



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**SISTEMAS DE INFORMACIÓN**  
**INFORME PROYECTO FINAL GEMELO DIGITAL**

**GRUPO 2**

**Integrantes:** Alomoto Lenin, Morillo Juan, Pillajo Liz, Rodriguez López Kennet, Toro Elser

**PLANTA NUCLEAR - GEMELO DIGITAL**

**OBJETIVO GENERAL**

El presente proyecto tiene como objetivo principal desarrollar un gemelo digital de una planta nuclear, el cual permitirá simular y analizar su comportamiento en una variedad de escenarios operativos, tanto normales como críticos. Este gemelo digital servirá como una herramienta avanzada para mejorar la seguridad operativa, optimizar la eficiencia energética y perfeccionar las estrategias de mantenimiento de la instalación. Adicionalmente, se complementará este estudio con un proyecto físico basado en un motor Stirling, el cual demostrará de manera práctica los principios de transferencia y conversión de energía, validando así los conceptos teóricos aplicados en el modelo digital y proporcionando una comprensión más profunda de los procesos involucrados en la generación y gestión de energía.

**OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Utilizar herramientas de diseño y simulación, como Blender y Unity, para crear un modelo digital detallado y funcional de una planta nuclear. Este modelo deberá replicar con precisión los procesos operativos de la instalación, permitiendo la evaluación de su funcionamiento bajo diferentes condiciones, la identificación de posibles fallos o vulnerabilidades, y la propuesta de mejoras en su operación y seguridad.

2. Diseñar, construir y poner en marcha un motor Stirling que sirva como representación física de los principios de generación y transferencia de energía. Este motor permitirá demostrar de manera tangible los conceptos clave de conversión de energía térmica en energía mecánica, validando los principios teóricos aplicados en el gemelo digital y proporcionando una base experimental para contrastar los resultados obtenidos en la simulación.

3. Recopilar, analizar y comparar los datos generados tanto en la plataforma digital como en el proyecto físico, con el fin de identificar patrones, tendencias y áreas de oportunidad. Los datos generados por el motor Stirling, serán presentados en gráficas estadísticas con la herramienta Graffana. Este análisis permitirá optimizar los procesos operativos de la planta nuclear, proponer soluciones innovadoras para la gestión energética y mejorar los protocolos de seguridad, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles en el ámbito de la energía nuclear.

## **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, la industria energética enfrenta el desafío de mejorar la eficiencia y seguridad de sus operaciones, especialmente en instalaciones críticas como las plantas nucleares. Una solución innovadora para abordar este reto es la implementación de gemelos digitales, que son réplicas virtuales de alta precisión de activos físicos y procesos industriales. Estas representaciones digitales permiten simular escenarios operativos y replicarlos en entornos controlados, facilitando la toma de decisiones informadas y la optimización de recursos [1].

El desarrollo de un gemelo digital para una planta nuclear implica la creación de una réplica virtual de la instalación, integrando datos en tiempo real obtenidos a través de

sensores y sistemas avanzados. Esta herramienta posibilita la predicción de comportamientos, la identificación de posibles fallos y la optimización del funcionamiento de la planta, contribuyendo a mejorar la eficiencia en la generación de energía y a garantizar un suministro más seguro y confiable [2].

Complementariamente, el estudio de sistemas físicos, como los motores Stirling, ofrece una perspectiva práctica sobre la conversión y aprovechamiento de energía. Estos motores, conocidos por su versatilidad y eficiencia, sirven como modelos físicos para demostrar principios clave de generación de energía. La combinación del análisis de gemelos digitales con proyectos físicos basados en motores Stirling proporciona una comprensión integral de los procesos de generación y gestión energética, permitiendo validar conceptos teóricos y explorar nuevas oportunidades de mejora [3].

## **MARCO TEÓRICO**

### **Gemelo Digital**

Representación virtual precisa de un activo físico o proceso industrial, que permite simular y monitorear su comportamiento en tiempo real. Esta tecnología integra datos obtenidos de sensores y sistemas avanzados para replicar escenarios productivos y facilitar la toma de decisiones informadas en la gestión de activos [4].

### **Unity**

Plataforma líder en la creación de contenido 3D en tiempo real, ampliamente utilizada para desarrollar aplicaciones interactivas y simulaciones. Su versatilidad y capacidad para integrar modelos 3D la hacen ideal para la implementación de gemelos digitales en diversos sectores industriales [5].

## **Blender**

Herramienta de código abierto para modelado 3D, animación y renderizado. Se utiliza en la creación de modelos tridimensionales detallados que pueden ser importados en sistemas como Unity, facilitando el desarrollo de entornos virtuales y gemelos digitales precisos [6].

## **Planta Nuclear**

Instalación industrial dedicada a la generación de energía eléctrica mediante reacciones nucleares controladas. Estas plantas aprovechan la energía liberada en la fisión nuclear para producir vapor, que acciona turbinas conectadas a generadores eléctricos [7].

## **Reactor**

El reactor nuclear es el componente central de una planta nuclear donde se produce la reacción de fisión controlada. En él, los núcleos de los átomos se dividen, liberando una gran cantidad de energía en forma de calor, que es utilizada para generar vapor [8].

## **Generador de Vapor**

Es un intercambiador de calor que transfiere la energía térmica del reactor al agua, convirtiéndola en vapor. Este vapor se dirige posteriormente a las turbinas para la generación de electricidad [9].

## **Sistema Presurizador**

Mantiene la presión adecuada en el circuito primario de refrigeración del reactor, evitando la formación de burbujas de vapor y asegurando una transferencia de calor eficiente. Este control de presión es esencial para la operación segura del reactor [10].

## **Blindaje de Hormigón**

Es una estructura diseñada para proteger a las personas y el medio ambiente de la radiación emitida por el reactor. Este escudo absorbe y atenúa la radiación, garantizando niveles seguros en el exterior de la planta [11].

## **Torres de Refrigeración**

Son estructuras que disipan el calor residual del agua de condensación del vapor, liberándolo a la atmósfera. Este proceso permite reutilizar el agua enfriada en el ciclo de generación de vapor, mejorando la eficiencia del sistema [12].

## **Turbina de Vapor**

Es un dispositivo que convierte la energía térmica del vapor en energía mecánica rotativa. El vapor a alta presión y temperatura hace girar las palas de la turbina, generando movimiento que se transfiere al generador eléctrico [13].

## **Condensador**

Es un intercambiador de calor que enfría el vapor exhausto de la turbina, transformándolo nuevamente en agua líquida. Este proceso cierra el ciclo termodinámico, permitiendo que el agua sea recirculada al generador de vapor [14].

## **Generador Eléctrico**

Encargado de convertir la energía mecánica de la turbina en energía eléctrica. Al girar, induce corriente eléctrica que se distribuye a la red para consumo [15].

## **Potencia de Salida**

Cantidad de energía eléctrica que una planta nuclear puede generar y suministrar a la red. Este valor depende del diseño del reactor y de la eficiencia de los componentes del sistema de generación [16].

## **Motor Stirling**

Motor térmico de combustión externa que opera mediante la compresión y expansión cíclica de un gas a diferentes temperaturas, convirtiendo la energía térmica en trabajo mecánico. Es conocido por su eficiencia y capacidad de usar diversas fuentes de calor. [17]

## **Generador de Energía**

Dispositivo que transforma energía mecánica en energía eléctrica. En un motor Stirling, el movimiento mecánico producido se acopla a un generador eléctrico para producir electricidad. [18]

## **Expansión de un Gas**

Ocurre cuando aumenta el volumen del gas en cuestión, debido a un incremento de temperatura o una disminución de presión. En un motor Stirling, el gas de trabajo se expande al calentarse, empujando el pistón y generando trabajo mecánico. [19]

## **Contracción de un Gas**

Disminución de su volumen como resultado de una reducción de temperatura o un aumento de presión. En el ciclo de un motor Stirling, el gas de trabajo se enfría y se contrae, permitiendo que el pistón regrese a su posición original y completando el ciclo. [19]

## **Energía Térmica en Trabajo Mecánico**

La conversión de energía térmica en trabajo mecánico es el principio fundamental de operación de motores térmicos como el Stirling. A través de ciclos de calentamiento y enfriamiento del gas de trabajo, la energía térmica se transforma en movimiento mecánico útil. [17]

## **Dinamo**

Es un generador eléctrico que convierte energía mecánica en energía eléctrica mediante la inducción electromagnética. En sistemas con motores Stirling, la dinamo se acopla al motor para generar electricidad a partir del movimiento mecánico producido. [18]

## **Sensores**

Los sensores son dispositivos que detectan y miden variables físicas, como temperatura, presión o posición, y las convierten en señales eléctricas para su monitoreo y análisis. En el contexto de un motor Stirling acoplado a un generador, se emplean sensores para monitorear parámetros operativos y evaluar la eficiencia del sistema. [18]

## **Grafana**

Plataforma de análisis y monitorización de código abierto que se utiliza principalmente para visualizar y analizar métricas de diversas fuentes de datos. Permite a los usuarios crear, explorar y compartir cuadros de mando interactivos, así como realizar consultas y alertas sobre los datos con independencia de dónde estén almacenados. [20]

# **METODOLOGÍA**

## **1. Recolección de Información**

Se recopiló información relevante sobre los conceptos clave involucrados en el proyecto, incluyendo gemelo digital, motores Stirling y generación de energía. Se utilizaron fuentes bibliográficas académicas, artículos técnicos y documentos. La información fue evaluada para garantizar su pertinencia y fiabilidad.

## **2. Desarrollo del Gemelo Digital**

Se implementó el gemelo digital de la planta nuclear utilizando el software Unity y Blender. Se modelaron los principales componentes de la planta, como el reactor, generador de vapor, sistema presurizador, turbina de vapor y generador eléctrico. La simulación permitió replicar el comportamiento de la planta en un entorno virtual, facilitando el análisis de su funcionamiento.

Para garantizar la precisión del gemelo digital, se realizaron pruebas de simulación en distintos escenarios operativos. Esto permitió ajustar los parámetros de simulación y optimizar el realismo del modelo digital. Los resultados obtenidos se compararon con datos teóricos para evaluar su fiabilidad.

## **3. Implementación del Motor Stirling**

Se construyó un prototipo físico de un motor Stirling con materiales adecuados para su funcionamiento. Se acopló a un generador eléctrico para evaluar su capacidad de conversión de energía térmica en energía eléctrica. El diseño del motor se basó en modelos teóricos previamente estudiados y ajustados según las condiciones experimentales.



