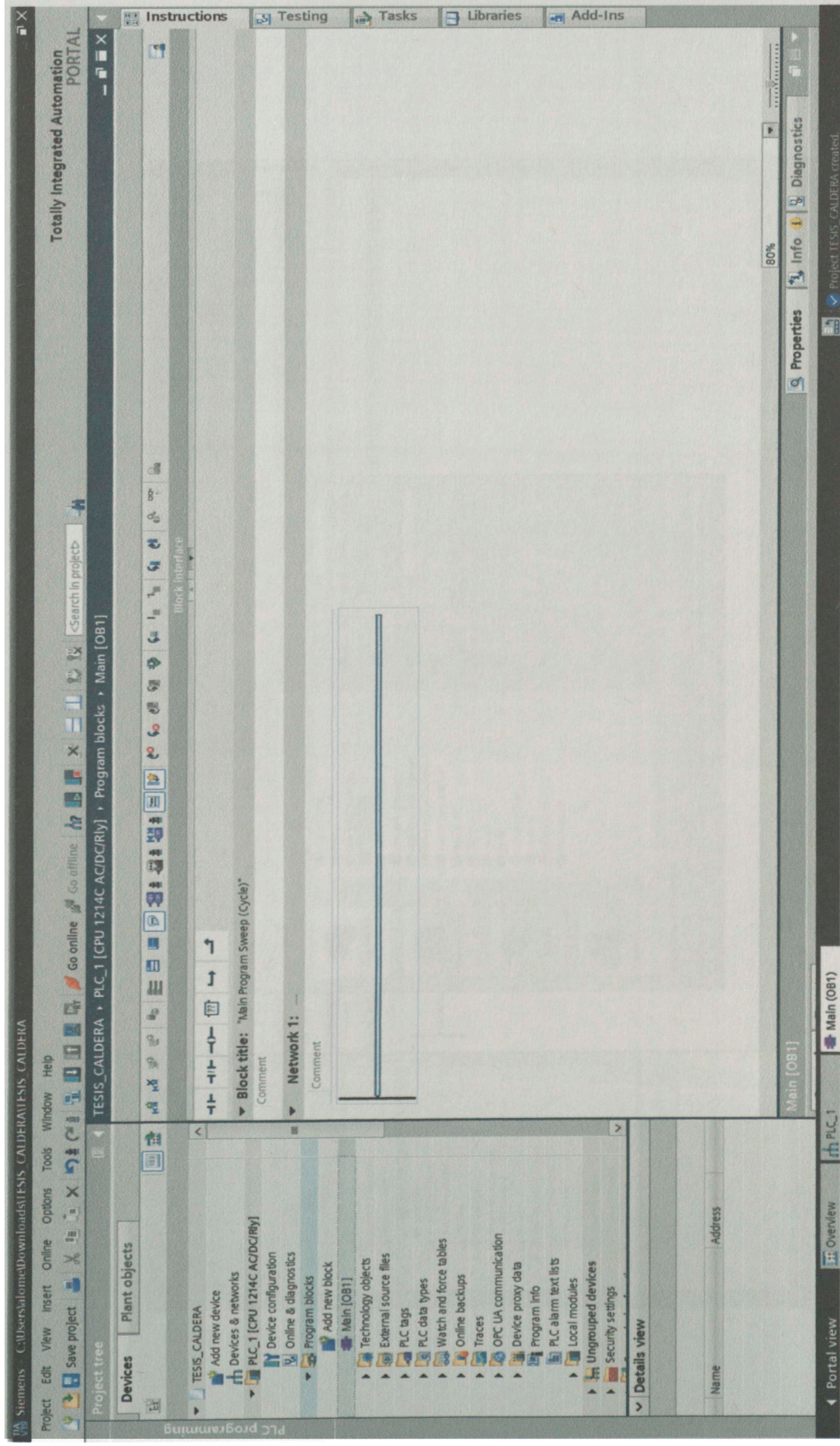


Figura 14: Interfaz del “Ladder” del TIA Portal

Fuente: Elaboración propia, 2025



Según Cam, O. (2020), para la programación insertar un bloque PID en un OB de alarma cíclica. El tiempo de ciclo puede ser configurado. Para nuestro caso se dejó en 100 ms. El PLC considerado fue de la marca SIEMENS y el modelo es S7-1200 CPU 1214C AC/DC/Rly 6ES7 211-1BE40-0XB0 Versión 4.6.

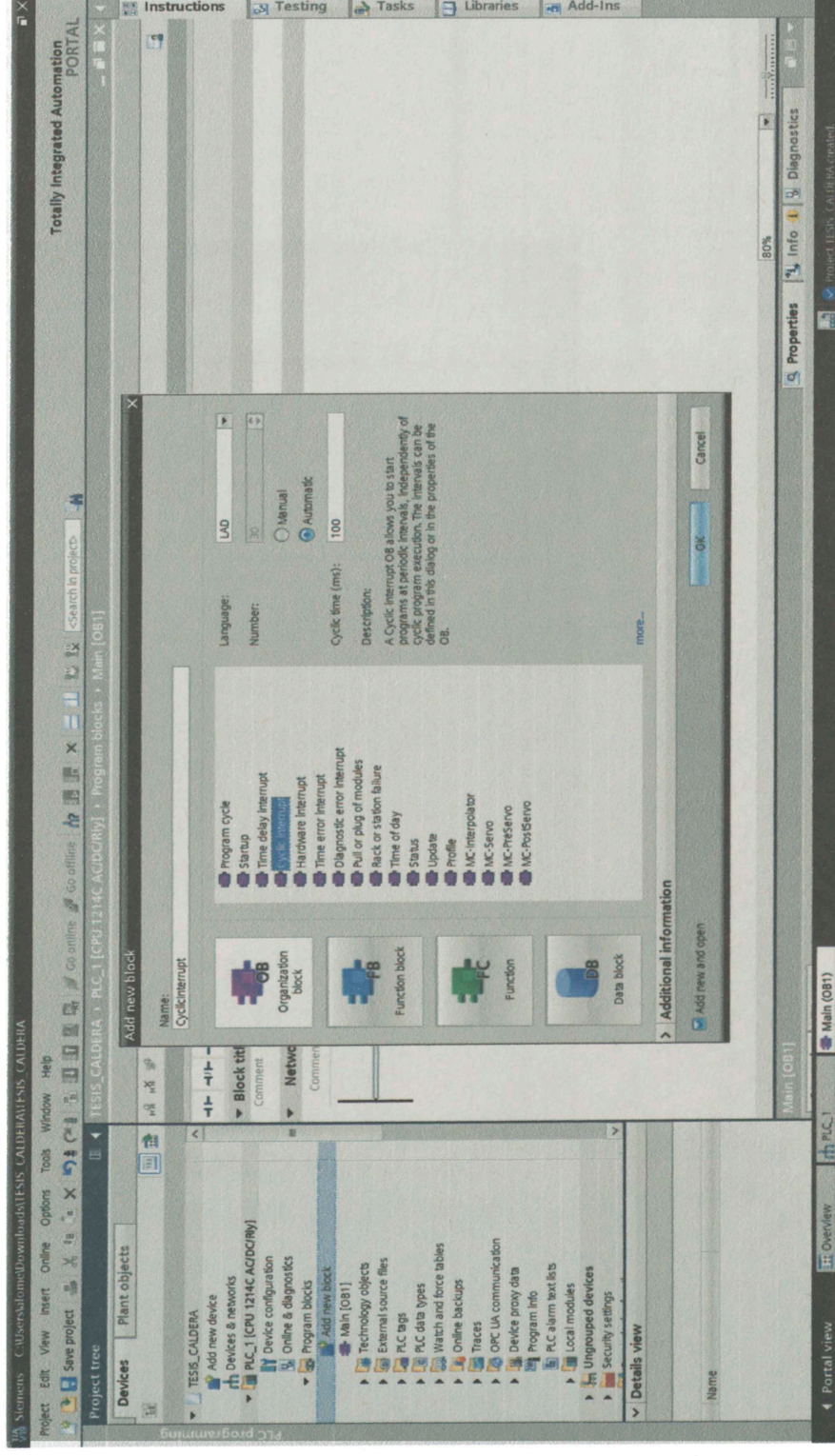


Figura 15: Selección del bloque “Cyclic Interrupt”

Fuente: Elaboración propia, 2025



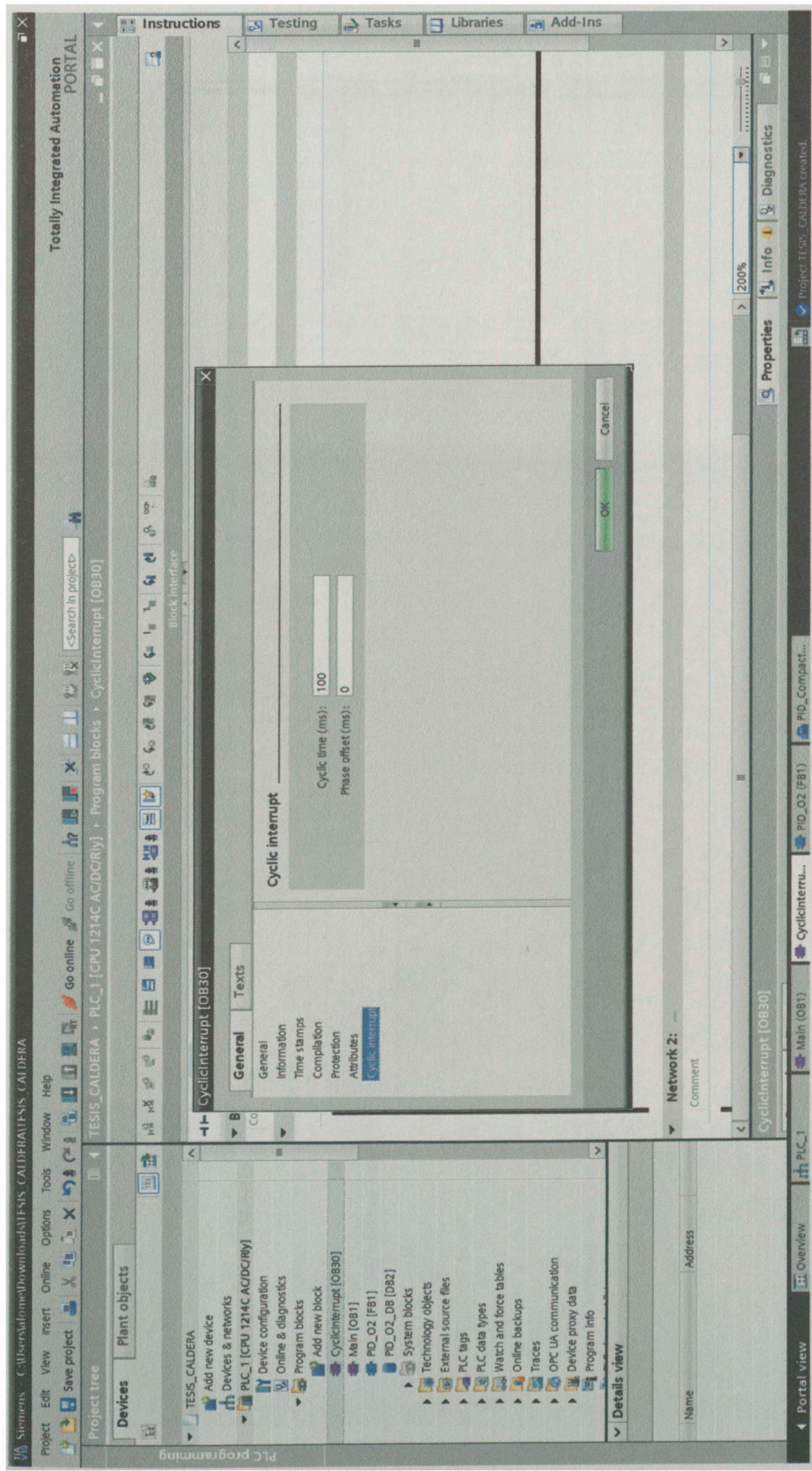


Figura 16: Configuración del tiempo de ciclo del "Cyclic interrupt"

Fuente: Elaboración propia, 2025



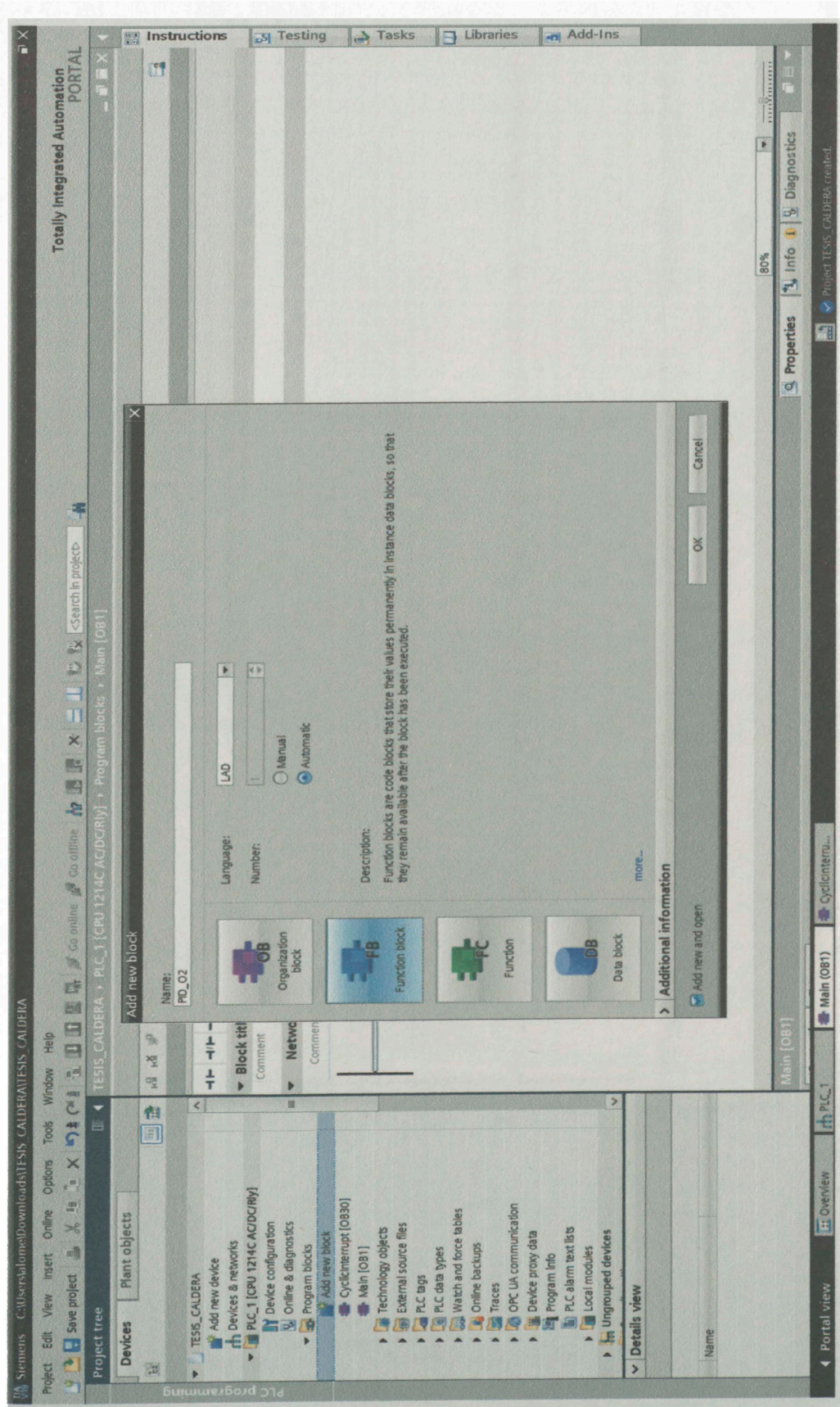


Figura 17: Selección del bloque de función

Fuente: Elaboración propia, 2025





Figura 18: Inserción del bloque de función en el "Cyclic Interrupt"