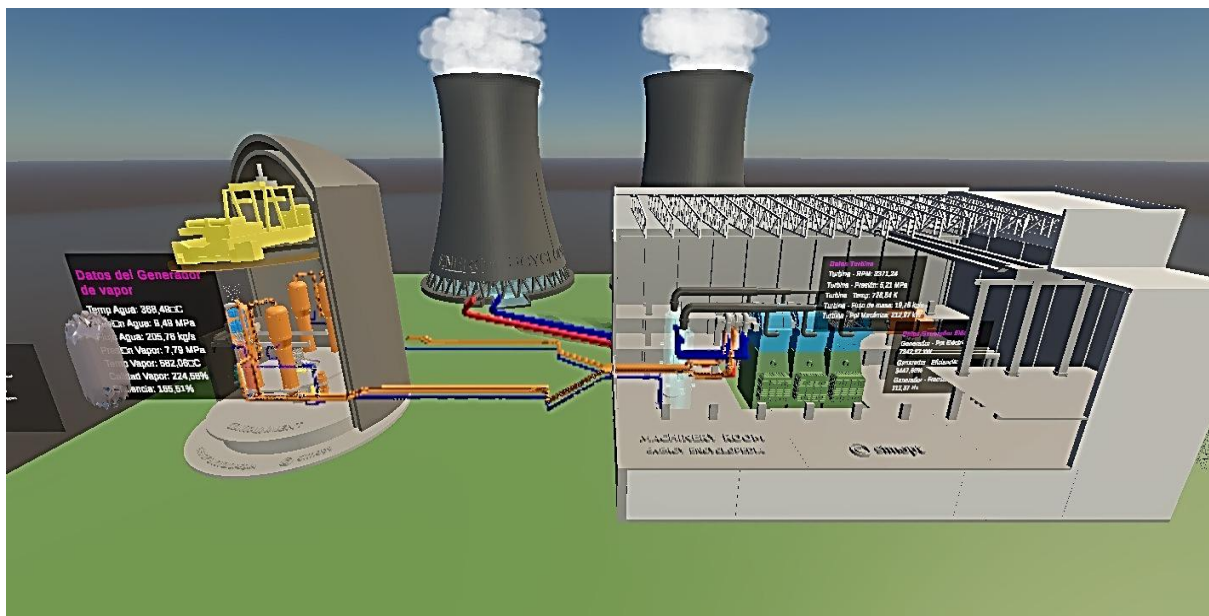
Durante la fase de prueba, se realizaron mediciones de eficiencia y rendimiento del motor en diferentes condiciones de operación. Estas pruebas permitieron identificar puntos de mejora y optimizar el diseño del sistema para maximizar su eficiencia energética.

#### 4. Integración de Sensores y Monitoreo

Se utilizaron sensores para medir temperatura, presión y otras variables críticas en el motor Stirling y en el gemelo digital. Estos datos fueron analizados para evaluar la eficiencia del sistema y su posible aplicación en generación de energía. Se implementaron sistemas de captura de datos en tiempo real para monitorear las variaciones de las variables clave.

El análisis de datos recopilados permitió detectar patrones de comportamiento en el funcionamiento del motor y la planta digital. Con base en estos resultados, se propusieron estrategias para mejorar la gestión energética y optimizar la operación del sistema.

#### 5. Modelo Planta Nuclear



*Figura 1. Modelo Planta Nuclear.*

## **SECCIÓN 1: Reactor Building**

El edificio del reactor es una estructura sólida hecha principalmente de hormigón armado que alberga los componentes importantes de la central nuclear. El edificio garantiza la máxima seguridad durante el funcionamiento y en caso de accidente.

### **1) Reactor**

Lugar donde se produce la fisión controlada de los núcleos del combustible nuclear, liberando energía en forma de calor, que se usa para generar electricidad. Hay muchos tipos de reactor; el PWR, se caracteriza por una vasija de presión de acero de paredes gruesas. [21]

**1.1) Reactor Core:** El calor se genera en una central nuclear por la fisión de los núcleos de uranio del combustible nuclear cargado en el núcleo del reactor. Para producir combustible nuclear suele utilizarse uranio natural o enriquecido o MOX, una mezcla de óxidos de uranio y plutonio. El núcleo del reactor PWR también contiene agua ligera como moderador y al mismo tiempo como refrigerante. Las barras que absorben se utilizan para controlar el curso de la reacción de fisión.

**1.2) Fuel Assembly:** Los elementos combustibles de los PWR suelen contener entre 179 y 264 varillas; el diámetro de los elementos combustibles es de aproximadamente 20 cm. Las varillas están soportadas estructuralmente para que no se desplacen mutuamente por las tensiones térmicas y de deformación extremas del núcleo del reactor. Algunos elementos tienen menos varillas; las varillas de control y regulación se insertan en los huecos resultantes. El combustible total, unos 121-193 elementos combustibles, se denomina carga de combustible en el núcleo del reactor. En total, hay 18 millones de pastillas en el núcleo del reactor. Los elementos combustibles de los PWR tienen una sección cuadrada; el combustible de los reactores rusos VVER tiene una sección hexagonal.

**1.3) Control Rod Drive Mechanism:** Un mecanismo situado en la parte superior de la tapa de la vasija del reactor capaz de insertar o retirar una barra de control a un ritmo lento y controlado, así como de proporcionar una inserción rápida en caso de que se produzca una situación anormal.

**1.4) Control Rods:** Las barras de control (también llamadas barras reguladoras), fabricadas en acero aleado con boro y que contienen cadmio o hafnio, se insertan entre los haces de combustible de un reactor nuclear. Al sacar las barras del núcleo del reactor, se reduce la concentración de absorbente, lo que provoca un aumento de la potencia del reactor. Si se insertan más barras de control, se inhibe la reacción y disminuye la potencia del reactor. En algunos tipos de reactores, la parte superior de los haces de combustible está hecha de material absorbente; la profundidad de inserción del combustible en el núcleo del reactor controla la potencia del reactor.

**1.5) Neutron Reflector:** El núcleo del reactor está rodeado por un reflector de neutrones (deflector del núcleo del reactor) que refleja los neutrones que de otro modo escaparían. Estos neutrones vuelven a estar disponibles para la reacción en cadena.

**1.6) Reactor Pressure Vessel:** El cuerpo de la vasija del reactor es el componente más importante del circuito primario. Contiene los elementos combustibles, el refrigerante y los accesorios para soportar el flujo de refrigerante, así como las estructuras de soporte. Suele ser cilíndrica y está abierta en la parte superior para permitir la carga del combustible.

**1.7) Cooling Water Inlet:** El agua que ha gastado parte de su energía en el generador de vapor es devuelta al reactor a través del ramal frío por la bomba de circulación principal. Tras pasar por el acoplamiento de la vasija de presión, el agua se dirige hacia abajo a lo largo de la pared de la vasija, en el fondo hace un giro y entra en el núcleo de manera uniforme.

**1.8) Hot Water Outlet:** El acoplador de salida es donde la rama caliente de las tuberías primarias se conecta a la vasija de presión del reactor. Tras calentarse a su paso por el núcleo del reactor, el agua se dirige a través de la tubería de salida al generador de vapor. El número de aberturas de entrada y salida en la vasija del reactor es el mismo que el número de ramales en el circuito primario.

**1.9) Datos importantes:** Un PWR tiene entre 150 y 250 elementos combustibles, cada uno de los cuales contiene entre 200 y 300 barras de combustible. El núcleo del reactor contiene entre 80 y 100 toneladas de uranio.

## **2) Steam Generator**

El intercambiador de calor del generador de vapor es la interfaz entre el circuito primario y el secundario. Su función es generar vapor secundario utilizando el calor del reactor. [22]

**2.1) FeedWater Inlet:** El tubo de alimentación circular que contiene varios tubos de salida doblados está situado en la parte superior del generador de vapor. Lleva agua de alimentación al espacio entre la pared del recipiente a presión y la pared del haz de tubos.

**2.2) Input Collector (Hot Leg):** Una cámara cilíndrica que divide el refrigerante calentado del circuito primario en tubos individuales de intercambio de calor.

**2.3) Output Collector (Cold Leg):** El refrigerante, que libera parte de su energía en el generador de vapor, se devuelve a través del colector de salida, de vuelta al reactor nuclear.

**2.4) Heat-Exchange Tube Bundle:** El vapor se genera cuando el agua de alimentación entra en contacto con las superficies de los haces de tubos calientes (miles de tubos de pequeño diámetro) que conducen el refrigerante primario.

**2.5) Primary Moisture Separator:** La separación primaria de gotas de agua del vapor, se hace en generadores de vapor verticales con separadores ciclónicos centrífugos.

**2.6) Secondary Moisture Separator:** En los separadores de rejilla secundarios, el vapor se seca aún más. Suelen ser de chapa ondulada y crean canales en zigzag que dejan pasar el vapor mientras capturan las gotas de agua.

**2.7) Steam Outlet:** Normalmente, el vapor saturado del generador de vapor PWR tiene una temperatura aproximada de 275 °C (527 °F). El vapor del generador de vapor se envía a una turbina de vapor (circuito secundario).

**2.8) Datos importantes:** Cada generador de vapor puede medir hasta 21 m de alto y pesar 800 toneladas. Y contener entre 3.000 y 16.000 tubos de intercambio de calor.

### **3) Main Circulation Pump (Bomba de circulación principal)**

Hace circular el refrigerante del circuito primario, el llamado transporte del calor generado desde el reactor hasta los generadores de vapor. [23]

### **4) Pressurizer System**

La presión en el circuito primario se mantiene por un presurizador. El presurizador está parcialmente lleno de agua que se calienta hasta la temperatura de saturación (punto de ebullición) mediante calentadores eléctricos sumergidos para la presión deseada. [23]

### **5) Fuel Loading Machine**

La máquina de carga de combustible es un equipo de manipulación de combustible nuclear diseñado para operaciones de carga y descarga de combustible nuclear. [23]

## **6) Spent Fuel Pool**

El combustible gastado extraído del reactor nuclear se almacena bajo el agua. El agua actúa como blindaje radio protector y como refrigerante. [23]

## **7) Polar Crane**

La grúa polar nuclear puede utilizarse para elevar los equipos principales del circuito primario (por ejemplo, el generador de vapor, la vasija de presión del reactor, la cubierta superior de la vasija de presión, la unidad de prensado, la cesta y los contenedores de combustible gastado) durante la construcción, el funcionamiento y el desmantelamiento de la central nuclear. [23]

## **8) Concrete Shielding**

También llamada contención. Estructura de hormigón armado que protege el reactor y otros componentes del circuito primario y actúa como barrera contra las radiaciones ionizantes. [23]

## **SECCIÓN 2: Cooling Tower**

Una torre de refrigeración se utiliza principalmente para enfriar el agua utilizada en los condensadores de las turbinas. En la mayoría de los casos son chimeneas achaparradas de hormigón armado con forma de hiperboloide de revolución, de hasta 150 m de altura. [24]

**1) Water Distribution:** El agua caliente se distribuye a las boquillas de pulverización mediante tuberías o canales de hormigón que garantizan una distribución uniforme del agua caliente a todas las boquillas de pulverización.

**2) Cold Water:** El agua refrigerada se recoge en la piscina redonda de la base de la torre y se bombea de vuelta al condensador de las turbinas.

**3) Hot Water:** El agua de refrigeración calentada en los condensadores de los generadores de vapor se transporta por tuberías hasta la torre de refrigeración. Allí, se transporta hacia arriba a través de canales ascendentes y se envía a todas las boquillas de pulverización mediante un sistema de distribución.

**4) Fill:** El relleno de una torre de colación es una gran estructura, normalmente de plástico, con muchos canales verticales. El agua caliente se pulveriza sobre sus paredes y corre por ellas mientras el aire frío sube por los canales. Durante un largo periodo de tiempo, la fina película de agua permite una transferencia de calor eficaz, principalmente por evaporación.

**5) Supports:** El armazón hiperboloide de hormigón de una torre de refrigeración se levanta sobre una serie de puntales de hormigón de apoyo. Grandes cantidades de aire frío del exterior pueden ser aspiradas a través de los huecos entre estos pilares diagonales.

**6) Hot Water Spray System:** El agua caliente entrante se distribuye a través de boquillas de pulverización instaladas en el interior de la torre a aproximadamente el 10% de su altura total. Las boquillas rocían el agua caliente uniformemente por todo el relleno. El enfriamiento comienza en cuanto el agua sale de las boquillas, por lo que es necesario maximizar la interacción entre el agua más caliente y el aire más frío. Una boquilla que genere gotas muy pequeñas tendrá un mayor efecto refrigerante que una boquilla que haga gotas grandes y gordas.

**7) Drift eliminators:** El aire que sale de la torre de refrigeración transporta pequeñas gotas de agua. Para minimizar la pérdida de agua en el aire de salida, éste tiene que pasar a través de un sistema de dispositivos similares a deflectores denominados eliminadores de gotas. Las láminas o aspas de los eliminadores alteran la dirección del aire. Esto hace que las gotas de agua arrastradas por la corriente de aire se acumulen en las superficies de las láminas del eliminador. Las gotas se aglomeran y adquieren rápidamente el tamaño y la masa suficientes para superar la velocidad de la corriente de aire de descarga y drenar de nuevo en la torre de refrigeración.

**8) Tower Shell:** Las torres de refrigeración con tiro de aire natural tienen forma de hiperboloide rotacional. Esta forma requiere la menor cantidad de hormigón para una estructura tan grande, confiere a la torre de refrigeración capacidad para resistir la fuerza de los vientos cruzados y acelera el flujo de aire a través de la torre, lo que aumenta su capacidad de refrigeración. Las torres de refrigeración son estructuras muy grandes, con bases de hasta 100 m de ancho y 200 m de altura.

**9) Natural Air Draft:** La corriente de aire natural se crea por la diferencia de densidad entre el aire húmedo y caliente del interior de la torre y el aire frío y seco del exterior. El aire caliente húmedo tiene una densidad menor que el aire seco, por lo que asciende, y la flotabilidad del aire húmedo produce una corriente de aire a través de la torre. En la amplia base, hay espacio suficiente para un sistema de refrigeración que absorbe grandes cantidades de aire frío del exterior. A media altura de la torre, la velocidad del aire aumenta y su densidad disminuye. Tras expandirse por una abertura más amplia, el aire se enfría rápidamente y se mezcla violentamente con el aire frío del exterior.



### **SECCIÓN 3: Turbine Hall**

La sala de turbinas es una amplia zona abierta que contiene los equipos necesarios para generar electricidad a partir del vapor. Los más importantes son las turbinas, los condensadores y los generadores eléctricos, aunque también pueden encontrarse aquí separadores de humedad o calentadores regenerativos. [25]

#### **1) Steam Turbine**

Una turbina de vapor es un dispositivo rotativo que convierte la energía del vapor en energía mecánica de rotación perteneciente al eje de la turbina. Se utiliza para accionar generadores eléctricos en todos los ciclos de vapor. Las turbinas más grandes se componen de varias piezas formadas por rodets que aumentan gradualmente de tamaño. [26]

**1.1) High Pressure Section:** El vapor entra en la turbina con una cierta energía térmica interna, que cambia gradualmente en las secciones individuales de la turbina por expansión a la energía cinética del eje giratorio de la turbina.

**1.2) Low Pressure Section:** Los diámetros del rodete de las últimas secciones de baja presión están limitados por la fuerza centrífuga máxima que actúa sobre los álabes y, por tanto, por su longitud. Si hay más vapor en la zona de baja presión de la turbina, es necesario dividirla en dos, a veces tres, partes de baja presión. En las turbinas de vapor de varias secciones, el diámetro del rodete de cada sección subsiguiente es mayor, porque la expansión gradual del vapor también aumenta su volumen.

**1.3) Turbine Rotor:** El rotor de una turbina de vapor consta de un eje central y varios patines montados sobre el eje. La energía del vapor en la turbina hace girar el rotor, transfiriendo energía mecánica a un generador eléctrico.

**1.4) Runner Blades:** Las palas de rodadura tienen una forma compleja y su fabricación está sujeta a estrictos requisitos. Suelen ser de fundición o fresadas con precisión. Debido a los parámetros cambiantes del vapor, los álabes de cada canal son más grandes que los anteriores. En el caso de las secciones de baja presión, su longitud superaría los límites de deformación, por lo que el vapor se divide en secciones paralelas más pequeñas.

**1.5) Guide Vanes:** En la carcasa de la turbina hay ruedas con álabes guía inmóviles. Estos álabes dirigen el vapor hacia los álabes del rodete. Cada rodete del rotor tiene su propia rueda fija con álabes guía.

**1.6) Bearings:** El rotor de la turbina se apoya en varios cojinetes radiales deslizantes. Para eliminar las fuerzas axiales, se instala un cojinete de empuje en el eje. Los cojinetes de la turbina tienen su propio sistema circulatorio de refrigeración y aceite lubricante.

**1.7) Turbine Casing:** La carcasa del estator de una turbina suele ser de acero fundido y, para las piezas de baja presión, también puede ser una estructura soldada. Está seccionada horizontalmente y su forma sigue la del rotor. Una carcasa seccionada permite instalar cómodamente los álabes guía y colocar el rotor con precisión.

## **2) Electric Generator**

Un generador eléctrico es una máquina rotativa que convierte la energía mecánica tomada del rotor de la turbina en energía eléctrica. Normalmente, su rotor crea un campo magnético giratorio que induce tensión en los devanados del estator. [27]

**2.1) Rotor:** El generador eléctrico funciona según el principio de inducción electromagnética: el campo magnético giratorio formado por las bobinas del rotor genera una tensión eléctrica alterna en las bobinas fijas del estator.

**2.2) Stator:** En los sistemas eléctricos actuales, se usa una línea de alimentación trifásica, por lo que los generadores eléctricos tienen al menos tres pares de bobinas de estator para cada sección.

**2.3) Power Output:** Los generadores eléctricos de potencia tienen al menos tres pares de bobinas de estator para cada fase. La corriente eléctrica resultante se conduce a través de tres conductores encapsulados a un transformador.

**2.4) Datos importantes:** Al 31 de diciembre de 2020, todos los reactores de agua a presión (PWR) operativos del mundo alcanzaban en conjunto una potencia eléctrica neta de 287,1 gigavatios. Son el tipo más común de reactores nucleares utilizados (302 en funcionamiento). En comparación, los reactores de agua en ebullición eran el segundo tipo más utilizado, con una potencia eléctrica neta de 64,1 gigavatios.

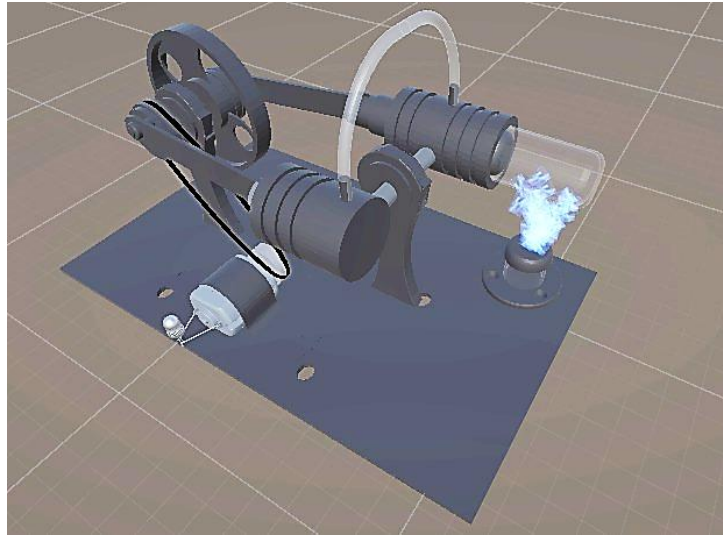
### **3) Condenser**

El vapor de la turbina se condensa en el condensador. Este es un tipo de intercambiador de calor. El vapor condensado vuelve al generador de vapor a través de un sistema de intercambiadores de calor de regeneración (circuito secundario también cerrado). El agua de refrigeración calentada del condensador se enfría en la torre de refrigeración. [23]

### **4) Power Output**

La producción neta de energía eléctrica es una medida de cuánta electricidad se suministra a la red. Parte de la electricidad generada es consumida por la propia central para su producción. Como la producción de electricidad difiere entre invierno y verano, debido a la variación estacional de la eficiencia de refrigeración, se utiliza una producción media o la producción más baja del verano. [23]

## 6. Modelo Motor Stirling



*Figura 2. Modelo Motor Stirling*

### **COMPONENTES PRINCIPALES**

- 1. Volante de inercia:** Su función es almacenar energía mecánica y mantener el movimiento uniforme del motor.
- 2. Bielas y manivelas:** Convierten el movimiento lineal de los pistones en movimiento rotatorio del volante.
- 3. Pistón desplazador:** Su función es mover el aire dentro del cilindro entre la zona caliente y la fría para generar cambios de presión.
- 4. Pistón de potencia:** Es el encargado de recibir la fuerza generada por la expansión y contracción del aire, transmitiéndola al mecanismo de movimiento.
- 5. Cilindro de trabajo:** Es el tubo metálico donde se mueve el pistón de potencia. Su función es contener el aire que se expande y contrae con el calor.
- 6. Base metálica:** Es la estructura donde están montadas todas las piezas. Brinda estabilidad y soporte al motor.

**7. Copa de alcohol o fuente de calor (marcada en azul):** Es el pequeño recipiente circular en la base, donde se coloca el combustible (alcohol, etanol, etc.). Genera el calor necesario para la expansión del aire dentro del motor.

**8. Botella de vidrio:** Se usa para almacenar el combustible antes de colocarlo en la copa de alcohol.

**9. Tubo de vidrio:** Puede servir como un componente adicional para el motor, posiblemente para contener aire o algún fluido en demostraciones.

**10. Juntas tóricas y bandas elásticas:** Se utilizan para evitar fugas de aire y mejorar la transmisión de movimiento en el sistema.

**11. Cuerda y pipeta:** La cuerda puede ser utilizada como mecha para la copa de alcohol. La pipeta se usa para transferir el combustible con precisión.

**12. Pequeño motor eléctrico (dinamo):** Se encuentra en la base, con cables conectados al mecanismo. Convierte el movimiento mecánico en energía eléctrica, demostrando una posible aplicación del motor Stirling.

**13. Tubo de plástico transparente:** Válvula de escape o conducto de ventilación, permitiendo la salida controlada de aire o vapor generado por la expansión del gas dentro del motor. Se incluyen estos tubos para evitar acumulaciones de presión en el cilindro y permitir que el aire se desplace correctamente.

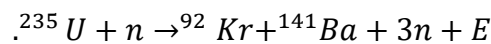
**14. LED:** Conectado al pequeño motor eléctrico (dinamo) presente en la base del motor Stirling. Cuando el motor gira, genera electricidad alimentando al LED.

## RESULTADOS

### Planta nuclear

El desarrollo del gemelo digital de la planta nuclear en Unity permitió simular los principales procesos involucrados en la generación de energía nuclear. Se replicaron con precisión las etapas de fisión en el reactor, la transferencia de calor, la conversión de energía mecánica y la generación de electricidad. Estas simulaciones se realizaron bajo distintos escenarios operativos, proporcionando una visión detallada del comportamiento de una planta nuclear real.