Fuente: Elaboración propia, 2025



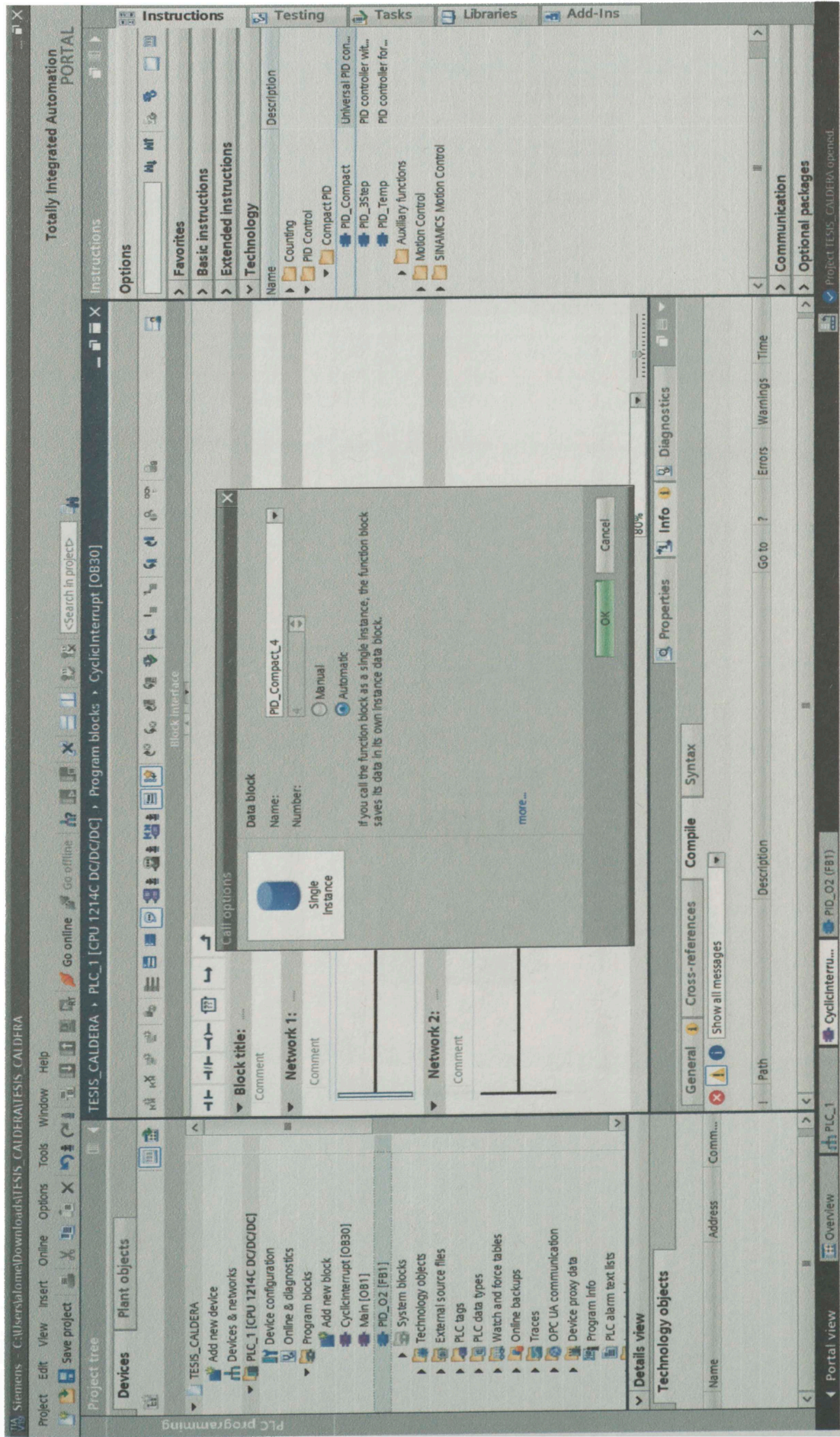


Figura 19: Selección del PID Compact en el bloque de función

Fuente: Elaboración propia, 2025



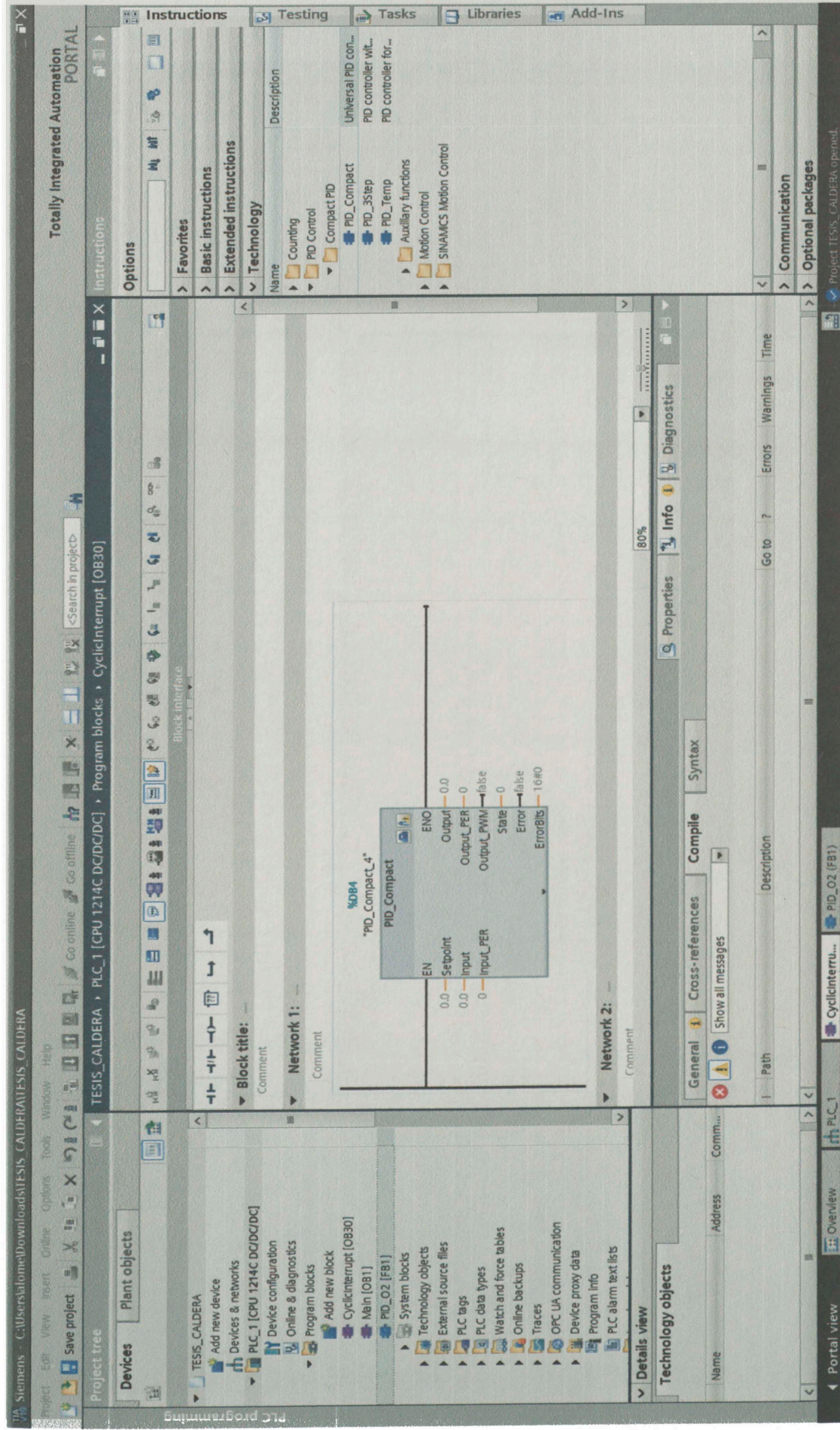


Figura 20: Creación del "PID Compact"

Fuente: Elaboración propia, 2025



Se insertaron las variables IW0.0 y QW0.0 correspondientes a los canales del PLC y módulo de expansión respectivamente