El reactor nuclear es el componente central donde ocurre la reacción de fisión controlada de los núcleos de uranio. Esta reacción sigue la ecuación:



donde un neutrón impacta un átomo de **uranio-235**, dividiéndolo en productos más ligeros y liberando **energía E** en forma de calor. Esta energía térmica es transferida a un circuito de refrigeración que mantiene estable el proceso. [28]

El **moderador de neutrones** (agua ligera en reactores PWR) reduce la velocidad de los neutrones mediante colisiones elásticas, permitiendo una reacción en cadena estable. Su eficiencia se mide con la fórmula del **factor de moderación** [29]:

$$k_{\infty} = n p f \varepsilon$$

$k_{\infty}$ : Factor de multiplicación infinito

n: Factor de reproducción

p: Probabilidad de escape a las resonancias

f: Factor de utilización térmica

$\varepsilon$  : Factor de fisión rápida

El **sistema de control del reactor** emplea **barras de control** de boro o cadmio, que absorben neutrones y regulan la potencia del reactor. La ecuación para la reacción en cadena es:

$$k_{ef} = \frac{\text{nuevos neutrones producidos}}{\text{neutrones absorbidos} + \text{perdidos}}$$

Si  $k_{ef} = 1$ , la reacción es **crítica** (estable). Si es mayor, es **supercrítica** (aumento de potencia), y si es menor, es **subcrítica** (disminución de potencia). [30]

El **generador de vapor** transfiere el calor del reactor al agua secundaria, generando **vapor sobrecalentado**. La ecuación que describe la transferencia de calor es:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

donde Q es la energía térmica transferida, m la masa del refrigerante,  $c_p$  la capacidad calorífica y  $\Delta T$  el cambio de temperatura. [31]

La **turbina de vapor** convierte la energía térmica en energía mecánica mediante la expansión del vapor, siguiendo la ecuación de **trabajo en una turbina**:

$$W = \dot{m} (h_1 - h_2)$$

donde  $\dot{m}$  es el flujo de masa del vapor y  $h_1$ ,  $h_2$  son las entalpías antes y después de la turbina. [32]

El **condensador** enfría el vapor, transformándolo nuevamente en agua líquida. La ecuación que describe el intercambio de calor en el condensador es:

$$Q = U \times A \times \Delta T_m$$

donde U es el coeficiente de transferencia de calor, A el área de intercambio y  $\Delta T_m$  la diferencia de temperatura media. [33]

Las **torres de refrigeración** eliminan el calor residual mediante evaporación y convección, regulando la temperatura del sistema. La eficiencia de enfriamiento está determinada por la ecuación:

$$n = (T_{entrada} - T_{salida}) / (T_{entrada} - T_{ambiente}) \times 100$$

donde  $T_{entrada}$  y  $T_{salida}$  son las temperaturas del agua antes y después del enfriamiento, y  $T_{ambiente}$  es la temperatura del aire externo. [34]

El **generador eléctrico** convierte la energía mecánica en electricidad a través de inducción electromagnética, siguiendo la ley de Faraday:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

[35]

donde  $\mathcal{E}$  es la fuerza electromotriz inducida,  $N$  el número de espiras y  $\frac{d\Phi}{dt}$  el cambio de flujo magnético en el tiempo.

Finalmente, la **potencia de salida** de la planta nuclear depende del diseño del reactor y la eficiencia del sistema. Se mide con la ecuación:

$$P = \eta \cdot Q$$

donde  $\eta$  es la eficiencia global y  $Q$  la energía térmica generada en el reactor.

[36]

## EXPLICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA NUCLEAR

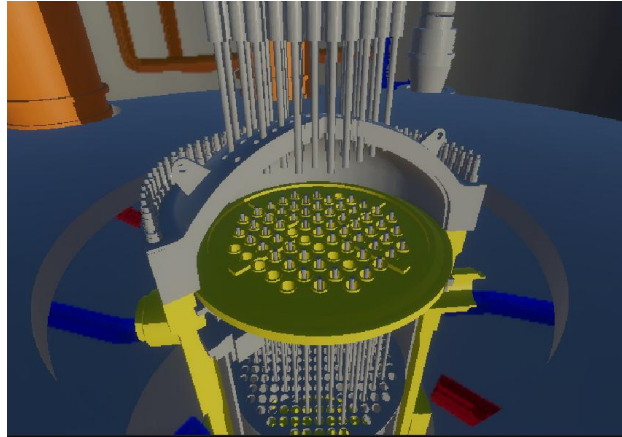
### Núcleo del reactor

En el núcleo del reactor se encuentran las barras de combustible nuclear, que suelen ser de uranio enriquecido (U-235).

Estas barras experimentan una reacción de fisión nuclear, donde los núcleos de uranio se dividen, liberando una gran cantidad de energía en forma de calor y neutrones.



Los neutrones liberados mantienen la reacción en cadena, que es controlada por las barras de control (hechas de materiales como boro o cadmio), que absorben neutrones y regulan la velocidad de la reacción.



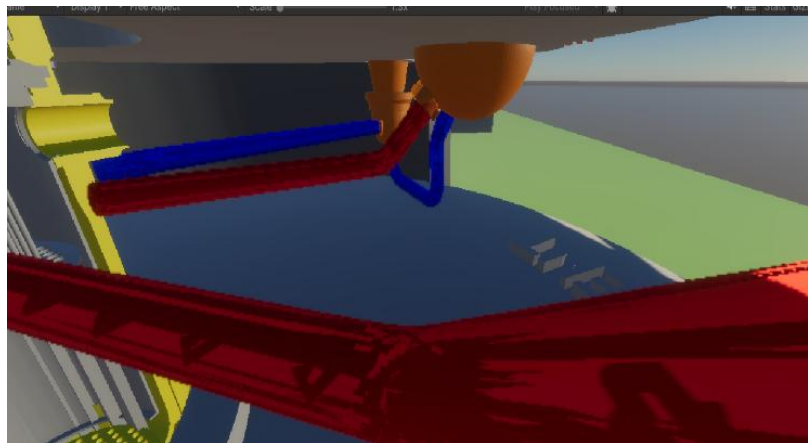
***Figura 3. Reactor nuclear***

### **Circuito primario**

El calor generado en el núcleo calienta el agua del circuito primario, que circula a alta presión para evitar que hierva, incluso a temperaturas superiores a 300°C. Esta agua caliente pasa al generador de vapor, donde transfiere su calor al agua del circuito secundario.



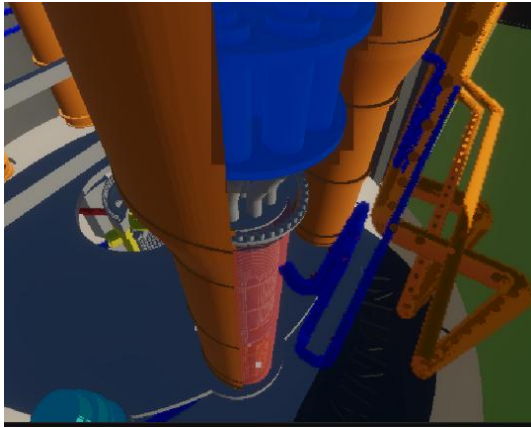
***Figura 4. Proceso de fisión***



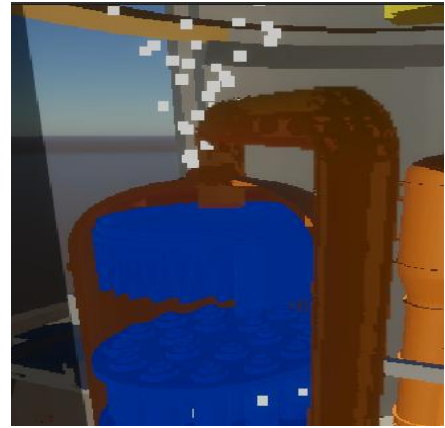
***Figura 5. Tubos de circulación***

## Circuito secundario

En el generador de vapor, el agua del circuito secundario se convierte en vapor a presión. Este va a la turbina, donde se expande y hace girar las hélices, generando energía mecánica.



*Figura 6. Steam Generator*



*Figura 7. Salida de vapor a presión*

## Generación de electricidad

La turbina está conectada a un generador eléctrico, que convierte la energía mecánica en energía eléctrica mediante inducción electromagnética. La electricidad generada se envía a la red eléctrica para su distribución.

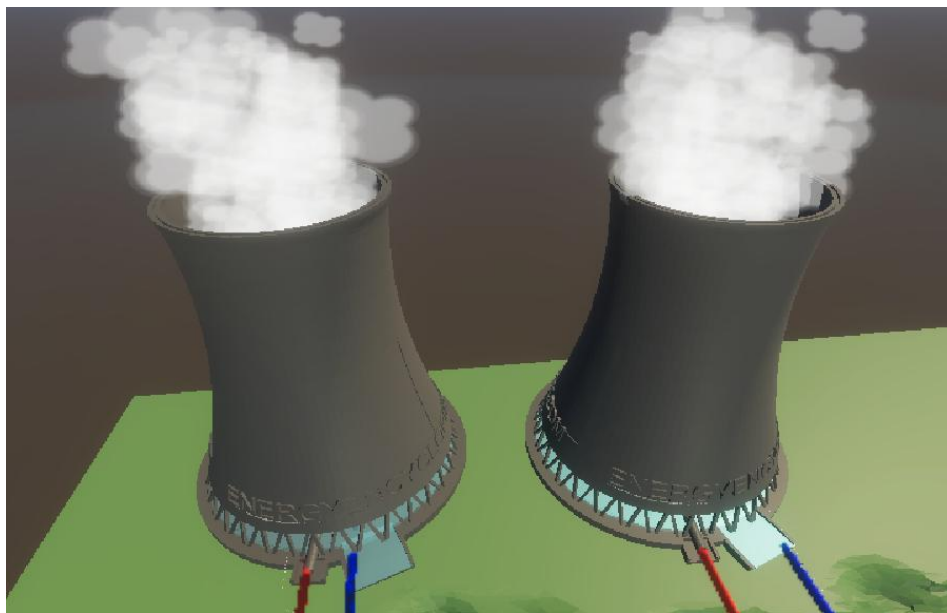


*Figura 8. Sistema de condensación de vapor*

## Condensación y enfriamiento

Después de pasar por la turbina, el vapor se enfría y condensa en un condensador, convirtiéndose nuevamente en agua líquida. El agua se bombea de vuelta al generador de vapor para repetir el ciclo.

El calor residual del condensador se disipa en el ambiente, generalmente utilizando agua de un río, lago o mar, o mediante torres de refrigeración.



*Figura 9. Torres de enfriamiento*

## Seguridad y control

Las plantas nucleares tienen múltiples sistemas de seguridad, como sistemas de refrigeración de emergencia, contenciones de hormigón y sistemas de control automatizados, para prevenir accidentes y proteger a los trabajadores y el medio ambiente.



*Figura 10. Sistema de Contención*

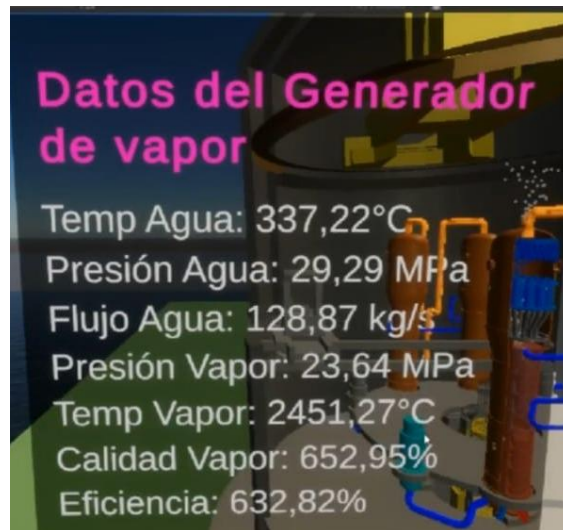
### Explicación Datos Generados Reactor

Datos del reactor	
Neutron Flux: $1E12$ n/cm <sup>2</sup> s	Gamma: 31,25 mSv/h
Temperature: 988,34 K	Presión: 14,1 MPa
Producción: 276887600000,00 n/s	Xe-135: $1,03E14$ atoms/cm <sup>3</sup>
Pérdida: 561340900000,00 n/s	Radiación: 0,10 mSv/h
Cambio: -284453300000,00 n/s	Vibración: 0,93 mm/s
k_eff: 1,00609	Control Rods: 11 inserted
Temperatura Núcleo: 847,4 °C	
Flujo Neutrónico: $14,20 \times 10^{12}$ n/cm <sup>2</sup> s	
Flujo Refrigerante: 4,00 m <sup>3</sup> /s	

*Figura 11. Datos del reactor*

**Flujo de Neutrones (Neutron Flux):** Cantidad de neutrones que atraviesan un área específica por segundo. Indica la actividad del reactor.

## Explicación Datos Generados Steam Generator



*Figura 12. Datos del generador de vapor*

**Temperatura del Agua (Temp Agua):** Indica la temperatura del agua dentro del generador de vapor antes de convertirse en vapor.

**Presión del Agua:** Es la presión a la que se encuentra el agua en el generador. Afecta la eficiencia del intercambio de calor y la conversión a vapor.

**Flujo de Agua:** Representa la cantidad de agua que entra o sale del sistema por segundo. Un valor negativo suele indicar que el agua está saliendo del generador.

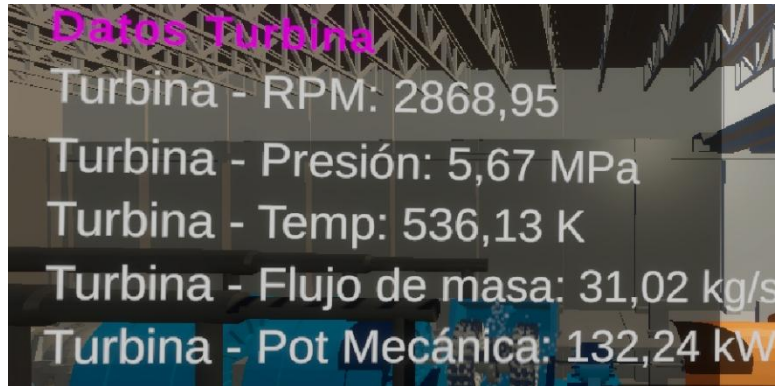
**Presión del Vapor:** Indica la presión del vapor generado, lo que influye en su capacidad para mover las turbinas y generar electricidad.

**Temperatura del Vapor (Temp Vapor):** Es la temperatura del vapor generado, la cual debe ser óptima para maximizar la eficiencia de la conversión de energía térmica en mecánica.

**Calidad del Vapor:** Representa el porcentaje de vapor en la mezcla agua-vapor. Un valor superior al 100% indicaría sobrecalentamiento.

**Eficiencia:** Muestra qué tan bien el generador de vapor convierte la energía térmica del reactor en energía útil en forma de vapor.

### Explicación Datos Generados Turbina



*Figura 13. Datos Turbina*

**RPM (Revoluciones por Minuto):** Indica la velocidad de giro de la turbina. Afecta directamente la generación de electricidad y la estabilidad del sistema.

**Presión de Entrada:** Es la presión del vapor que ingresa a la turbina. Una presión adecuada garantiza una conversión eficiente de energía térmica en energía mecánica.

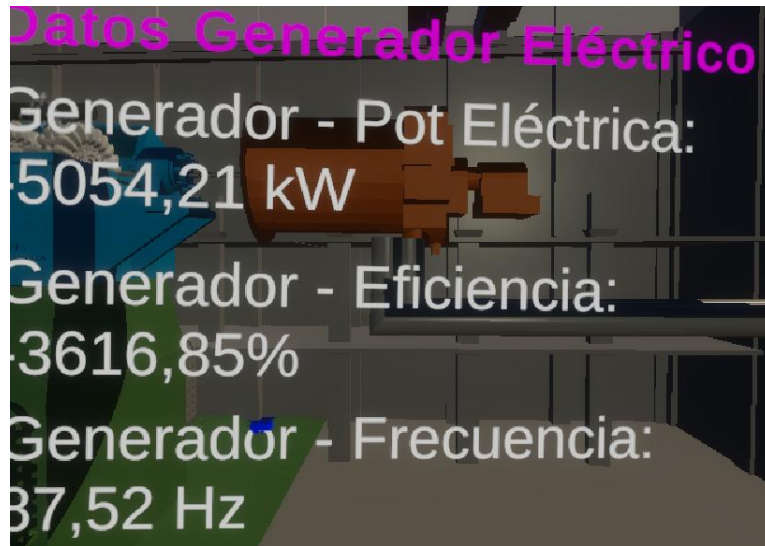
**Temperatura del Vapor:** Representa la temperatura del vapor al entrar en la turbina. Un vapor sobrecalentado mejora la eficiencia y evita la formación de gotas de agua que pueden dañar las aspas.

**Flujo de Masa:** Es la cantidad de vapor que pasa por la turbina por segundo. Relacionado con la potencia generada y el consumo de energía del reactor.

**Potencia Mecánica Generada:** Es la energía mecánica obtenida a partir del vapor, que luego será convertida en electricidad por un generador acoplado a la turbina.



## Explicación Datos Generados Electric Generator



*Figura 14. Datos del Generador Eléctrico*

**Potencia Eléctrica del Generador:** Representa la cantidad de energía eléctrica que el generador entrega al sistema. Este valor depende de la carga conectada y de las condiciones de operación del generador.

**Eficiencia del Generador:** Indica la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, expresada en porcentaje. Permite evaluar el rendimiento del generador y su capacidad para convertir la energía de entrada en electricidad de manera efectiva.

**Frecuencia del Generador:** Corresponde a la frecuencia de la corriente alterna generada, la cual depende de la velocidad de rotación del generador y del diseño del sistema. En redes eléctricas, suele mantenerse en valores estándar de 50 Hz o 60 Hz, dependiendo del país.

## MOTOR STIRLING

Motor Stirling físico sirvió como una representación tangible de los principios de conversión de energía, proporcionando datos experimentales que respaldan los modelos digitales.

En el caso del motor Stirling, las pruebas experimentales confirmaron su capacidad para transformar energía térmica en energía mecánica a través del ciclo Stirling, compuesto por los procesos de expansión y compresión de un gas de trabajo. Se aplicaron ecuaciones clave, como la eficiencia ideal del ciclo Stirling

## POTENCIA DE ENTRADA

### 1. Datos Disponibles y Unidades

- **Voltaje del dinamo (V):** 0.88 V
- **Corriente del dinamo (I):** 1.5 mA = 0.0015 A
- **Temperatura ambiente (sin calor):** 3 °C
- **Temperatura en el área calentada:** 15 °C
- **RPM:** 150 rpm
- **Dimensiones del tubo de vidrio (pistón):**

Diámetro interior: 14 mm → radio = 7 mm = 0.007 m

Longitud: 4 cm = 0.04 m

- **Densidad del aire en Quito:** Dada la presión de 0.71 atm y la temperatura ambiente, usando la ley de los gases ideales se obtiene aproximadamente 0.91 kg/m<sup>3</sup>
- **Capacidad calorífica a presión constante del aire (c<sub>p</sub>):** ≈ 1005 J/(kg·K)

### 2. Conversión de Temperaturas a Kelvin [37]

Utilizamos la fórmula:

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15$$

- Temperatura ambiente:

$$T_{\text{ambiente}} = 3 + 273.15 = 276.15K$$



- Temperatura en zona caliente:

$$T_{\text{caliente}} = 15 + 273.15 = 288.15\text{K}$$

La diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) es:

$$\Delta T = T_{\text{ambiente}} - T_{\text{ambiente}} = 288.15\text{K} - 276.15\text{K} = 12\text{K} \text{ [38]}$$

### 3. Cálculo del Volumen del Gas en el Pistón [39]

Usamos el volumen del cilindro interno (por el diámetro interior y la longitud):

$$V = \pi r^2 h$$

Donde:

- $r = 0.007 \text{ m}$
- $h = 0.04 \text{ m}$

$$V = \pi \times (0.007)^2 \times 0.04$$

$$V \approx \pi \times 4.9 \times 10^{-5} \times 0.04$$

$$V \approx \pi \times 1.96 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V \approx 6.16 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

### 4. Cálculo de la Masa de Aire en el Pistón [40]

Usando la densidad:

$$M_{\text{aire}} = \rho \times V = \text{Densidad} \times \text{Volumen}$$

$$\text{Con } \rho \approx 0.91 \text{ kg/m}^3 \text{ y } V \approx 6.16 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$M_{\text{aire}} \approx 0.91 \times 6.16 \times 10^{-6} \approx 5.61 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

### 5. Energía Térmica Absorbida por Ciclo [41]

La energía necesaria para calentar esa masa de aire desde la temperatura ambiente hasta la temperatura medida en el área caliente es:

$$Q_{\text{ciclo}} = M_{\text{aire}} \cdot C_{\text{capacidadCalorica}} \cdot \Delta T$$

Sustituyendo:

- $M_{\text{aire}} \approx 5.61 \times 10^{-6} \text{ kg}$
- $C_{\text{capacidad Calorica}} \approx 1005 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$
- $\Delta T = 12 \text{ K}$

$$Q_{\text{ciclo}} \approx 5.61 \times 10^{-6} \times 1005 \times 12$$

Realicemos el cálculo:

- $1005 \times 12 \approx 12060 \text{ J/kg}$
- Entonces,

$$Q_{\text{ciclo}} \approx 5.61 \times 10^{-6} \times 12060 \approx 0.0677 \text{ J}$$

Es decir, en cada ciclo se transfiere, en teoría, alrededor de 0.0677 J de energía al aire.

## 6. Frecuencia del Ciclo [42]

Los ciclos por segundo se obtienen de las RPM:

$$F = \frac{RPM}{60} = \frac{150}{60} = 2.5 \text{ ciclos/s}$$

## 7. Potencia Térmica de Entrada (Teórica) [43]

Multiplicamos la energía por ciclo por la cantidad de ciclos por segundo para obtener la potencia teórica disponible:

$$P_{\text{entrada}} = Q_{\text{ciclo}} \times f$$

$$P_{\text{entrada}} \approx 0.0677 \text{ J} \times 2.5 \text{ s}^{-1} \approx 0.16925 \text{ W}$$

Este valor de 0.16925 W representa el máximo teórico de potencia térmica que se transfiere al aire en cada segundo, según el calentamiento medido (de 3 °C a 15 °C).

## 8. Potencia de Salida Eléctrica Medida [44]

A partir del dinamo:

$$P_{\text{salida}} = V \times I = 0.88 \text{ V} \times 0.0015 \text{ A} = 0.00132 \text{ W}$$

Es decir, se obtienen aproximadamente 1.32 mW de potencia eléctrica.

## 9. Estimación de la Eficiencia Global [45]

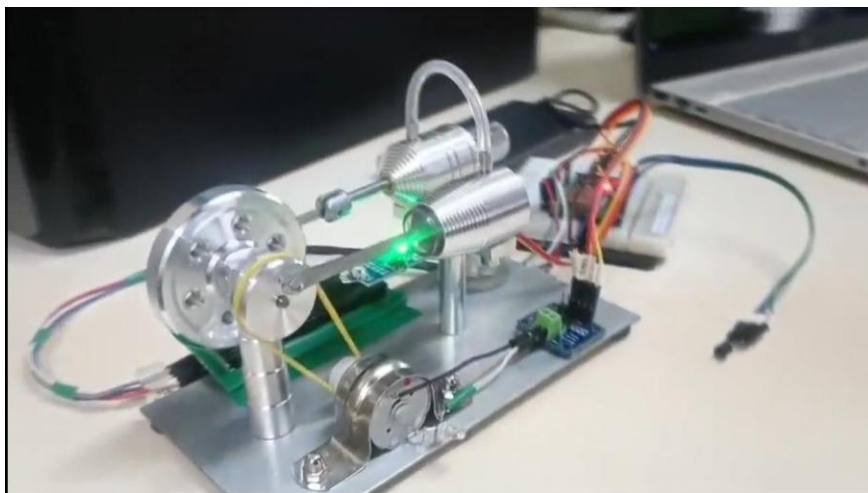
La eficiencia global ( $\eta$ ) se puede aproximar comparando la potencia de salida eléctrica con la potencia térmica teórica de entrada:

$$\eta = P_{\text{salida}} / P_{\text{entrada}} \approx 0.00132 \text{ W} / 0.16925 \text{ W} \approx 0.0078 \text{ (o } 0.78\%)$$

Este valor tan bajo indica que, en este ejemplo, solo una fracción muy pequeña de la energía térmica teórica se convierte en energía eléctrica. Esto puede deberse a múltiples pérdidas (en la transferencia de calor, fricción, ineficiencias del generador, etc.) y a que el sensor de temperatura está midiendo la temperatura externa del vidrio, la cual es mucho menor que la temperatura interna del gas.