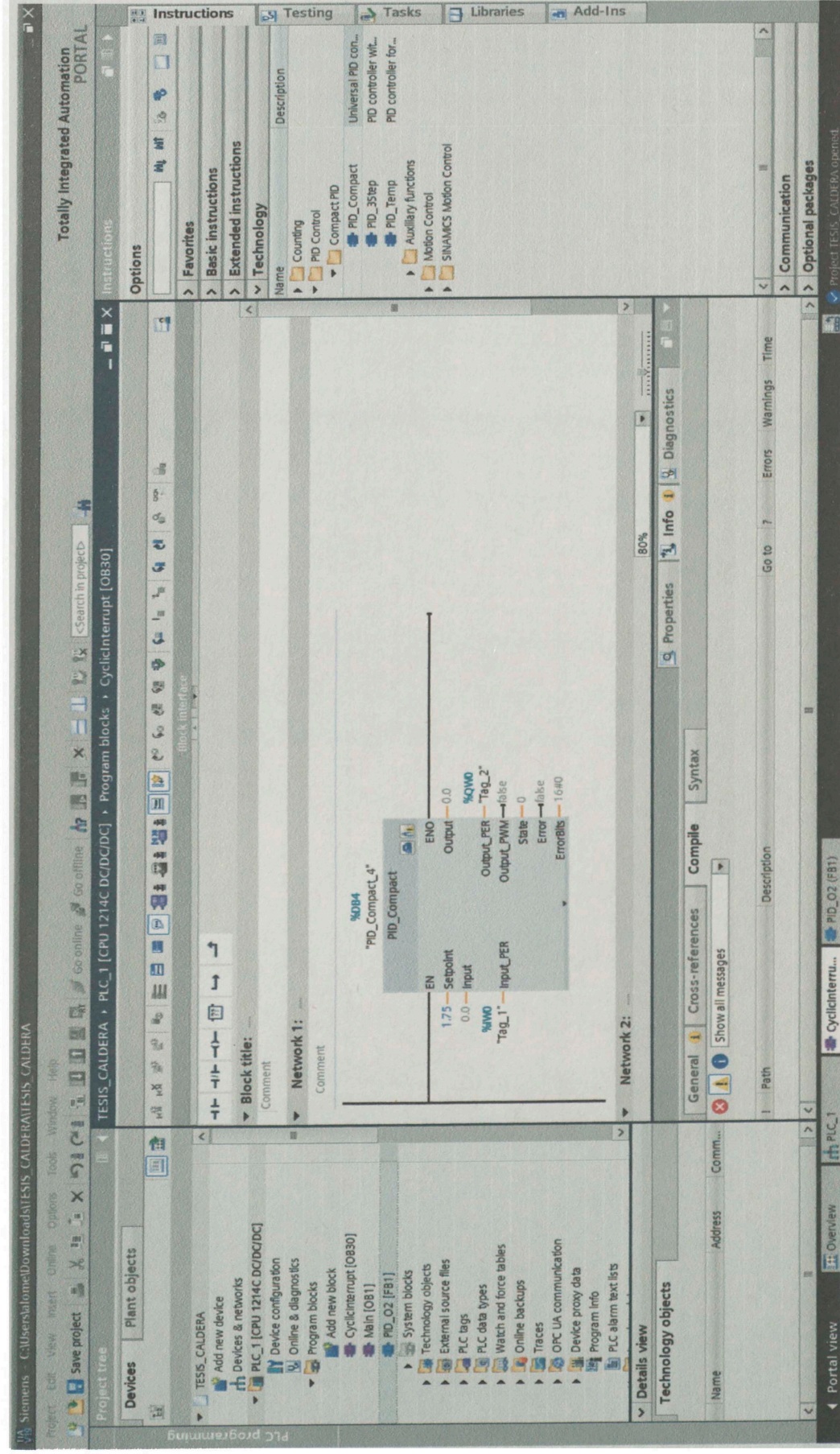


Figura 21: Inserción de las variables en el PID Compact

Fuente: Elaboración propia, 2025



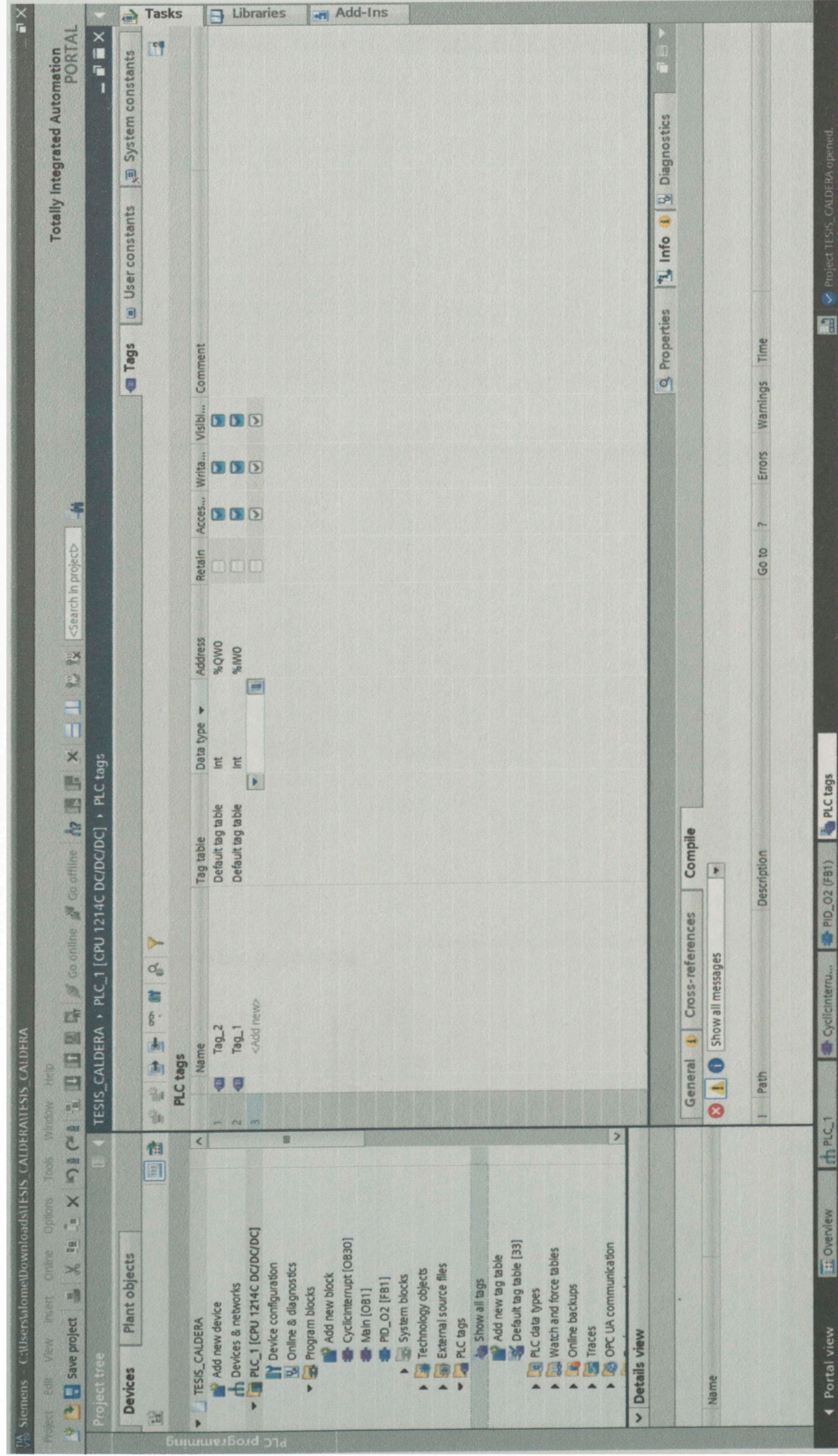


Figura 22: Visualización de las variables

Fuente: Elaboración propia, 2025



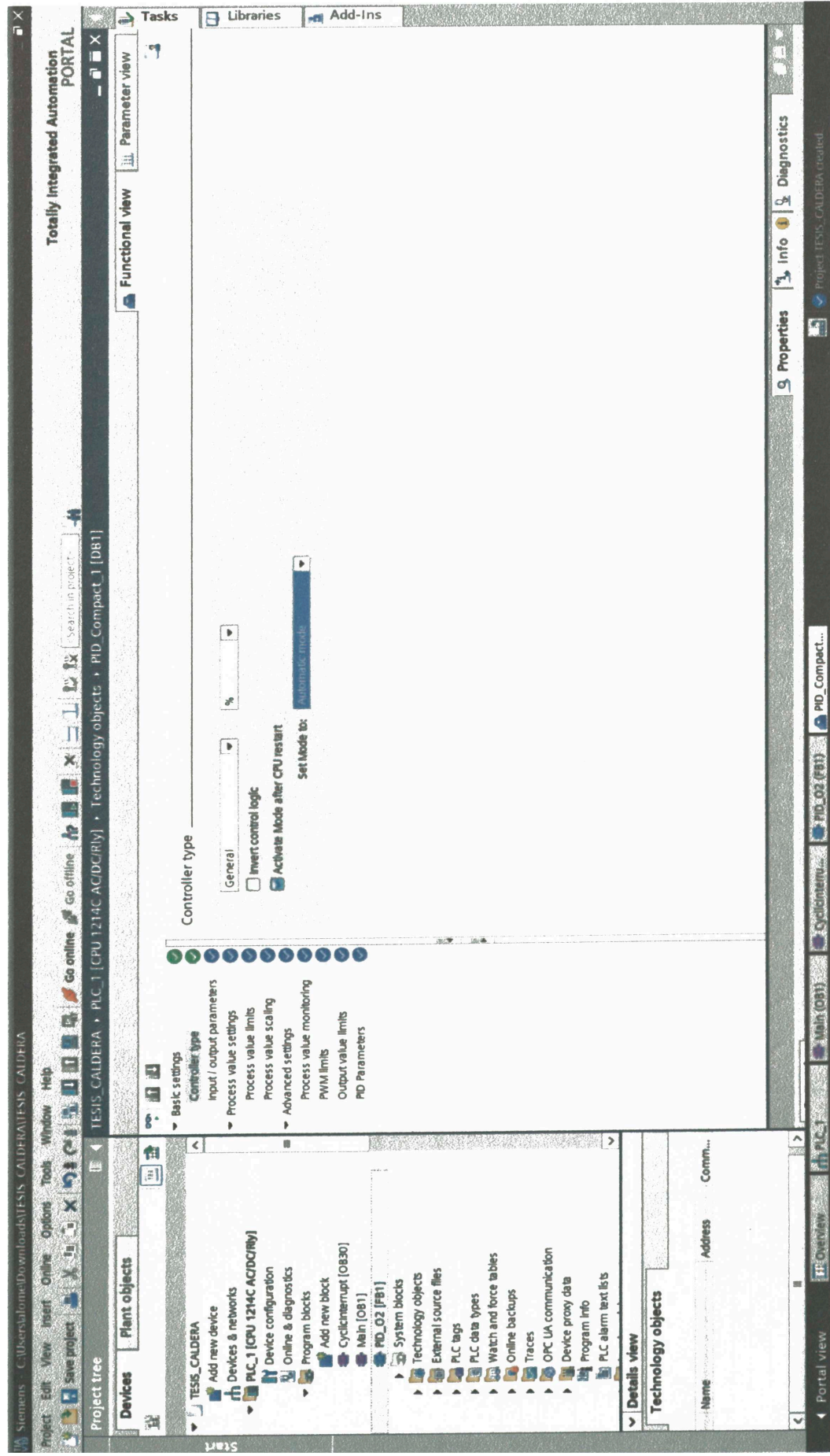


Figura 23: Configuración de la variable de entrada

Fuente: Elaboración propia, 2025



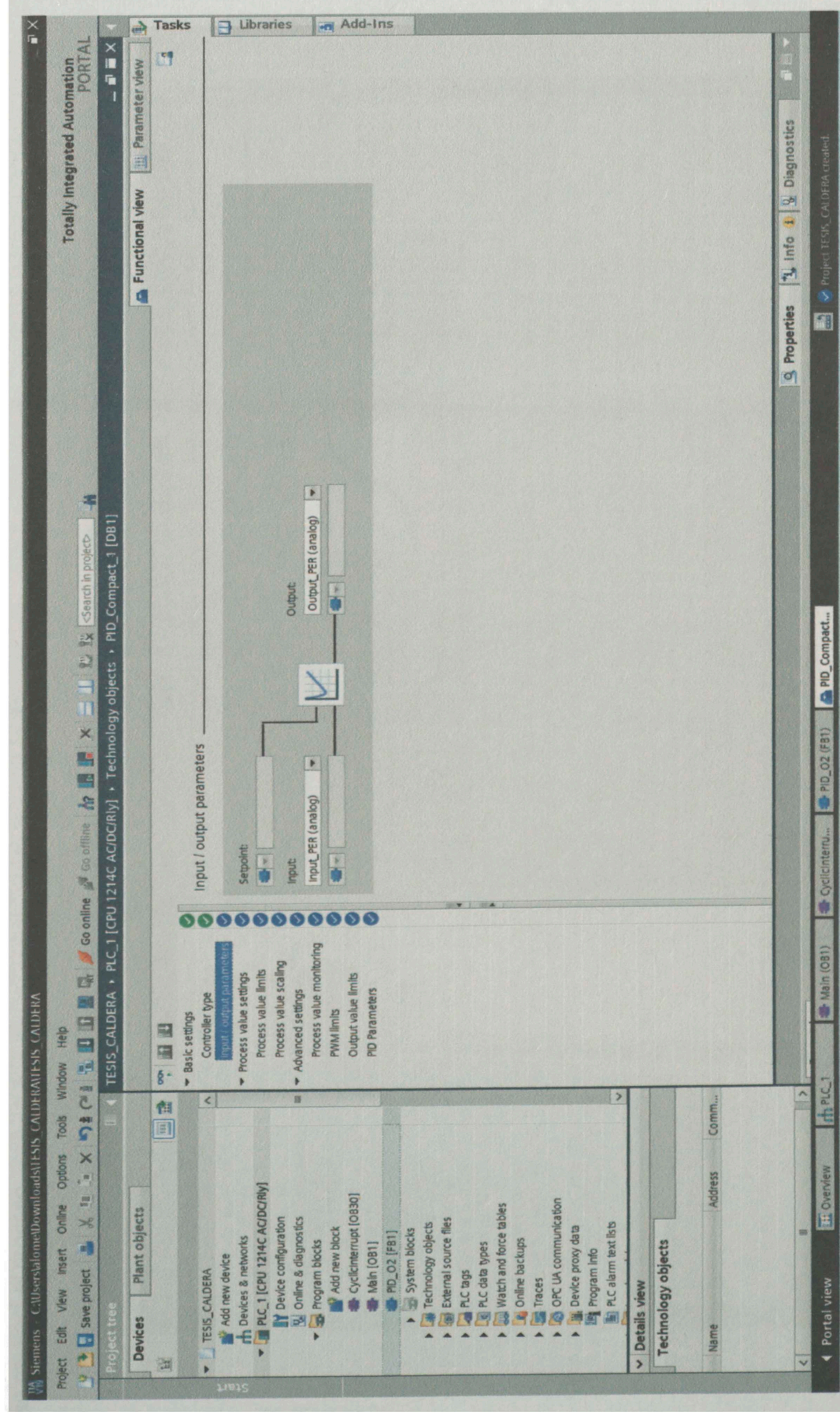


Figura 24: Configuración de las entradas y salidas del PID

Fuente: Elaboración propia, 2025



Se configuraron los límites de la variable controlada de 0 a 95. De esta manera, si la entrada saliese de ese rango, saldría como error y se pausará el proceso.