### Resumen Final

1. **Volumen del gas en el pistón:**  $V \approx 6.16 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
2. **Masa de aire:**  $m \approx 5.61 \times 10^{-6} \text{ kg}$
3. **Diferencia de temperatura:**  $\Delta T = 12 \text{ K}$
4. **Energía por ciclo:**  $Q_{\text{ciclo}} \approx 0.0677 \text{ J}$
5. **Frecuencia del ciclo:**  $f = 2.5 \text{ ciclos/s}$
6. **Potencia térmica de entrada (teórica):**  $P_{\text{entrada}} \approx 0.17 \text{ W}$
7. **Potencia eléctrica medida:**  $P_{\text{salida}} \approx 0.00132 \text{ W}$
8. **Eficiencia global estimada:**  $\eta \approx 0.078\%$



*Figura 15. Motor Stirling*

Finalmente, la integración del motor Stirling con un generador eléctrico demostró su viabilidad para la conversión de energía mecánica en energía eléctrica. La tensión generada se midió en diferentes condiciones de carga, permitiendo evaluar la eficiencia del sistema. La comparación entre los datos obtenidos en la simulación digital y los experimentos físicos brindó una perspectiva integral sobre el proceso de generación de energía, facilitando ajustes en el diseño y optimización del motor Stirling para futuras aplicaciones.

## BASE DE DATOS MySQL

La base de datos utilizada en MySQL, llamada sensores\_2, contiene una tabla llamada medidas, donde se almacenan datos capturados por los sensores del motor Stirling. Esta tabla registra información con las siguientes columnas: un id auto incremental como clave primaria, un timestamp con la marca de tiempo de cada medición, y valores de voltaje, corriente, temperatura, presión y RPM, todos almacenados como datos de tipo float.

Esta estructura permite registrar de manera ordenada y eficiente las mediciones en tiempo real, facilitando su posterior análisis mediante herramientas como Grafana. La clave primaria y el uso de CURRENT\_TIMESTAMP en el campo de tiempo aseguran la correcta identificación y secuencia de los datos almacenados.

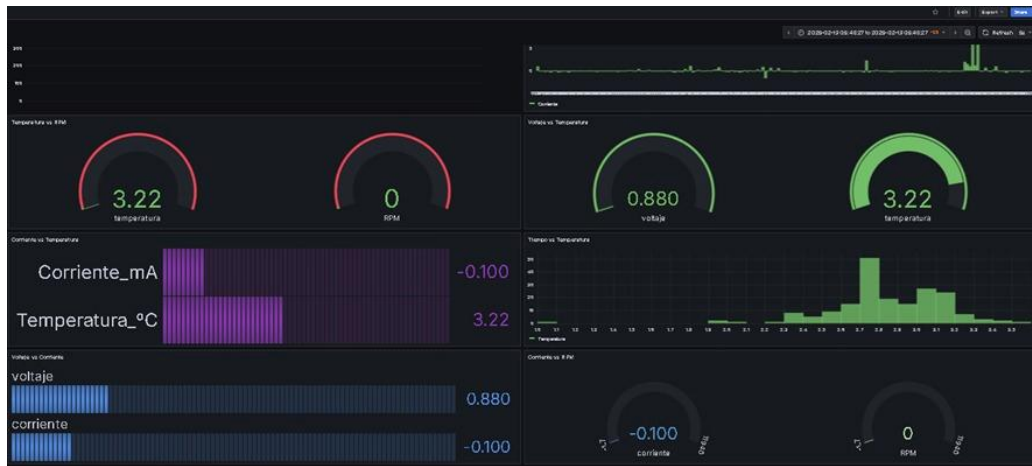
```
mysql>
mysql> USE sensores_2
Database changed
mysql> SHOW TABLES;
+-----+
| Tables_in_sensores_2 |
+-----+
| medidas              |
+-----+
1 row in set (0.00 sec)

mysql> DESCRIBE medidas;
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| Field      | Type      | Null | Key | Default      | Extra      |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| id         | int       | NO   | PRI | NULL         | auto_increment |
| timestamp  | timestamp | YES  |     | CURRENT_TIMESTAMP | DEFAULT_GENERATED |
| voltaje    | float     | YES  |     | NULL         |               |
| corriente  | float     | YES  |     | NULL         |               |
| temperatura | float    | YES  |     | NULL         |               |
| presion    | float     | YES  |     | NULL         |               |
| RPM        | float     | YES  |     | NULL         |               |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
7 rows in set (0.06 sec)

mysql> _
```

*Figura 16. MySQL interfaz por comandos*

## EXPLICACIÓN GRAFANA



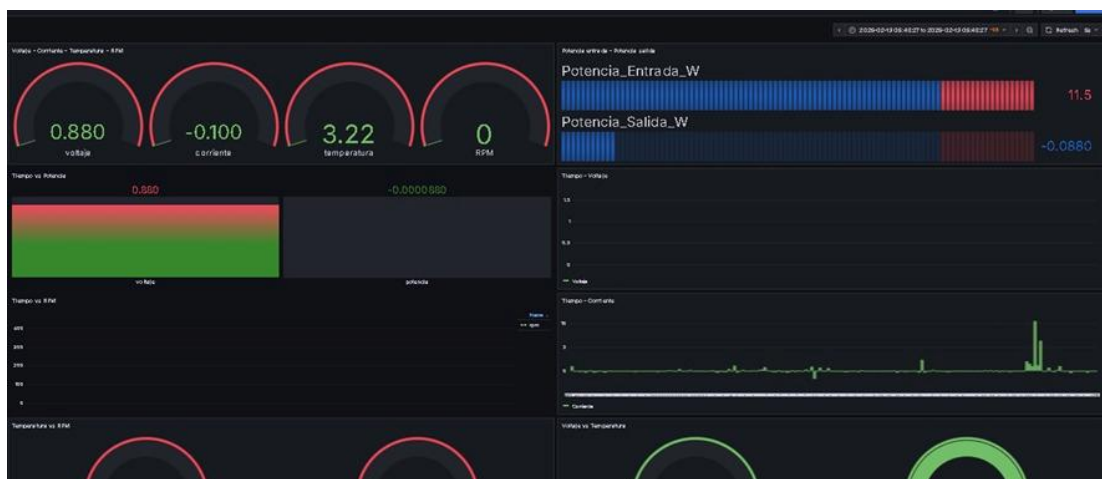
*Figura 17. Gráficas sensores Stirling*

### 1. Tiempo vs Intensidad

Esta gráfica muestra cómo varía la corriente generada por el motor Stirling. Un aumento en la intensidad indica una mayor conversión de energía mecánica en eléctrica, mientras que fluctuaciones pueden señalar pérdidas o ineficiencias en el sistema.

### 2. Tiempo vs Voltaje

Representa la evolución del voltaje generado a lo largo del tiempo. Un voltaje estable indica un sistema eficiente, mientras que variaciones pueden reflejar problemas en la combustión, transmisión o carga conectada.



*Figura 18. Gráficas sensores Stirling*

### **3. RPM (Revoluciones por Minuto)**

Las RPM reflejan la velocidad de giro del motor y su desempeño. Un aumento en la velocidad sugiere mejor aprovechamiento del calor, mientras que fluctuaciones pueden indicar pérdidas de potencia o variaciones térmicas.

### **4. Potencia de Entrada**

Mide la energía térmica suministrada al motor. Compararla con la potencia de salida permite evaluar la eficiencia del sistema y detectar posibles pérdidas en la transferencia de calor o el ciclo termodinámico.

$$\text{POTENCIA (W)} = \text{CICLOS(S}^{-1}\text{)} \times \text{Velocidad (Rpm)}$$

$$\text{O también, Potencia} = \text{Torque} \times \text{Cadencia [39]}$$

### **5. Potencia de Salida**

Indica cuánta energía mecánica se convierte en electricidad. Compararla con la potencia de entrada ayuda a calcular la eficiencia del sistema y detectar posibles fallos o ineficiencias en la conversión de energía.

$$\text{POTENCIA (W)} = \text{Voltaje(V)} \times \text{Intensidad (I) [40]}$$

## **MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DE PLANTA NUCLEAR Y MOTOR STIRLING**

Planta Nuclear: Instalación industrial dedicada a la generación de energía eléctrica mediante reacciones nucleares controladas. Estas plantas aprovechan la energía liberada en la fisión nuclear para producir vapor, que acciona turbinas conectadas a generadores eléctricos.

Motor Stirling: Motor térmico de combustión externa que opera mediante la compresión y expansión cíclica de un gas a diferentes temperaturas, convirtiendo la energía

térmica en trabajo mecánico. Es conocido por su eficiencia y capacidad de usar diversas fuentes de calor.

## **MATERIALES Y HERRAMIENTAS NECESARIOS**

### **Gemelo digital Planta Nuclear**

- Unity, Blender, C#.
- Plugins o paquetes requeridos (Unity UI).

### **Gemelo digital Motor Stirling**

- Unity, Blender, Python, C#
- Plugins o paquetes requeridos (Unity UI, MySql.Data.dll).
- MySQL Server

### **Modelo físico Modelo Stirling**

1. Volante de inercia
2. Bielas y manivelas.
3. Pistón desplazador.
4. Pistón de potencia.
5. Cilindro de trabajo.
6. Base metálica.
7. Copa de alcohol o fuente de calor (marcada en azul).
8. Botella de vidrio.
9. Tubo de vidrio.

10. Juntas tóricas y bandas elásticas.

11. Cuerda y pipeta.

12. Pequeño motor eléctrico (dinamo)

13. Tubo de plástico transparente

14. LED

### **Construcción Gemelo Digital Planta Nuclear**

- **PASO1:** Descargamos piezas de cada componente importante de la planta nuclear: Reactor, Generador de Vapor, Sala de máquinas, Turbina, Generador eléctrico, Edificio de contención, Torres de enfriamiento, Tubos de transporte, Antenas de transmisión de electricidad.
- **PASO 2:** Ensamblamos cada pieza del componente específico en Blender y por separado. Luego unimos las partes para formar una planta nuclear completa.
- **PASO 3:** Importamos la planta nuclear de Blender a Unity para iniciar con la funcionalidad del gemelo.
- **PASO 4:** Añadimos Scripts de código en C# para simular cada proceso específico de una planta nuclear en la obtención de energía eléctrica.
- **PASO 5:** Aplicamos estilos, shaders y diseños específicos a cada sección de la planta nuclear para un renderizado más realista.



## Scripts usados

### REACTOR

***Control.cs:*** Controla las barras de control de un reactor nuclear. Permite subir y bajar las barras, calcular la absorción de neutrones y gestionar su inserción y extracción.

***ControlRodManager.cs:*** Gestiona las barras de control y su eficiencia de absorción de neutrones según el material seleccionado (Carburo de Boro, Cadmio o Hafnio).

***CoolantSystem.cs:*** Simula el sistema de refrigeración de un reactor nuclear, controlando el flujo de refrigerante y la velocidad de la bomba.

***FuelRod.cs:*** Representa una barra de combustible nuclear. Gestiona parámetros como la temperatura, el flujo neutrónico y la producción de calor, además de actualizar su apariencia visual según la temperatura.

***FuelRodColorController.cs:*** Controla el color de las barras de combustible en función de su temperatura, cambiando de azul (frío) a rojo (caliente).

***GeneradorVarillas.cs:*** Genera y posiciona las barras de combustible dentro del núcleo del reactor, y actualiza su temperatura y apariencia visual.