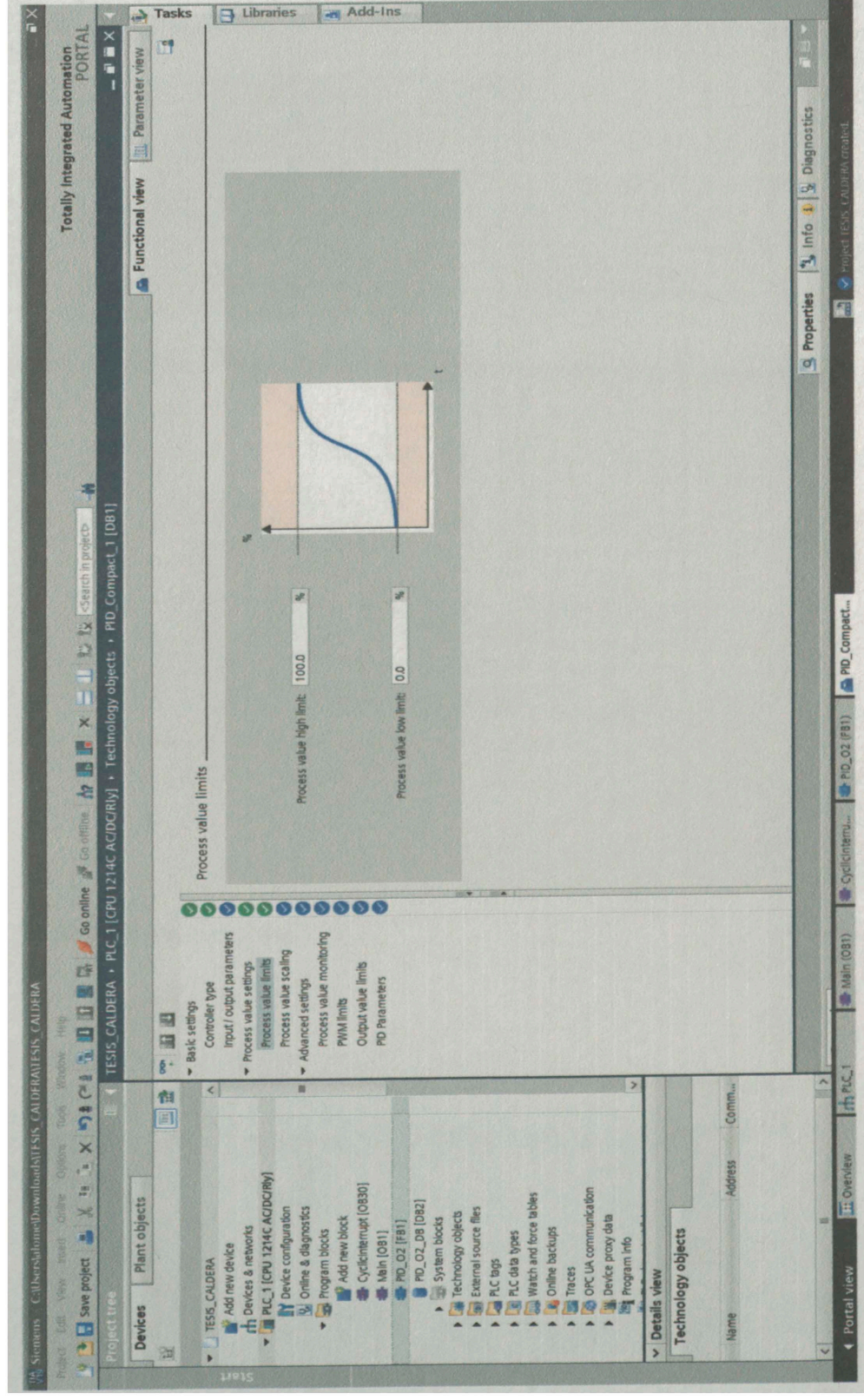


Figura 25: Configuración de los límites de la variable controlada

Fuente: Elaboración propia, 2025



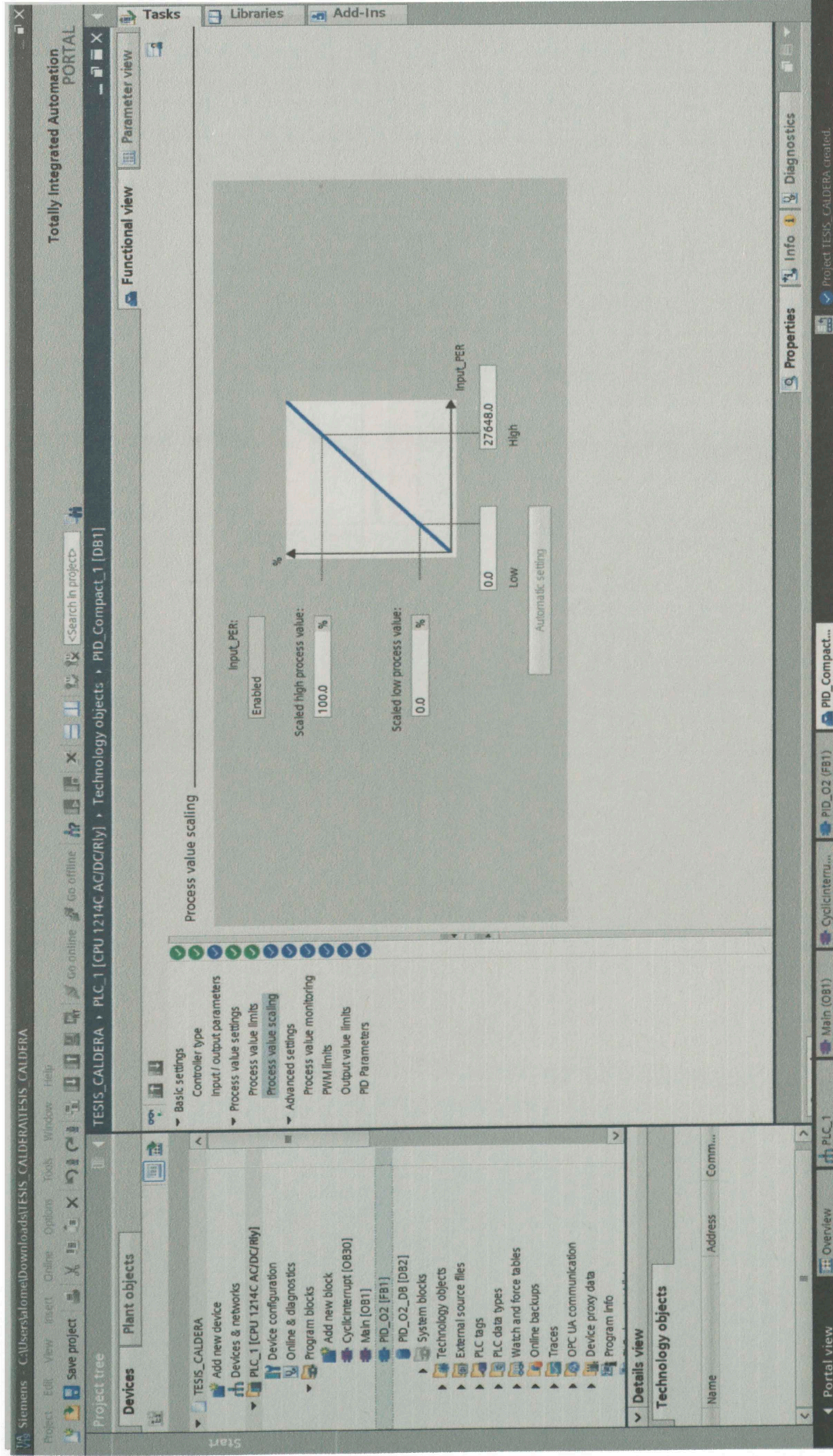


Figura 26: Escalamiento con las cuentas del PLC

Fuente: Elaboración propia, 2025







De manera analoga, se configuró los límites de salida 0 a 95. En otras palabras, la salida del PID nunca saldría de ese rango.

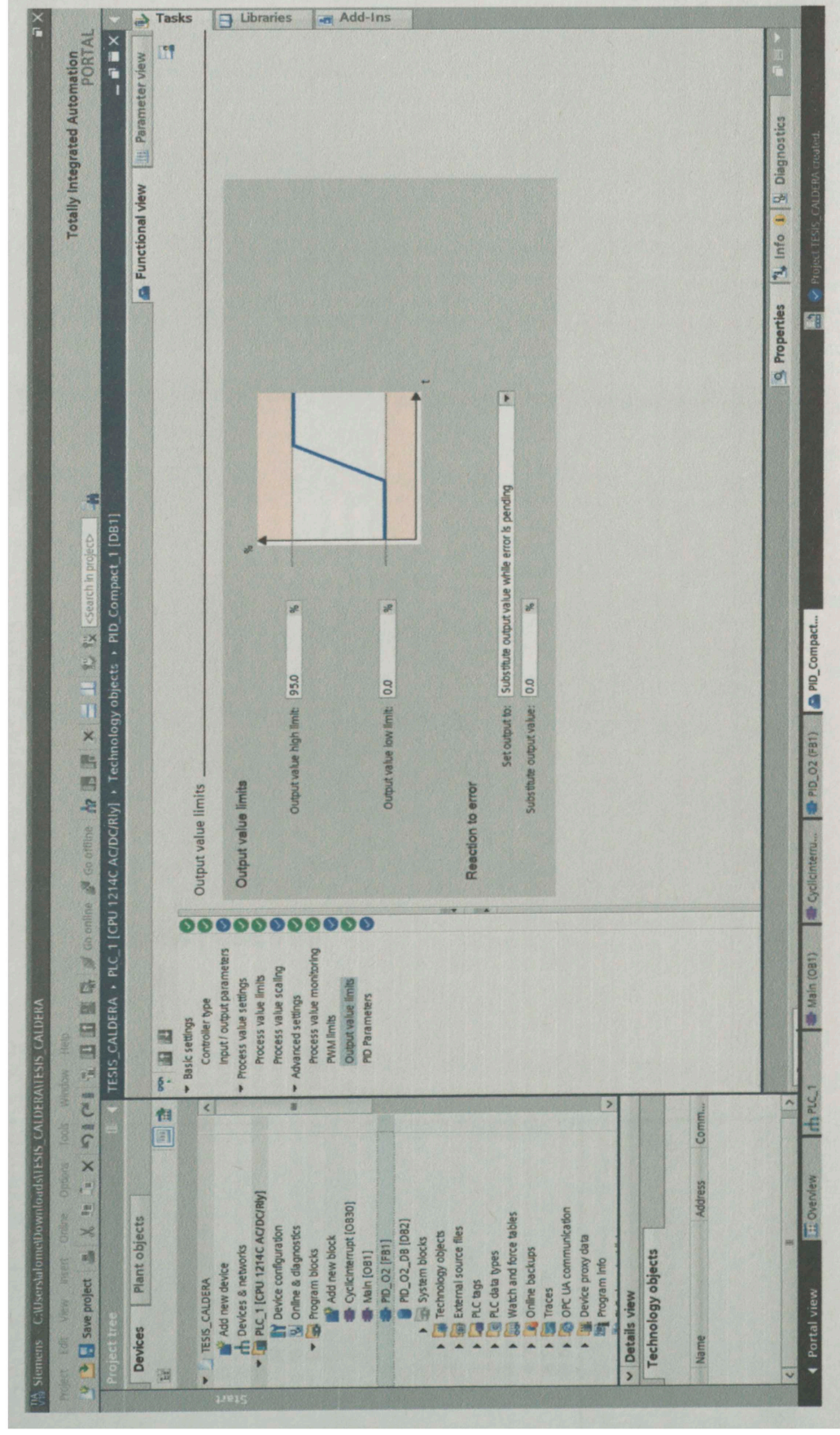


Figura 28: Configuración de los límites del valor de salida

Fuente: Elaboración propia, 2025



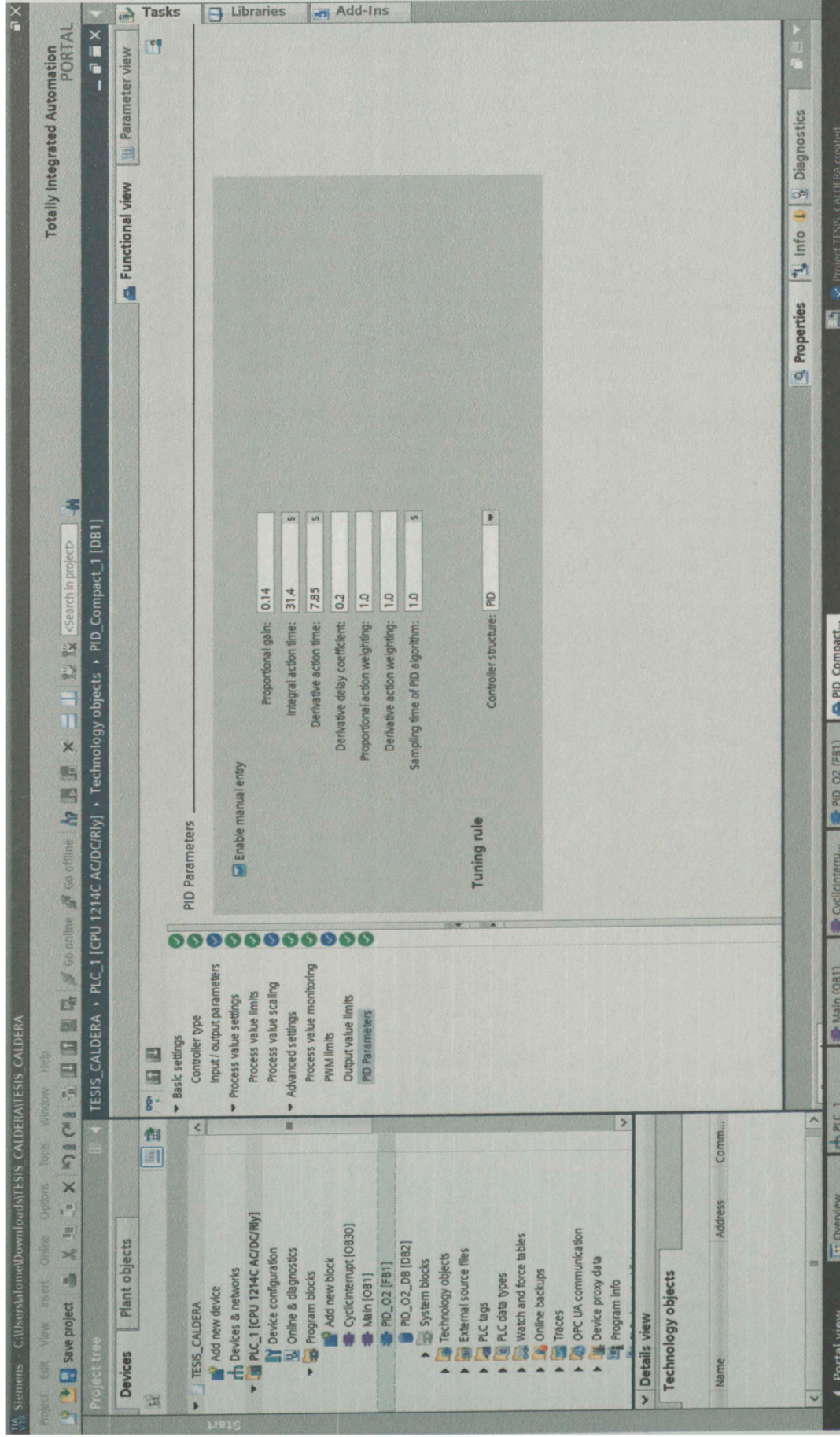


Figura 29: Configuración de los parámetros PID

Fuente: Elaboración propia, 2025



Se procedió a compilar el programa para descartar errores en el ladder

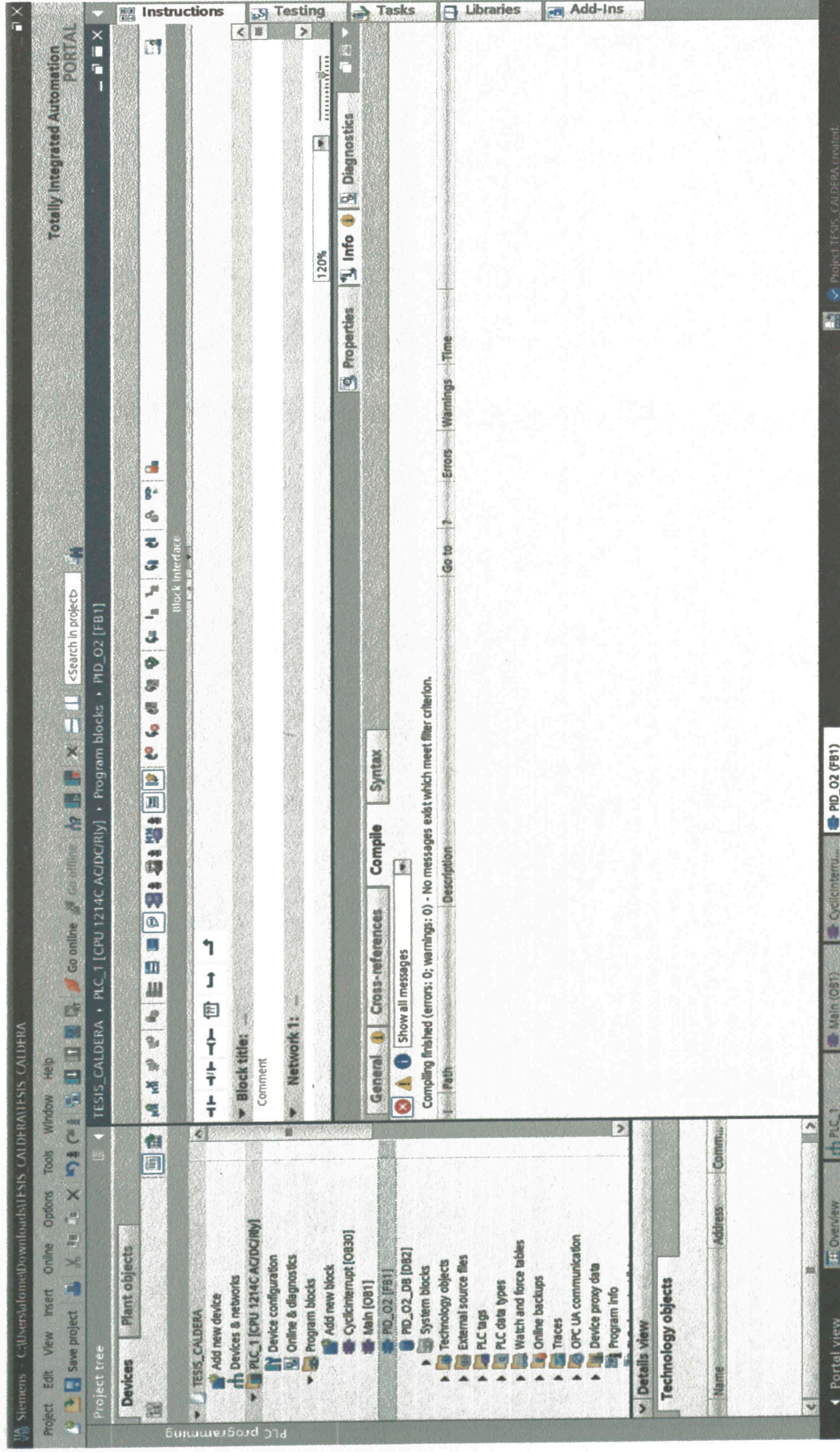


Figura 30: Compilación del programa

Fuente: Elaboración propia, 2025



Adicionalmente, se realizó la simulación de variables con Python-3.13.7 así como de Visual Studio Code para ejecutar los códigos.

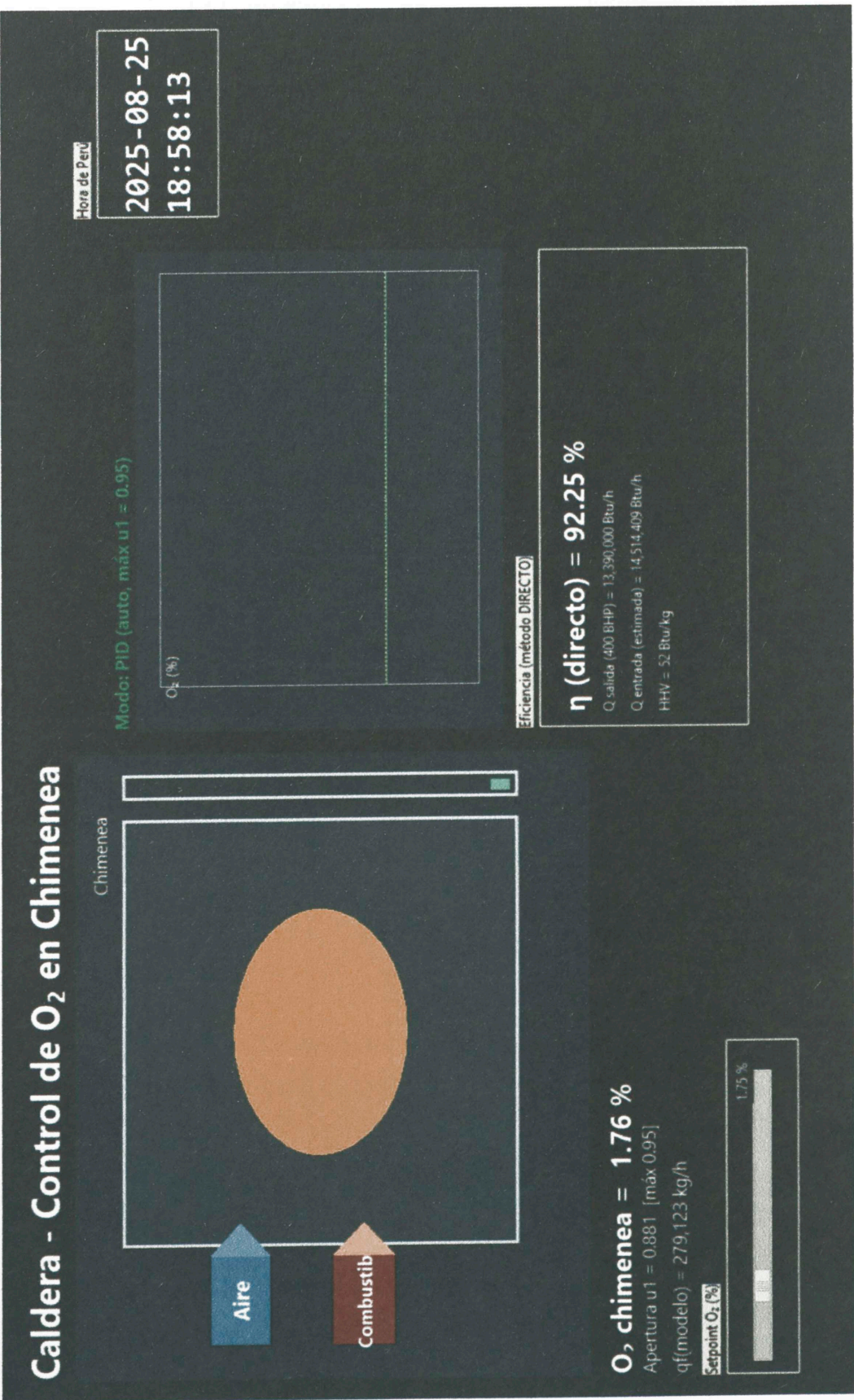


Figura 31: Simulación de variables la caldera en Python con PID

Fuente: Elaboración propia, 2025



Del código anterior se quitaron los parámetros PID y se mostraron las variables obtenidas



Figura 32: Visualización de variables de la caldera en Python sin PID

Fuente: Elaboración propia, 2025

De la visualización de las variables de la caldera sin control PID; es decir, sin la respuesta a la válvula de combustible, se obtuvo una eficiencia térmica de alrededor de 85%. Por otro lado, al incluir en la simulación los parámetros PID como acción directa hacia la válvula de control de combustible, se obtuvo una eficiencia térmica alrededor de 92%. En otras palabras, hubo un incremento de 7% en este parámetro.

### **Selección de equipos**

Los equipos y/o software para usar para este proyecto fueron los siguientes:

- PLC
- HMI
- Medidor de eficiencia térmica
- Python/ Visual Studio Code
- TIA Portal

Los PLC S7 1200 presentan diversos modelos: CPU 1211C, CPU 1212C y CPU 1214C. Asimismo, cada uno de los modelos también tiene la posibilidad de añadirles módulos de extensión en entradas y salidas. El PLC que se consideró fue de la marca Siemens de modelo S7-1200 CPU 1214C AC/DC/Rly 6ES7 214-1BG40-0XB0. La versión de Firmware fue de 4.4. Asimismo, se tomó en cuenta también los módulos de señal de expansión. El HMI que se consideró fue el 6AV2123-2DB03-0AX0 Simatic Hmi, Ktp400. Para la medición de oxígeno se consideró el analizador de gases testo 350. En cuanto a los softwares, se utilizaron Visual Studio Code, Pythom 3.1.3.7 y TIA Portal V19. Se adjunta el presupuesto considerando los equipos mencionados.



Tabla 5: Presupuesto del sistema de control PID

| Ítem  | Descripción del material                                | Costo total US\$ |
|-------|---------------------------------------------------------|------------------|
| 1     | PLC 1200 SIEMENS + Módulo de expansión + HMI<br>SIEMENS | 1750             |
| 2     | Licencia Software TIA Portal V19                        | 460              |
| 3     | Analizador de gases Testo + accesorios                  | 10254            |
| Total |                                                         | 12464            |

Fuente: Elaboración propia, 2025

### Evaluación económica

Para la evaluación económica se hizo uso de la relación beneficio costo como indicador.

### Relación costo beneficio

La relación costo beneficio está definida por el cociente entre el valor actual de los ingresos totales netos (VAI) y el valor actual de los costos de inversión (VAC) (Jacóme & Carvache, 2017).

$$\frac{B}{C} = \frac{VAI}{VAC} \quad (3.50)$$

El ingreso total neto anual se calculó a partir de la diferencia monetaria de consumo de gas natural con y sin PID:

$$\text{Ingreso total neto} \quad (3.51)$$

$$= \frac{(300875 - 279230)kg}{h} * 8h * 300$$

$$* \left( \frac{\$ 3.8331}{1000000BTU} \right) \left( \frac{9.667kcal}{Nm^3} \right) \left( \frac{Nm^3}{0.737kg} \right) 3.9683BTU/kcal$$

$$\text{Ingreso total neto en el año 1} = \$10364 \quad (3.52)$$

$$\text{Ingreso total neto en el año 2} = \$10364 \quad (3.53)$$

## Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

- Los parámetros PID que se obtuvieron por el método de respuesta a la frecuencia de Ziegler-Nichols fueron de  $K_p = 0.14$  y  $T_i = 31.4$  y  $T_d = 7.85$ . Como para la última frecuencia se consideró un valor cercano al inicio de la gráfica, tanto  $T_i$  como  $T_d$  son valores que se pueden aún ajustar. Por otro lado, como la ganancia o dependía significativamente de la última frecuencia, este resultó ser un valor que más se ajusta al proceso al indicar una respuesta lenta. Asimismo, estos valores al ser insertados en la simulación con Python tuvieron una respuesta estable en el proceso a lo largo del tiempo.
- El resultado obtenido de la eficiencia térmica con el control de oxígeno fue de 92% en la simulación en Python, lo que supuso un aumento de 7% respecto al 85% obtenido sin dicho control. Este incremento se condice con la literatura reportada respecto a la determinación de eficiencia térmica en calderas. Por ejemplo, de acuerdo con (Gearo, 1983), las pérdidas de eficiencia oscilan entre 20 y 25%, lo cual supone una eficiencia térmica entre 75 y 80%. De esta manera, mediante el diseño de protocolos de automatización, se puede apreciar corroborar el incremento en más del 5% en la eficiencia térmica.



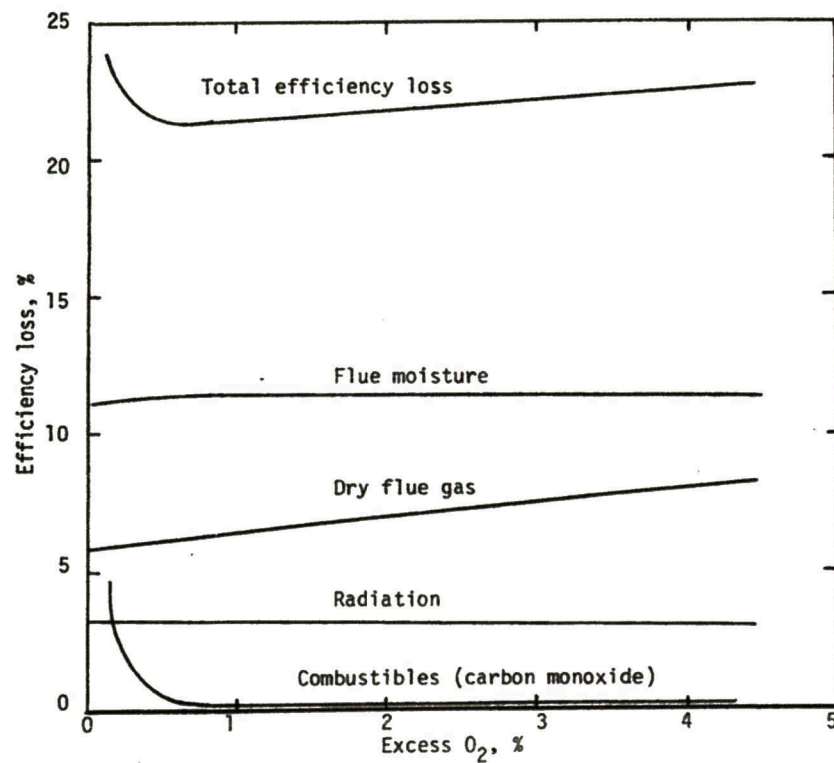


Figura 33: Pérdidas de eficiencia térmica

Fuente: (Gearo, 1983)

- El incremento de la eficiencia térmica conllevó a una reducción en el consumo de combustible, lo cual se tradujo en un beneficio monetario anual de \$10364 considerando gas natural.
- Teniendo en cuenta que el costo de inversión fue de \$12464, a partir del segundo año fue que se recuperó lo invertido inicialmente (\$20728). Esto significó una relación beneficio costo de 1.7 considerando los dos primeros años.