***ReactorSensor.cs:*** Monitorea y muestra en la interfaz de usuario los sensores del reactor, como la temperatura del núcleo, la presión, el flujo neutrónico y la radiación.

***VarillaTemperature.cs:*** Controla la temperatura y el color de las varillas de combustible, ajustando su apariencia visual según la temperatura.

***WaterSimulation.cs:*** Simula el agua en el reactor, incluyendo efectos de olas y cambios de color según la temperatura. También ajusta el nivel del agua y su apariencia visual.

## **STEAM GENERATOR**

*SteamGenerator.cs*: Simula un generador de vapor, controlando el nivel de agua, la temperatura, la presión y la producción de vapor. También gestiona efectos visuales como burbujas y nubes de vapor.

*SteamGeneratorMonitor.cs*: Monitorea y muestra en la interfaz de usuario los datos del generador de vapor, como la temperatura, presión y flujo de agua.

## **TURBINAS Y GENERADOR ELÉCTRICO**

*HeliceGenerador.cs*: Controla la rotación de las hélices de un generador eléctrico.

*TubeRotation.cs*: Controla la rotación de los tubos de una turbina.

*TurbineController.cs*: Controla la simulación de una turbina, incluyendo la activación de efectos de vapor y la rotación de hélices y tubos.

*TurbineGeneratorMonitor.cs*: Monitorea y muestra en la interfaz de usuario los datos de la turbina y el generador eléctrico, como las RPM, la presión, la temperatura y la potencia.

## **TORRES DE ENFRIAMIENTO**

*FillCoolingEffect.cs*: Simula el efecto de enfriamiento en las partículas de vapor cuando entran en contacto con el agua en las torres de enfriamiento.

## Construcción Gemelo Digital Motor Stirling

- **PASO 1:** Descargamos piezas de cada componente importante del motor Stirling:  
Volante de inercia, Bielas y manivelas, Pistón desplazador, Pistón de potencia, Cilindro de trabajo, Copa de alcohol o fuente de calor (marcada en azul), Cuerda y pipeta, Pequeño motor eléctrico (dinamo), LED.
- **PASO 2:** Ensamblamos cada pieza del componente específico en Blender y por separado. Luego unimos las partes para formar un motor Stirling completo.
- **PASO 3:** Importamos el motor Stirling de Blender a Unity para iniciar con la funcionalidad del gemelo.
- **PASO 4:** Añadimos Scripts de código en C# para simular cada proceso específico del motor Stirling y la obtención de energía eléctrica para alimentar el LED.
- **PASO 5:** Aplicamos estilos, shaders y diseños específicos a cada sección del motor para un renderizado más realista.
- **PASO 6:** Se diseñó e implementó una base de datos MySQL para almacenar los datos enviados por el ESP32. Un script en Python se encargó de recibir la información mediante sockets y registrar los valores en tablas estructuradas, permitiendo así la consulta y análisis de datos en tiempo real. La base de datos se configuró con las tablas necesarias para almacenar registros de RPM, voltaje, corriente y otros parámetros relevantes del motor.
- **PASO 7:** El gemelo digital en Unity se conectó directamente con el modelo físico a través de la base de datos. El ESP32, ubicado en el prototipo físico del motor Stirling, enviaba datos de operación al script Python, que a su vez los almacenaba en la base de datos MySQL. Unity, mediante un conector MySQL, realizaba consultas periódicas para actualizar en tiempo real la simulación, logrando así una sincronización fluida entre el modelo digital y el comportamiento físico del motor.

- **PASO 8:** Para una mejor visualización y monitoreo, se integró Grafana a la base de datos MySQL. Se configuraron paneles de control en Grafana que consultaban la base de datos para generar gráficas en tiempo real sobre el rendimiento del motor. Estas visualizaciones permitieron monitorizar parámetros críticos y realizar análisis históricos de los datos, facilitando la identificación de tendencias y la toma de decisiones en el desarrollo del gemelo digital.
- **PASO 9:** Como resultado final, se habilitó el acceso remoto a las gráficas de Grafana, de modo que tanto teléfonos celulares como laptops se conectan a través de una interfaz web segura. Esto permitió a los usuarios monitorear en tiempo real el rendimiento del motor Stirling y recibir alertas o informes desde cualquier lugar, cerrando el ciclo de integración entre el modelo físico, su representación digital y la visualización de datos.

## **Scripts usados**

### **MOTOR STIRLING**

***RotarRueda.cs:*** Rota un objeto alrededor de un eje especificado a una velocidad determinada en grados por segundo.

***Dinamo.cs:*** Similar a RotarRueda.cs, pero con una rotación positiva en el eje definido.

***BielaController.cs:*** Controla el movimiento de una biela en función de la rotación de una rueda, calculando la posición de un pistón conectado.

***Biela2.cs:*** Versión similar a BielaController.cs, pero con posibles ajustes de desfase y visualización.

***LedController.cs:*** Controla el encendido de un LED en función de valores de voltaje y corriente, verificando si superan ciertos umbrales.

## **CONEXIÓN A LA BD**

***MySQLConnector.cs:*** Este script establece una conexión a una base de datos MySQL y, a intervalos regulares, consulta el último registro de la tabla "mediciones". Luego, extrae valores como RPM, voltaje y corriente para actualizar otros scripts (RotarRueda, Dinamo y LedController) en el juego.

## **CONEXIÓN DE LA BD A GRAFANA**

### ***Dashboard***

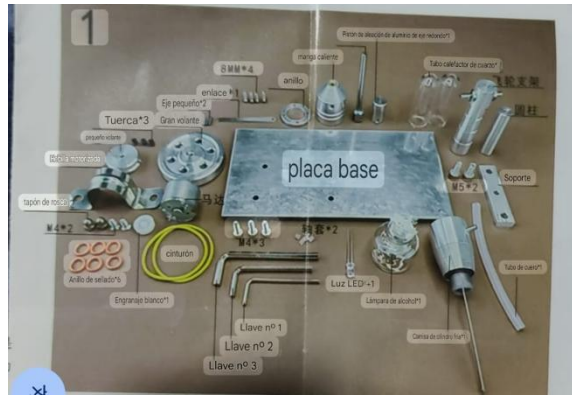
SELECT tiempo, RPM, voltaje, corriente FROM medidas

ORDER BY tiempo DESC

LIMIT 10;

### **Construcción Motor Stirling Físico**

- **PASO 1:** Adquirimos un paquete con las piezas necesarias para el armado del motor Stirling en físico.
- **PASO 2:** Ensamblamos cada pieza del componente específico siguiendo el manual de instrucciones.



**Figura 19: Componentes**

- **PASO 3:** Realizamos pruebas de funcionamiento y descubrimos que se necesita alcohol de 90 volúmenes para producir el calor necesario que hará mover el pistón del motor, correctamente.
- **PASO 4:** Añadimos sensores: INA219 (Corriente y Voltaje), LM35 (Temperatura), MH\_FLYINGFIISH (RPM).
- **PASO 5:** Añadimos Scripts de código en C++ para configurar y conectar los sensores al ESP32.
- **PASO 6:** Se crea un script de Python que reciba los datos del ESP32 y los almacena en una base de datos relacional de MySQL.

## Scripts usados

## 1. Archivo de Configuración - platformio.ini

Define la configuración del entorno de desarrollo en PlatformIO para el ESP32.

Especifica el framework de Arduino, la velocidad del monitor serial y las bibliotecas necesarias, como la de INA219 para medición de voltaje y corriente y la de la pantalla LCD I2C.

## **2. Sensor de RPM - MH\_FLYINGFIISH\_RPM.h y MH\_FLYINGFIISH\_RPM.cpp:**

Estos archivos manejan el sensor MH-Sensor Series Flying Fish para medir las RPM del motor Stirling.

MH\_FLYINGFIISH\_RPM.h: Contiene la declaración de funciones para configurar y leer datos del sensor.

MH\_FLYINGFIISH\_RPM.cpp:

- Configura el sensor en el GPIO 15.
- Usa una interrupción para contar los pulsos cuando el sensor detecta la marca en la rueda.
- Convierte los pulsos en revoluciones por minuto (RPM) y devuelve el valor.

## **3. Sensor de Temperatura - LM35\_TEMP.h y LM35\_TEMP.cpp:** Estos archivos gestionan el sensor LM35 para medir la temperatura.

LM35\_TEMP.h: Declara la función para leer la temperatura.

LM35\_TEMP.cpp:

- Usa el pin analógico GPIO 34 para leer la señal del LM35.
- Convierte el valor analógico en grados Celsius usando una conversión basada en la resolución del ADC del ESP32.
- Devuelve la temperatura en formato flotante.

## **4. Pantalla LCD - LCD\_PANTALLA.h y LCD\_PANTALLA.cpp:** Controla la pantalla LCD I2C (JHD162A) para mostrar los datos de los sensores.

LCD\_PANTALLA.h: Define las funciones para inicializar la pantalla y mostrar los datos.

LCD\_PANTALLA.cpp:

- Configura la pantalla LCD con la dirección I2C 0x27.
- Muestra los valores de voltaje, corriente, temperatura y RPM en dos líneas.

**5. Sensor de Voltaje y Corriente - INA219\_VOLT.h y INA219\_VOLT.cpp:** Maneja el sensor INA219 para medir voltaje y corriente generada por el motor Stirling.

INA219\_VOLT.h: Declara las funciones necesarias para inicializar y leer el sensor.

INA219\_VOLT.cpp:

- Configura el sensor INA219 a través de I2C.
- Obtiene el voltaje en voltios y la corriente en miliamperios.
- Retorna estos valores como una cadena separada por coma.

**6. Código Principal - MAIN.cpp:** Controla todo el funcionamiento del ESP32, incluyendo la recolección de datos, la comunicación WiFi y la transmisión de información a un cliente remoto.

Configura el ESP32 en modo Access Point con SSID ESP32\_G2 y contraseña Grupo\_02.

Inicia un servidor TCP en el puerto 5000 para enviar datos a un cliente.

En el loop:



- Lee los valores de voltaje, corriente, temperatura y RPM.
- Muestra los valores en la pantalla LCD.
- Envía los datos al cliente conectado a través de WiFi.

**7. Cliente Python - CLIENT.py:** Este script recibe los datos desde el ESP32 y los almacena en una base de datos MySQL.

- Se conecta a la base de datos MySQL en localhost.
- Se conecta al ESP32 en la IP 192.168.4.1 y el puerto 5000.
- Recibe los datos en formato CSV y los almacena en la tabla mediciones.