## Conclusiones

- La función de transferencia obtenida a partir del análisis dinámico mostró un polinomio característico con raíz negativa, lo cual evidenció la estabilidad del proceso.
- Los parámetros PID obtenidos por el método de Ziegler-Nichols al ser insertados en la simulación en Python reflejaron la estabilidad del proceso, con lo cual se concluye que es posible controlar el porcentaje de oxígeno a la salida de la chimenea y por consiguiente obtener una mejora en la eficiencia térmica.
- El control de oxígeno en la salida de la chimenea sí permite mejorar la eficiencia térmica al estar en relación inversa con el flujo de combustible que ingresa al quemador.
- El sistema de control de oxígeno en calderas es estable al evidenciarse en la simulación en Python que el porcentaje de oxígeno a la salida de la chimenea se aproxima al valor de 1.75.
- El costo operativo anual se ve reducido y está en relación inversa con la eficiencia térmica obtenida.
- El proyecto es económicamente viable al haber obtenido una relación beneficio-coste de 1.7 considerando como inversión inicial el costo del PLC, módulo de expansión, HMI y analizador de gases.



## Recomendaciones

- Es recomendable realizar pruebas en campo a fin de ajustar los parámetros PID teniendo en cuenta más factores como el tiempo muerto.
- Se recomienda también considerar otros tipos de control además del de oxígeno ya que hay otros parámetros que también son críticos en la caldera como la temperatura y presión y su control ayudaría a minimizar el riesgo de explosión.
- Se recomienda al implementar los equipos en campo realizar una calibración al analizador de gases a fin de minimizar el error de medición y poder hacer una comparación más precisa con el “set point”.
- Es recomendable considerar para la simulación el PLC S7 1500 ya que este presenta por defecto entradas y salidas analógicas y no requiere módulo de expansión.
- Se sugiere simular el proceso con el programa PLC SIM que se puede enlazar al TIA Portal a fin de poder evaluar el comportamiento de las variables.
- Se recomienda evaluar económicamente el proyecto considerando más costos como los actuadores, transductores, tableros eléctricos, el cableado e instalación en planta que pueden elevar la inversión inicial en un porcentaje.

## Referencias bibliográficas

- Astrom, K. J., & Hagglund, T. (2002). *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. ISA.
- Boobalan, S., Gobinath, S., Dharmalingam, A., Jayaprakash, A., Poovarasan, M., & Poovendan, K. (2020). An Integrated IoT LabVIEW Based Fuzzy-PLC Controller for Automation of Boiler. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 937(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012049>
- Cam, O. (2020). *Diseño del sistema de control de proceso de condensado de vapor en la producción de harina de pescado en la empresa KAISA, Los Olivos 2019* [Universidad Tecnológica del Perú]. [https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/3309/Oscar Cam\\_Trabajo de Suficiencia Profesional\\_Titulo Profesional\\_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/3309/Oscar_Cam_Trabajo_de_Suficiencia_Profesional_Titulo_Profesional_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Cengel, Y., & Boles, M. (2008). *Termodinamica - Cengel 6 Ed by LeaA.pdf*. In *Sexta Edición* (6ta ed.). Mc Graw Hill.
- Centy, E. (2019). *Módulo de entrenamiento de un sistema de control en cascada aplicado a una caldera industrial con pre- calentamiento usando energía solar*. Universidad Católica de Santa María.
- Colmaquinas. (2023). *Catálogo Técnico y Comercial Con casos prácticos aplicativos*.
- Coughanowr, D. (2019). *Process Systems Analysis and Control*. In *Sustainability (Switzerland)* (2da ed., Vol. 11, Issue 1). McGraw-Hill.
- Gearo, J. (1983). *Combustion Efficiency Optimization Manual for Operators of Oil-and Gas-Fired Boilers*.
- Gilman, G. F. (2005). *Boiler Control Systems Engineering.pdf*. ISA-Instrumentation,



Systems, and Automation Society.

<http://books.google.com/books?id=4NLiAAAAMAAJ&pgis=1>

Guedes, L. (2010). Programmable Logic Controller - Overview. In *Programmable Logic Controllers - Hardware and Programming*. InTech.

Hangos, K. M., & Bokor, J. (2004). Analysis and Control of Nonlinear Process Systems. In *Analysis and Control of Nonlinear Process Systems*. Springer.

<https://doi.org/10.1007/b97665>

Heselton, K. (2005). Boiler Operator's Handbook. In *Sustainability (Switzerland)* (1era ed., Vol. 11, Issue 1). Fairmont Press, Inc.

Huamanchumo, A., & Moreno, C. (2022). *Mejora de la eficiencia térmica en calderas pirotubulares mediante la regulación de sus parámetros de combustión para una empresa pesquera* [Universidad César Vallejo].

[https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/50737/Cusma\\_GM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/50737/Cusma_GM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

INACAL. (2008). *CALDERAS INDUSTRIALES . Procedimiento para la determinación de la eficiencia térmica de calderas industriales*. 1–34.

INACAL. (2018). CALDERAS. Definiciones generales y clasificación. *NTP 350.016*.

Jacóme, I. M. L., & Carvache, O. F. (2017). Análisis del costo: beneficio una herramienta de gestión. *Contribuciones a La Economía, ISSN-e 1696-8360, Vol. 15, Nº. 2, 2017 (Ejemplar Dedicado a: Abril - Junio 2017), 15(2), 11*.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9031809&info=resumen&idioma=ENG%0Ahttps://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9031809&info=resumen&idioma=SPA%0Ahttps://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9031809>

Pellegrinetti, G., & Bentsman, J. (1996). Nonlinear control oriented boiler modeling - A benchmark problem for controller design. *IEEE Transactions on Control Systems*

*Technology*, 4(1), 57–64. <https://doi.org/10.1109/87.481767>

Saca, J. (2021). *Análisis de eficiencia térmica del proceso de generación de vapor en la Quesera Brayan del Cantón Salcedo*. Universidad Técnica de Cotopaxi.

Sánchez, A. (2020). *Estudio de mejora a una fábrica de aceite y cáscara deshidratada de limón realizada por corporación Primax para el cambio de matriz energética de petróleo diésel y residual a gas licuado de petróleo*. Universidad de Lima.

Sinclair, I. (2001). Sensors and transducers. In *Measurement and Control* (Vol. 34, Issue 2). Newnes. <https://doi.org/10.1177/002029400103400201>

Smith, C. A. (2004). Automated Continuous Process Control. In *Automated Continuous Process Control*. <https://doi.org/10.1002/0471218839>

Smith, C., & Corripio, A. (1991). *Control automático de procesos*. Noriega Limusa.

Tsoumalis, G. I., Bampos, Z. N., Chatzis, G. V., & Biskas, P. N. (2022). Overview of Natural Gas Boiler Optimization Technologies and Potential Applications on Gas Load Balancing Services. *Energies*, 15(22), 1–24.  
<https://doi.org/10.3390/en15228461>

Tumbajulca, F., & Valderrama, A. (2021). *Sistema de Cogeneración de energía con Grupo Electrónico y vapor saturado para mejorar eficiencia del ciclo térmico y reducción de impactos medioambientales en la empresa Escobedo Sandoval S.A.C.* Universidad César Vallejo.



## **Anexos**

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Anexo 1: Cotizaciones de los equipos.....                               | 71 |
| Anexo 2: Licencias.....                                                 | 74 |
| Anexo 3: Código de la generación del diagrama de bloques en Python..... | 75 |
| Anexo 4: Código del diagrama de Bode en Python.....                     | 76 |
| Anexo 5: Código de la simulación de variables en Python con PID.....    | 77 |
| Anexo 6: Código de la visualización de variables en phyton sin PID..... | 83 |



GRUPO COINP S.A.C.  
JR ALEMANIA NRO. 2242 URB. CHACRA RIOS NORTE - CERCA DO  
Website: <https://www.grupocoinp.com/>

**BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA**  
R.U.C. 20548407991  
BG01-00001428

CLIENTE: MENDOZA SAMAME CESAR ALONSO  
DNI: 75882334  
DIRECCIÓN: ..  
FECHA EMISIÓN: 2025-05-28  
TÉRMINO PAGO: False (Contado)  
NÚMERO OC:

N° COT: 54428962  
VENDEDOR: PLASENCIA LEON JUAN CARLOS  
MONEDA: SOL  
FECHA VENC.: 2025-05-28  
N° GUÍA:  
DOC. ADIC.:

| Item | U.M.   | Descripción                                                                                                              | Código             | Marca   | Cant. | P. Unit S/IGV | P. Total S/IGV |
|------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|-------|---------------|----------------|
| 1    | UNIDAD | Simatic S7-1200. Cpu 1214C. Cpu Compacta, Ac/Dc/Reles, E/S Integradas: 14 Di 24Vdc; 10 Do Reles 2A; 2 AI 0 - 10V Dc, Ali | 6ES7214-1BG40-0XB0 | SIEMENS | 1.000 | S/ 1.845.79   | S/ 1.845.79    |
| 2    | UNIDAD | Simatic S7-1200. Salida Analog.. Sm 1232. 2 Ao. +/-10V, Resolución 14 Bit. Od. 0-20 Ma, Resolución 13 Bit.               | 6ES7232-4HB32-0XB0 | SIEMENS | 1.000 | S/ 1.302.80   | S/ 1.302.80    |
| 3    | UNIDAD | Simatic Hmi, Ktp400 Basic. Basic Panel, Mando Por Teclas/Tactil. Pantalla Tft 4", 65536 Colores, Interfaz Profinet, Conf | 6AV2123-2DB03-0AX0 | SIEMENS | 1.000 | S/ 2.080.49   | S/ 2.080.49    |

SON: SEIS MIL CIENTO SETENTA Y 31/100 SOLES

**Monto Gravado** S/ 5.229.08  
**IGV Venta** S/ 941.23  
**Total** S/ 6.170.31  
**Monto Pendiente de Pago** S/ 6.170.31

BCP Soles: 192-2626167-0-38 CCI: 002-19-2002626167038-39  
BCP Dólares: 192-2614321-1-92 CCI: 002-19-2002614321192-33  
BBVA Soles: 0011-0196-01-00023463-31 CCI: 011-196-000100023463-31  
BBVA Dólares: 0011-0196-01-00023455-37 CCI: 011-196-000100023455-37  
Scotiabank Soles: 000-3189324 CCI: 009-013-000003189324-41  
Banco de la Nación BN - Soles - Solo para Deduciones: 00099055030



Hash: 45/Z+mBVB1ayYhOTVKTNgx2xIEBZv27jD1jVQSYIxs=  
Representación impresa de la BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA. Esta puede ser consultada en :  
<https://grupocoinp.bigodoo.com/consulta>

Figura 34: Boleta de PLC, módulo de expansión y HMI



# COTIZACIÓN N°:S4386825



Jr. Alemania 2242 Urb. Chacarillos Norte, Cercado de Lima,  
Lima. / Telf: (011) 479 7135 / www.grupocoinp.com

Cliente: MENDOZA SAMAME CESAR ALONSO  
RUC: 75882234  
Dirección: Perú  
Atención:  
Referencia:  
Fecha: 2024-10-28 17:31:14

Teléfono:

Estimados señores: en atención a su amable solicitud nos es grato ofrecerles lo siguiente :

| Item | Cant. | U.M.   | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Modelo Marca | T.Entrega            | P.Unitario<br>S/IGV | P.Venta<br>S/IGV |
|------|-------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------|---------------------|------------------|
| 1    | 1     | UNIDAD | SIMATIC STEP 7 Basic V19; Floating License Download; software de ingeniería en el TIA Portal; software, documentación y clave de licencia para descargar; clase A; en 9 idiomas: de, en, zh, incluidos, fr, es, it, ru, ja, ko para descargar; para configurar SIM 6ES7822-0AE23-0YA5 SIEMENS | PV01-U       | DESCARGA EN 5-7 DIAS | S/ 1,375.99         | S/ 1,375.99      |

SON: MIL SEISCIENTOS VEINTITRES Y 67/100 SOLES

**Monto Gravado** S/ 1,375.99  
**IGV 18% Venta** S/ 247.68  
**Total** S/ 1,623.67

|                                |                                                       |                          |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------|
| <b>Condiciones Comerciales</b> |                                                       |                          |
| Forma de Pago:                 | CONTADO                                               | Moneda: PEN              |
| Validez de Oferta:             | 07 días o hasta agotar stock                          |                          |
| Lugar de Entrega:              | JR ALEMANIA NRO 2242 URB. CHACARILLOS NORTE - CERCADO |                          |
| Vendedor:                      | PLASENCIA LEON                                        | Celular: +51 942 587 427 |
| Correo:                        | JPLASENCIA@GRUPOCOINP.COM                             |                          |

|                                                                                      |                                                                                                       |                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>BCP</b><br>Soles<br><b>192-2626167-0-38</b><br>Dolares<br><b>192-2614321-1-92</b> | <b>BBVA</b><br>Soles<br><b>0011-0196-01-00023463-31</b><br>Dolares<br><b>0011-0196-01-00023455-37</b> | <b>Banco de la Nación</b><br><b>SOLO PARA</b><br><b>DETRACCIONES</b><br>Soles<br><b>00099055030</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|



Figura 35: Cotización Software TIA Portal V19



INSTRUMENTS LAB S.A.C.  
CAL. LUIS GODIN NRO. 4445 URB. SAN JOSE  
LIMA, LIMA - LIMA. <https://www.instrumentslab.com.pe>

**RUC 20507257403**  
**COTIZACIÓN**  
**IL25-CTV-00000751**

**FECHA EMISIÓN:** 17/07/2025  
**FECHA VALIDEZ:** 17/08/2025

**ASESOR:** Iris Alfaro  
**MONEDA:** Dólares Americanos

#### 1. CLIENTE

**Razón Social:** MENDOZA SAMAME, CESAR ALONSO  
**DNI:** 75882334  
**Dirección facturación:** CALLE ANTONIO ULLOA 2050 URB. PACIFICO

#### 2. DETALLES DEL PRESUPUESTO

| CÓDIGO               | ITEM / DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | UND | CANT | VALOR.U      | PRECIO.U     | SUBTOTAL             |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|--------------|--------------|----------------------|
| 0632-3510-01         | testo 350. Analizador de gases de emisiones, Bluetooth, O2, CO<br>Unidad de Control. Testo 350 Opción Bluetooth<br>Unidad de Analisis. Testo 350 - Opción Bluetooth<br>Incluye:<br>• Sensores electroquimicos: O2, CO<br>• Pack x 10 und. de filtros de unidad de análisis<br>• Certificado de calibración ISO 17025<br>• Maleta de transporte | NIU | 1.00 | USD 7.080.00 | USD 8,354.40 | USD 8,354.40         |
| 0600-8765            | Sonda de muestreo de gases modular de 700 mm, Tmax. 1000°C, Ø 8 mm                                                                                                                                                                                                                                                                             | NIU | 1.00 | USD 950.00   | USD 1,121.00 | USD 1,121.00         |
| 0554-0620            | Impresora testo BLUETOOTH®/ IRDA t340/350                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | NIU | 1.00 | USD 550.00   | USD 649.00   | USD 649.00           |
| 0554-0568            | Repuesto de papel térmico x 06 unidades                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | NIU | 1.00 | USD 55.00    | USD 64.90    | USD 64.90            |
| 0554-3385            | Pack x 10 unidades de filtros de partículas 0554 3385                                                                                                                                                                                                                                                                                          | NIU | 1.00 | USD 55.00    | USD 64.90    | USD 64.90            |
| Subtotal             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |      |              |              | USD 8,690.00         |
| IGV                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |      |              |              | USD 1,564.20         |
| <b>IMPORTE TOTAL</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |      |              |              | <b>USD 10,254.20</b> |

Importe en letras: **DIEZ MIL DOSCIENTOS CINCUENTA Y CUATRO CON 20/100 DÓLARES AMERICANOS**

Figura 36: Cotización analizador de gases





Figura 37: Certificado de Licencia de TIA Portal



## Código de la generación del diagrama de bloques en Python

```
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.patches as patches

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
ax.axis('off')

# Caja U1
ax.add_patch(patches.Rectangle((0.5, 0.7), 0.8, 0.2, fill=False))
ax.text(0.9, 0.8, "U1", ha='center', va='center', fontsize=12)

# Caja U2
ax.add_patch(patches.Rectangle((0.5, 0.2), 0.8, 0.2, fill=False))
ax.text(0.9, 0.3, "U2", ha='center', va='center', fontsize=12)

# Bloque de U1 -> G1
ax.add_patch(patches.Rectangle((1.5, 0.7), 1.5, 0.2, fill=False))
ax.text(2.25, 0.8, " $-9.375 / (s + 2.2062)$ ", ha='center', va='center',
        fontsize=10)

# Bloque de U2 -> G2
ax.add_patch(patches.Rectangle((1.5, 0.2), 1.5, 0.2, fill=False))
ax.text(2.25, 0.3, " $7.658 / (s + 2.2062)$ ", ha='center', va='center',
        fontsize=10)

# Suma
ax.plot(3.5, 0.5, 'ko', markersize=12)
ax.text(3.5, 0.5, '+', ha='center', va='center', fontsize=14, color='white')

# Caja de salida Y2
ax.add_patch(patches.Rectangle((4.0, 0.4), 0.8, 0.2, fill=False))
ax.text(4.4, 0.5, "Y2", ha='center', va='center', fontsize=12)

# Líneas de conexión
# U1 to G1
ax.arrow(1.3, 0.8, 0.2, 0, head_width=0.02, head_length=0.05, fc='k', ec='k')
# G1 to sum
ax.arrow(3.0, 0.8, 0.5, -0.3, head_width=0.02, head_length=0.05, fc='k',
        ec='k')
# U2 to G2
ax.arrow(1.3, 0.3, 0.2, 0, head_width=0.02, head_length=0.05, fc='k', ec='k')
# G2 to sum
ax.arrow(3.0, 0.3, 0.5, 0.2, head_width=0.02, head_length=0.05, fc='k',
        ec='k')
# Sum to Y2
```



```

ax.arrow(3.6, 0.5, 0.4, 0, head_width=0.02, head_length=0.05, fc='k', ec='k')

plt.title("Diagrama de Bloques: Y2(s) en función de U1(s) y U2(s)",
fontsize=14)
plt.show()

```

## Código del diagrama de Bode en Python

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import control as ctrl

# Definir planta:  $G(s) = -9.375 / (s + 2.2062)$ 
num = [-9.375]
den = [1, 2.2062]
G = ctrl.TransferFunction(num, den)

# Rango de frecuencias (logarítmico)
omega = np.logspace(-2, 3, 1000) # de 0.01 a 1000 rad/s

# Obtener respuesta en frecuencia
mag, phase, omega = ctrl.frequency_response(G, omega)

# Convertir fase a grados normalmente
phase_deg = np.angle(phase, deg=True)

# ⚠ Forzar fase a -180 si la ganancia es negativa
if num[0] < 0:
    phase_deg[:] = -180.0

# Graficar diagrama de Bode con fase forzada
plt.figure()
plt.subplot(2, 1, 1)
plt.semilogx(omega, 20 * np.log10(np.abs(mag)))
plt.ylabel('Magnitud [dB]')
plt.title('Diagrama de Bode')
plt.grid(True, which='both')

plt.subplot(2, 1, 2)
plt.semilogx(omega, phase_deg, label='Fase = -180°')
plt.ylabel('Fase [°]')
plt.xlabel('Frecuencia [rad/s]')
plt.grid(True, which='both')
plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()

```



## Código de la simulación de variables en Python con PID

```
import tkinter as tk
from tkinter import ttk
import math, random
from datetime import datetime, timedelta, timezone

# ----- Hora Perú -----
def get_peru_tz():
    try:
        from zoneinfo import ZoneInfo
        return ZoneInfo("America/Lima")
    except Exception:
        pass
    try:
        import pytz
        return pytz.timezone("America/Lima")
    except Exception:
        pass
    return timezone(timedelta(hours=-5))

# ----- Proceso -----
FAR, AIRO2 = 17.17, 4.29          # estequiometría y conversión aire a O2
qa_nom = 5_196_414.0             # kg/h (tu valor x10)
O2_SP_DEF, U_AT_SP = 1.75, 0.88
U_MAX = 0.95                     # límite físico

def solve_Kf(qa, u, FAR, AIRO2, O2_sp):
    y = O2_sp/100.0
    num = qa*(1.0 - y*AIRO2)
    den = u*(y*AIRO2 + FAR)
    return max(num/den, 1e-9)      # qf = Kf * u

Kf = solve_Kf(qa_nom, U_AT_SP, FAR, AIRO2, O2_SP_DEF)

# Dinámicas y ruido
TAU_QF, TAU_QA, TAU_O2 = 3.0, 5.0, 4.0
DT, NOISE_O2 = 0.05, 0.02

def o2_percent(qa, qf):
    den = (qa + qf)*AIRO2
    if den <= 1e-9: return 20.9
    return 100.0*(qa - qf*FAR)/den

# perturbación de aire ±0.2 %
```



```

def qa_effective(t, qa_base):
    return qa_base * (1.0 + 0.002*math.sin(2*math.pi*t/60.0) +
random.uniform(-0.0002, 0.0002))

# ----- Eficiencia DIRECTA (sin escala) -----
Q_OUT_BTUH      = 13_390_000.0      # 400 BHP
HHV_BTU_PER_KG  = 52.0              # Btu/kg (CH4 típico)

# ----- PID (feedback puro, e = SP - PV) -----
KP, TI, TD = 0.14, 31.4, 7.85
Kp = -KP
Ki = -(KP/TI)
Kd = -(KP*TD)

TAU_MEAS = 1.5      # filtro medición
TAU_SP    = 6.0      # filtro SP
DU_MAX    = 0.02     # rampa actuador (~40%/s con DT=0.05)

def clamp(x, lo=0.0, hi=U_MAX): return max(lo, min(hi, x))

class PID:
    def __init__(self, Kp, Ki, Kd, lo=0.0, hi=U_MAX, du_max=DU_MAX):
        self.Kp, self.Ki, self.Kd = Kp, Ki, Kd
        self.lo, self.hi = lo, hi
        self.du_max = du_max
        self.I = 0.0
        self.x_prev = None
        self.Df = 0.0
        self.alpha_d = 0.15

    def bumpless_hold(self, u_current, sp, pv):
        e = sp - pv
        self.I = clamp(u_current - (self.Kp*e + self.Df), self.lo, self.hi)
        self.x_prev = pv

    def step(self, sp, pv, dt, u_prev):
        e = sp - pv
        dx = 0.0 if self.x_prev is None else (pv - self.x_prev)/dt
        self.x_prev = pv
        # derivada sobre la medición (D = -Kd*dPV/dt filtrado)
        self.Df = (1 - self.alpha_d)*self.Df + self.alpha_d * (-(self.Kd) *
dx)

        u_unsat = self.Kp*e + self.I + self.Df
        sat_hi = (u_unsat >= self.hi) and (e > 0)
        sat_lo = (u_unsat <= self.lo) and (e < 0)
        if not (sat_hi or sat_lo):      # integración condicional
            self.I += self.Ki * e * dt

```



```

        u_cmd = self.Kp*e + self.I + self.Df
        u_cmd = clamp(u_cmd, self.lo, self.hi)
        # rampa del actuador
        u_cmd = clamp(u_prev + max(min(u_cmd - u_prev, self.du_max), -
self.du_max),
                    self.lo, self.hi)
        return u_cmd

pid = PID(Kp, Ki, Kd)

# ----- Estado: ARRANQUE EN u1 = 0.95 -----
u_f    = U_MAX
qa     = qa_nom
qf     = Kf*u_f
O2_meas = o2_percent(qa, qf)
O2_filt = O2_meas
sp_filt = O2_SP_DEF
pid.bumpless_hold(u_f, sp_filt, O2_filt)
t_sim = 0.0

# ----- GUI -----
W, H = 1250, 700
root = tk.Tk()
root.title("Caldera - O2 con eficiencia directa (PID fijo, u1 máx=0.95,
arranque 0.95)")
root.geometry(f"{W}x{H}")
root.configure(bg="#1f2530")
sty = ttk.Style(); sty.theme_use("clam")
sty.configure("TLabel", background="#1f2530", foreground="#ffffff")
sty.configure("TLabelframe", background="#1f2530", foreground="#ffffff")

title = ttk.Label(root, text="Caldera - Control de O2 en Chimenea",
font=("Segoe UI", 24, "bold"))
title.place(x=20, y=10)

cv = tk.Canvas(root, width=560, height=420, bg="#2b3442",
highlightthickness=0); cv.place(x=20, y=60)
def draw_static():
    cv.delete("all")
    cv.create_rectangle(120, 40, 500, 360, outline="#cfd6e6", width=3,
fill="#3a4454")
    cv.create_oval(200, 130, 420, 270, fill="#f39c12", outline="#f39c12")
    cv.create_rectangle(30,110,110,160,
fill="#3498db"); cv.create_text(70,135,text="Aire", fill="white",
font=("Segoe UI",14,"bold"))
    cv.create_polygon(110,110,140,135,110,160, fill="#6fb8ee", outline="")

```



```

        cv.create_rectangle(30,210,110,260,
fill="#7f1d1d"); cv.create_text(75,235,text="Combustible", fill="white",
font=("Segoe UI",12,"bold"))
        cv.create_polygon(110,210,140,235,110,260, fill="#f4a261", outline="")
        cv.create_rectangle(520, 40, 540, 360, outline="#cfd6e6", width=3,
fill="#2b3442")
        cv.create_rectangle(525, 300, 535, 355, fill="#2b3442",
outline="#2b3442", tags="o2bar_bg")
        cv.create_rectangle(525, 300, 535, 355, fill="#6ee7b7", outline="",
tags="o2bar")
        cv.create_text(470, 20, text="Chimenea", fill="ffffff", font=("Segoe
UI", 12))
draw_static()

# Tendencia + SP
trend = tk.Canvas(root, width=430, height=300, bg="#2b3442",
highlightthickness=0); trend.place(x=600,y=110)
trend.create_rectangle(40,20,410,280, outline="#cfd6e6")
trend.create_text(30,20, text="O2 (%)", fill="white", anchor="nw",
font=("Segoe UI",10))
trend_x0, trend_x1, trend_y0, trend_y1, trend_n = 40,410,20,280,300
trend_pts = [None]*trend_n
sp_line = trend.create_line(40,200,410,200, fill="#ffd54f", dash=(6,4),
width=2)

# Reloj
clock_frame = ttk.LabelFrame(root, text="Hora de Perú");
clock_frame.place(x=1060,y=60, width=170, height=120)
lbl_clock = ttk.Label(clock_frame, text="--:--:--",
font=("Consolas",22,"bold")); lbl_clock.pack(expand=True, fill="both",
pady=8)
def update_clock():
    now = datetime.now(tz=get_peru_tz());
    lbl_clock.config(text=now.strftime("%Y-%m-%d\n%H:%M:%S"))
    root.after(1000, update_clock)

# Setpoint
sp_frame = ttk.LabelFrame(root, text="Setpoint O2 (%)")
sp_var = tk.DoubleVar(value=O2_SP_DEF)
sp = ttk.Scale(sp_frame, from_=0.5, to=6.0, variable=sp_var,
orient="horizontal", length=260)
lbl_sp_val = ttk.Label(sp_frame, text=f"{sp_var.get():.2f} %")
def update_sp_label(*_): lbl_sp_val.config(text=f"{sp_var.get():.2f} %")
sp_var.trace_add("write", lambda *_: update_sp_label())
sp_frame.place(x=20, y=570, width=300, height=80)
sp.place(x=10, y=20); lbl_sp_val.place(x=240, y=2)

# Lecturas

```



```

lbl_o2 = ttk.Label(root, text="", font=("Segoe UI",18,"bold"));
lbl_o2.place(x=20, y=486)
lbl_u = ttk.Label(root, text="", font=("Segoe
UI",12)); lbl_u.place(x=20, y=515)
lbl_q = ttk.Label(root, text="", font=("Segoe
UI",12)); lbl_q.place(x=20, y=540)

# Eficiencia directa (sin factor)
eff_frame = ttk.LabelFrame(root, text="Eficiencia (método DIRECTO)")
eff_frame.place(x=600, y=420, width=430, height=190)
lbl_eta_big = ttk.Label(eff_frame, text="η = -- %", font=("Segoe UI", 18,
"bold"))
lbl_eta_big.pack(anchor="w", padx=10, pady=(8,0))
lbl_qin = ttk.Label(eff_frame, text="")
lbl_qout = ttk.Label(eff_frame, text=f"Q salida (400 BHP) =
{Q_OUT_BTUH:,.0f} Btu/h")
lbl_qfuel = ttk.Label(eff_frame, text=f"HHV = {HHV_BTU_PER_KG:,.0f} Btu/kg")
for w in (lbl_qout, lbl_qin, lbl_qfuel): w.pack(anchor="w", padx=10, pady=2)

lbl_mode_state = ttk.Label(root, text=f"Modo: PID (auto, máx u1 =
{U_MAX:.2f})",
font=("Segoe UI", 12, "bold"),
foreground="#22c55e")
lbl_mode_state.place(x=600, y=86)

def update_trend(o2):
    o2c = max(0.0, min(6.0, o2))
    y = trend_y1 - (o2c/6.0)*(trend_y1 - trend_y0)
    for i in range(trend_n-1): trend_pts[i] = trend_pts[i+1]
    trend_pts[-1] = y
    trend.delete("curve")
    x_span = (trend_x1 - trend_x0) / (trend_n - 1)
    for i in range(1, trend_n):
        if trend_pts[i] is None or trend_pts[i-1] is None: continue
        x1 = trend_x0 + (i-1)*x_span; x2 = trend_x0 + i*x_span
        trend.create_line(x1, trend_pts[i-1], x2, trend_pts[i],
fill="#6ee7b7", tags="curve")
    spv = float(sp_var.get())
    ysp = trend_y1 - (max(0.0, min(6.0, spv))/6.0)*(trend_y1 - trend_y0)
    trend.coords(sp_line, trend_x0, ysp, trend_x1, ysp)

# ----- Loop -----
def update_loop():
    global t_sim, qa, qf, u_f, O2_meas, O2_filt, sp_filt

    qa_ss = qa_effective(t_sim, qa_nom)
    qa += (DT/TAU_QA)*(qa_ss - qa)

```



```

# planta + ruido
qf_ss = kf*u_f
qf += (DT/TAU_QF)*(qf_ss - qf)
O2_true = o2_percent(qa, qf)
O2_meas += (DT/TAU_O2)*((O2_true + random.uniform(-NOISE_O2, NOISE_O2))
- O2_meas)
O2_meas = max(0.0, min(21.0, O2_meas))

# filtros
O2_filt += (DT/max(TAU_MEAS,1e-6))*(O2_meas - O2_filt)
sp_filt += (DT/max(TAU_SP,1e-6))*(float(sp_var.get()) - sp_filt)

# PID siempre activo
u_cmd = pid.step(sp_filt, O2_filt, DT, u_f)
u_f = clamp(u_cmd, 0.0, U_MAX)

# UI
o2p = max(0.0, min(6.0, O2_meas))
bar_h = (o2p/6.0)*55
cv.coords("o2bar", 525, 355-bar_h, 535, 355)

qf_model_kgh = max(qf, 0.0)
Qin_BTUH      = qf_model_kgh * HHV_BTU_PER_KG      # <-- SIN FACTOR
eta_direct    = max(0.0, min(100.0, 100.0 * Q_OUT_BTUH / max(Qin_BTUH,
1e-6)))

lbl_o2.config(text=f"O2 chimenea = {O2_meas:5.2f} %")
lbl_u.config(text=f"Apertura u1 = {u_f:5.3f} [máx {U_MAX:.2f}]")
lbl_q.config(text=f"qf(modelo) = {qf_model_kgh:,.0f} kg/h")
lbl_eta_big.config(text=f"η (directo) = {eta_direct:5.2f} %")
lbl_qout.config(text=f"Q salida (400 BHP) = {Q_OUT_BTUH:,.0f} Btu/h")
lbl_qin.config(text=f"Q entrada (estimada) = {Qin_BTUH:,.0f} Btu/h")

update_trend(O2_meas)
t_sim += DT
root.after(int(DT*1000), update_loop)

# ----- Run -----
def start():
    update_clock()
    root.after(int(DT*1000), update_loop)

start()
root.mainloop()

```



## Código de la visualización de variables en phyton sin PID

```
# hmi_caldera_solo_sinpid_u1_095.py
# HMI Caldera - %O2 en chimenea SOLO SIN PID
# • u1 fijo = 0.95
# • Perturbación de aire ±0.2 %
# • Eficiencia por método DIRECTO
# • Reloj (hora de Perú)

import tkinter as tk
from tkinter import ttk
import math, random
from datetime import datetime, timedelta, timezone

# ----- Hora Perú -----
def get_peru_tz():
    try:
        from zoneinfo import ZoneInfo
        return ZoneInfo("America/Lima")
    except Exception:
        pass
    try:
        import pytz
        return pytz.timezone("America/Lima")
    except Exception:
        pass
    return timezone(timedelta(hours=-5))

# ----- Proceso -----
FAR, AIRO2 = 17.07, 4.29          # estequiometría usada
qa_nom = 5_196_414.0             # kg/h aire nominal
U_MAX = 0.95                     # u1 fijo (SIN PID)

# relación  $q_f = K_f \cdot u$  que reproduce ~1.75% O2 con  $u=0.88$  y  $q_{a\_nom}$ 
def solve_Kf(qa, u, FAR, AIRO2, O2_sp):
    y = O2_sp/100.0
    num = qa*(1.0 - y*AIRO2)
    den = u*(y*AIRO2 + FAR)
    return max(num/den, 1e-9)

Kf = solve_Kf(qa_nom, 0.88, FAR, AIRO2, 1.75)

# Dinámicas
TAU_QF, TAU_QA, TAU_O2 = 3.0, 5.0, 4.0 # s
DT, NOISE_O2 = 0.05, 0.02              # s, %O2

def o2_percent(qa, qf):
    den = (qa + qf)*AIRO2
```



```

    if den <= 1e-9: return 20.9
    return 100.0*(qa - qf*FAR)/den

# Perturbación de aire ±0.2 % + pequeño ruido
def qa_effective(t, qa_base):
    return qa_base * (1.0 + 0.002*math.sin(2*math.pi*t/60.0) +
random.uniform(-0.0002, 0.0002))

# ----- Eficiencia DIRECTA -----
Q_OUT_BTUH      = 13_390_000.0      # 400 BHP
HHV_BTU_PER_KG  = 52.0              # Btu/kg (efectivo coherente)
FUEL_SCALE      = 1.0              # sin factor

# ----- Estado -----
u_f      = U_MAX
qa       = qa_nom
qf       = Kf*u_f
O2_meas  = o2_percent(qa, qf)
t_sim    = 0.0

# ----- GUI -----
W, H = 1250, 700
root = tk.Tk()
root.title("Caldera - O2 en chimenea (SOLO SIN PID, u1 fijo = 0.95)")
root.geometry(f"{W}x{H}")
root.configure(bg="#1f2530")
sty = ttk.Style(); sty.theme_use("clam")
sty.configure("TLabel", background="#1f2530", foreground="#ffffff")
sty.configure("TLabelframe", background="#1f2530", foreground="#ffffff")

title = ttk.Label(root, text="Caldera - Control de O2 en Chimenea",
font=("Segoe UI", 24, "bold"))
title.place(x=20, y=10)

# Esquema
cv = tk.Canvas(root, width=560, height=420, bg="#2b3442",
highlightthickness=0); cv.place(x=20, y=60)
def draw_static():
    cv.delete("all")
    cv.create_rectangle(120, 40, 500, 360, outline="#cfd6e6", width=3,
fill="#3a4454")
    cv.create_oval(200, 130, 420, 270, fill="#f39c12", outline="#f39c12")
    cv.create_rectangle(30,110,110,160,
fill="#3498db"); cv.create_text(70,135,text="Aire", fill="white",
font=("Segoe UI",14,"bold"))
    cv.create_polygon(110,110,140,135,110,160, fill="#6fb8ee", outline="")

```



```

        cv.create_rectangle(30,210,110,260,
fill="#7a2b2b"); cv.create_text(75,235,text="Combustible", fill="white",
font=("Segoe UI",12,"bold"))
        cv.create_polygon(110,210,140,235,110,260, fill="#f4a261", outline="")
        cv.create_rectangle(520, 40, 540, 360, outline="#cfd6e6", width=3,
fill="#2b3442")
        cv.create_rectangle(525, 300, 535, 355, fill="#2b3442",
outline="#2b3442", tags="o2bar_bg")
        cv.create_rectangle(525, 300, 535, 355, fill="#6ee7b7", outline="",
tags="o2bar")
        cv.create_text(470, 20, text="Chimenea", fill="ffffff", font=("Segoe
UI", 12))
draw_static()

# Tendencia O2 (sin SP)
trend = tk.Canvas(root, width=430, height=300, bg="#2b3442",
highlightthickness=0); trend.place(x=600,y=110)
trend.create_rectangle(40,20,410,280, outline="#cfd6e6")
trend.create_text(30,20, text="O2 (%)", fill="white", anchor="nw",
font=("Segoe UI",10))
trend_x0, trend_x1, trend_y0, trend_y1, trend_n = 40,410,20,280,300
trend_pts = [None]*trend_n
trend.create_text(400,22, text="SIN PID", fill="#f59e0b", anchor="ne",
font=("Segoe UI",10,"bold"))

# Reloj
clock_frame = ttk.LabelFrame(root, text="Hora de Perú");
clock_frame.place(x=1060,y=60, width=170, height=120)
lbl_clock = ttk.Label(clock_frame, text="--:--:--",
font=("Consolas",22,"bold")); lbl_clock.pack(expand=True, fill="both",
pady=8)
def update_clock():
    now = datetime.now(tz=get_peru_tz());
lbl_clock.config(text=now.strftime("%Y-%m-%d\n%H:%M:%S"))
    root.after(1000, update_clock)

# Etiquetas proceso
lbl_o2 = ttk.Label(root, text="", font=("Segoe UI",18,"bold"));
lbl_o2.place(x=20, y=486)
lbl_u = ttk.Label(root, text="", font=("Segoe
UI",12)); lbl_u.place(x=20, y=515)
lbl_q = ttk.Label(root, text="", font=("Segoe
UI",12)); lbl_q.place(x=20, y=540)

# Eficiencia directa
eff_frame = ttk.LabelFrame(root, text="Eficiencia (método DIRECTO)")
eff_frame.place(x=600, y=420, width=430, height=190)

```



```

lbl_eta_big = ttk.Label(eff_frame, text="η (directo) = -- %", font=("Segoe
UI", 18, "bold"))
lbl_eta_big.pack(anchor="w", padx=10, pady=(8,0))
lbl_qin = ttk.Label(eff_frame, text="")
lbl_qout = ttk.Label(eff_frame, text=f"Q salida (400 BHP) =
{Q_OUT_BTUH:,.0f} Btu/h")
lbl_qfuel = ttk.Label(eff_frame, text=f"HHV (ef.) = {HHV_BTU_PER_KG:.2f}
Btu/kg")
for w in (lbl_qout, lbl_qin, lbl_qfuel): w.pack(anchor="w", padx=10, pady=2)

# Modo (texto, sin botón)
lbl_mode_state = ttk.Label(root, text=f"Modo: SIN PID (u1 fijo =
{U_MAX:.3f}, sin setpoint)",
                           font=("Segoe UI", 12, "bold"), anchor="w",
                           justify="left", foreground="#f59e0b")
lbl_mode_state.place(x=600, y=86)
lbl_mode_state.configure(wraplength=420)

def update_trend(o2):
    o2c = max(0.0, min(6.0, o2))
    y = trend_y1 - (o2c/6.0)*(trend_y1 - trend_y0)
    for i in range(trend_n-1): trend_pts[i] = trend_pts[i+1]
    trend_pts[-1] = y
    trend.delete("curve")
    x_span = (trend_x1 - trend_x0) / (trend_n - 1)
    for i in range(1, trend_n):
        if trend_pts[i] is None or trend_pts[i-1] is None: continue
        x1 = trend_x0 + (i-1)*x_span; x2 = trend_x0 + i*x_span
        trend.create_line(x1, trend_pts[i-1], x2, trend_pts[i],
fill="#6ee7b7", tags="curve")

# ----- Bucle principal -----
def update_loop():
    global t_sim, qa, qf, u_f, O2_meas

    # aire con perturbación
    qa_ss = qa_effective(t_sim, qa_nom)
    qa += (DT/TAU_QA)*(qa_ss - qa)

    # u1 fijo = 0.95 (sin PID)
    u_f = U_MAX

    # dinámica combustible y medición
    qf_ss = Kf*u_f
    qf += (DT/TAU_QF)*(qf_ss - qf)
    O2_true = o2_percent(qa, qf)
    O2_meas += (DT/TAU_O2)*((O2_true + random.uniform(-NOISE_O2, NOISE_O2))
- O2_meas)

```



```

O2_meas = max(0.0, min(21.0, O2_meas))

# UI,
o2p = max(0.0, min(6.0, O2_meas))
bar_h = (o2p/6.0)*55
cv.coords("o2bar", 525, 355-bar_h, 535, 355)

qf_model_kgh = max(qf, 0.0)
Qin_BTUh      = (qf_model_kgh*FUEL_SCALE) * HHV_BTU_PER_KG
eta_direct    = max(0.0, min(100.0, 100.0 * Q_OUT_BTUH / max(Qin_BTUh,
1e-6)))

lbl_o2.config(text=f"O2 chimenea = {O2_meas:5.2f} %")
lbl_u.config(text=f"Apertura u1 = {u_f:5.3f} [fijo]")
lbl_q.config(text=f"qf(modelo) = {qf_model_kgh:,.0f} kg/h")
lbl_eta_big.config(text=f"η (directo) = {eta_direct:5.2f} %")
lbl_qout.config(text=f"Q salida (400 BHP) = {Q_OUT_BTUH:,.0f} Btu/h")
lbl_qin.config(text=f"Q entrada (estimada) = {Qin_BTUh:,.0f} Btu/h")

update_trend(O2_meas)
t_sim += DT
root.after(int(DT*1000), update_loop)

# ----- Run -----
def start():
    update_clock()
    root.after(int(DT*1000), update_loop)

start()
root.mainloop()

```