## LINK VIDEO MOTOR STIRLING

[https://uceedu-my.sharepoint.com/:v:/g/personal/jpmorillom1\\_uce\\_edu\\_ec/EX8SAGVSMMNMjgfaYgBmdx0Bq0M7U\\_t8dI8VoCPKtIrybg?nav=eyJyZWZlcnJhbEluZm8iOnsicmVmZXJyYWxBcHAI OiJPbmVEcmI2ZUZvckJlc2luZXNzIiwicmVmZXJyYWxBcHBQbGF0Zm9ybSI6IldlYiIsIn JlZmVycmFsTW9kZSI6InZpZXciLCJyZWZlcnJhbFZpZXciOiJNeUZpbGVzTGlua0NvcHki fX0&e=49Qdbz](https://uceedu-my.sharepoint.com/:v:/g/personal/jpmorillom1_uce_edu_ec/EX8SAGVSMMNMjgfaYgBmdx0Bq0M7U_t8dI8VoCPKtIrybg?nav=eyJyZWZlcnJhbEluZm8iOnsicmVmZXJyYWxBcHAI OiJPbmVEcmI2ZUZvckJlc2luZXNzIiwicmVmZXJyYWxBcHBQbGF0Zm9ybSI6IldlYiIsIn JlZmVycmFsTW9kZSI6InZpZXciLCJyZWZlcnJhbFZpZXciOiJNeUZpbGVzTGlua0NvcHki fX0&e=49Qdbz)

## LINK VIDEO PLANTA NUCLEAR

[https://uceedu-my.sharepoint.com/:v:/g/personal/ldpillajo\\_uce\\_edu\\_ec/EYmre2nuAVhIgyeYruIofBUBIICzOtX6gNuodi2EwhF6rA?nav=eyJyZWZlcnJhbEluZm8iOnsicmVmZXJyYWxBcHAI OiJPbm](https://uceedu-my.sharepoint.com/:v:/g/personal/ldpillajo_uce_edu_ec/EYmre2nuAVhIgyeYruIofBUBIICzOtX6gNuodi2EwhF6rA?nav=eyJyZWZlcnJhbEluZm8iOnsicmVmZXJyYWxBcHAI OiJPbm)

[VEcm12ZUZvckJ1c2luZXNzIiwicmVmZXJyYWxBcHBJbG9ja3R5bGU6ImVycmFsTW9kZSI6InZpZXciLCJyZWZlcnJhbFZpZXciOiJNeUZpbGVzTGlua0NvcHkifX0&e=hmZD9o](https://uceedu-my.sharepoint.com/:v:/g/personal/ldpillajo_uce_edu_ec/EdOHaY40zg1DhFxqPmg99l8BFvYKPdTS226U_nMD8BhmPw?nav=eyJyZWZlcnJhbEluZm8iOnsicmVmZXJyYWxBcHBJbG9ja3R5bGU6ImVycmFsTW9kZSI6InZpZXciLCJyZWZlcnJhbFZpZXciOiJNeUZpbGVzTGlua0NvcHkifX0&e=hmZD9o)

## **LINK VIDEO POSIBLE IMPLEMENTACIÓN PLANTA NUCLEAR EN ECUADOR**

[https://uceedu-my.sharepoint.com/:v:/g/personal/ldpillajo\\_uce\\_edu\\_ec/EdOHaY40zg1DhFxqPmg99l8BFvYKPdTS226U\\_nMD8BhmPw?nav=eyJyZWZlcnJhbEluZm8iOnsicmVmZXJyYWxBcHBJbG9ja3R5bGU6ImVycmFsTW9kZSI6InZpZXciLCJyZWZlcnJhbFZpZXciOiJNeUZpbGVzTGlua0NvcHkifX0&e=x6arHL](https://uceedu-my.sharepoint.com/:v:/g/personal/ldpillajo_uce_edu_ec/EdOHaY40zg1DhFxqPmg99l8BFvYKPdTS226U_nMD8BhmPw?nav=eyJyZWZlcnJhbEluZm8iOnsicmVmZXJyYWxBcHBJbG9ja3R5bGU6ImVycmFsTW9kZSI6InZpZXciLCJyZWZlcnJhbFZpZXciOiJNeUZpbGVzTGlua0NvcHkifX0&e=x6arHL)

## **LINK CONEXIONES ESP32**

[https://uceedu-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/jpmorillom1\\_uce\\_edu\\_ec/EbdQglHd4ZNNrKk5zswFfOMBZDXvXQs7\\_F20cCBZFi8rKg?e=N1ElxX](https://uceedu-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/jpmorillom1_uce_edu_ec/EbdQglHd4ZNNrKk5zswFfOMBZDXvXQs7_F20cCBZFi8rKg?e=N1ElxX)

## **CONCLUSIONES**

1. La implementación del gemelo digital de la planta nuclear en Unity permitió simular con precisión los procesos involucrados en la generación de energía nuclear. Las simulaciones replicaron las reacciones de fisión, la transferencia de calor y la conversión de energía mecánica en eléctrica, lo que facilitó la identificación de posibles mejoras en la operación y seguridad. Además, la comparación con datos teóricos validó la fidelidad del

modelo, evidenciando su utilidad como herramienta de análisis y optimización en el sector energético.

2. La construcción y prueba del motor Stirling permitió demostrar, de manera tangible, los principios de transferencia y conversión de energía térmica en mecánica. Se verificó su funcionamiento mediante mediciones experimentales, confirmando su eficiencia en diferentes condiciones de operación. Este modelo físico sirvió como un complemento práctico al gemelo digital, validando los conceptos teóricos aplicados y proporcionando una base experimental para futuras optimizaciones en generación de energía.

3. La integración de sensores en el motor Stirling y la planta nuclear digital permitió recopilar datos clave, como temperatura, presión y flujo de energía. Estos datos fueron visualizados en Grafana, facilitando su análisis en tiempo real. La representación gráfica evidenció tendencias en el comportamiento de ambos sistemas, lo que permitió detectar anomalías, optimizar el rendimiento y mejorar los protocolos de monitoreo en proyectos de energía.

4. El gemelo digital demostró ser una herramienta valiosa para simular escenarios operativos y evaluar estrategias de seguridad en plantas nucleares. La posibilidad de predecir fallos y optimizar procesos sin riesgos físicos representa una ventaja clave para la industria. Su implementación puede contribuir a mejorar la eficiencia en la generación de energía, reducir costos operativos y fortalecer los protocolos de seguridad en instalaciones críticas.

5. La combinación de simulación digital y experimentación física en este proyecto permitió adquirir un conocimiento integral sobre la generación y gestión de energía. Además, la metodología aplicada sienta las bases para desarrollar modelos similares en otros sectores industriales. La experiencia obtenida en la integración de gemelos digitales, motores térmicos

y análisis de datos puede ser aplicada en investigaciones futuras, optimización de procesos industriales y desarrollo de tecnologías energéticas más sostenibles.

## **RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda seguir mejorando el modelo digital de la planta nuclear en Unity mediante la incorporación de datos en tiempo real y la optimización de la simulación de procesos térmicos y mecánicos. Esto permitirá una representación aún más precisa del comportamiento del sistema, facilitando su aplicación en estudios de seguridad y eficiencia energética.

2. Para obtener mediciones más precisas y optimizar el rendimiento del motor Stirling, se sugiere implementar sensores adicionales para monitorear variables clave como temperatura, presión y desplazamiento de los pistones con mayor resolución. Además, el uso de materiales con mejores propiedades térmicas podría aumentar la eficiencia del motor.

3. Se recomienda integrar más fuentes de datos en Grafana para mejorar la visualización y análisis de los parámetros del gemelo digital y del motor Stirling. La implementación de algoritmos de análisis predictivo permitiría detectar tendencias y optimizar el rendimiento de los sistemas monitoreados.

4. Dado el éxito del gemelo digital en la simulación de una planta nuclear, se sugiere explorar su implementación en otros sectores energéticos, como plantas de energía renovable o sistemas híbridos de generación. Esto permitiría ampliar su impacto en la optimización de procesos industriales.

5. Para facilitar futuras mejoras y garantizar la reproducibilidad de los experimentos, se recomienda documentar detalladamente los procedimientos utilizados en la construcción

del motor Stirling y en la simulación del gemelo digital. Además, la automatización de pruebas en Unity permitiría evaluar diferentes escenarios operativos de manera más eficiente y confiable.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Innoarea Projects, "Gemelo Digital," [En línea]. Disponible: <https://innoarea.com/productos/gemelo-digital/>
- [2] Grupo Sampol, "Gemelo Digital para plantas de energía," [En línea]. Disponible: <https://empresasporelclima.es/actualidad/4752-gemelo-digital-para-plantas-de-energia>
- [3] Hitachi Energy, "Hitachi Energy lanza IdentiQ™ gemelo digital para redes eléctricas sostenibles, flexibles y seguras," [En línea]. Disponible: <https://www.hitachienergy.com/latam/es/news-and-events/press-releases/2021/11/hitachi-energy-launches-identiqtm-digital-twin-for-sustainable-flexible-and-secure-power-grids>
- [4] Innoarea Projects, "Gemelo Digital," [En línea]. Disponible: <https://innoarea.com/productos/gemelo-digital/>
- [5] Capgemini, "Capgemini adquirirá la división de Servicios Profesionales de Gemelos Digitales de Unity," [En línea]. Disponible: <https://www.capgemini.com/es-es/noticias/notas-de-prensa/capgemini-adquiere-division-servicios-profesionales-gemelos-digitales-unity/>
- [6] Repositorio Digital - EPN, "Implementación de un gemelo digital y una aplicación móvil para monitoreo remoto del sistema de simulación de procesos industriales de la CAPEIPI," [En línea]. Disponible: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25809>
- [7] Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, "¿Qué es una planta nuclear?," [En línea]. Disponible: <https://www.gob.mx/cnsns/acciones-y-programas/que-es-una-planta-nuclear>
- [8] Foro Nuclear, "El reactor nuclear," [En línea]. Disponible: <https://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/como-funciona/partes-de-una-central-nuclear/el-reactor-nuclear/>
- [9] Foro Nuclear, "Generador de vapor," [En línea]. Disponible: <https://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/como-funciona/partes-de-una-central-nuclear/generador-de-vapor/>
- [10] Foro Nuclear, "Presionador," [En línea]. Disponible: <https://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/como-funciona/partes-de-una-central-nuclear/presionador/>

- [11] Foro Nuclear, "Blindaje biológico," [En línea]. Disponible: <https://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/como-funciona/partes-de-una-central-nuclear/blindaje-biologico/>
- [12] Foro Nuclear, "Torres de refrigeración,". Disponible: <https://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/como-funciona/partes-de-una-central-nuclear/torres-de-refrigeracion/>
- [13] Foro Nuclear, "Turbina,". Disponible: <https://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/como-funciona/partes-de-una-central-nuclear/turbina>
- [14] Valiente Banderas A. "Capítulo VI Condensadores". Disponible: <https://librosdrvaliente.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/09/capc3adtulo-6-condensadores.pdf>
- [15] Production Tools. (30 de diciembre, 2024). "¿Qué es un generador eléctrico? Transformando movimiento en electricidad". Disponible: <https://productiontools.es/equipamiento-taller/que-es-un-generador-electrico/>
- [16] Galindo A. "¿Qué es la energía nuclear? La ciencia de la energía nucleoelectrica". Disponible: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-energia-nuclear-la-ciencia-de-la-energia-nucleoelectrica>
- [17] M. F. Calvopiña Villagómez y S. S. Delgado Rodríguez, "Diseño y construcción de un motor Stirling didáctico acoplado a un generador, y evaluación de la eficiencia energética del sistema," Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2016. [En línea]. Disponible: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16506>.
- [18] O. Planas, "¿Qué es y cómo funciona un motor Stirling? Ciclo y usos," Solar Energía, 17 de marzo de 2016. [En línea]. Disponible: <https://solar-energia.net/blog/motor-stirling>.
- [19] "Ciclo de Stirling," EcuRed. [En línea]. Disponible: [https://www.ecured.cu/Ciclo\\_de\\_Stirling](https://www.ecured.cu/Ciclo_de_Stirling).
- [20] Grafana Labs. (s. f.). Grafana: The open and composable observability platform | Grafana Labs. Recuperado de: <https://grafana.com/>
- [21] Energy Encyclopedia. "REACTOR". <https://3d.energyencyclopedia.com/npp-pwr/reactor>
- [22] Energy Encyclopedia. "STEAM GENERATOR". <https://3d.energyencyclopedia.com/npp-pwr/steam-generator>
- [23] Energy Encyclopedia. "NUCLEAR POWER PLANT". <https://3d.energyencyclopedia.com/npp-pwr>
- [24] Energy Encyclopedia. "COOLING TOWER". <https://3d.energyencyclopedia.com/npp-pwr/cooling-tower>
- [25] Energy Encyclopedia. "TURBINE HALL". <https://3d.energyencyclopedia.com/npp-pwr/turbine-hall>

- [26] Energy Encyclopedia. "STEAM TURBINE". <https://3d.energyencyclopedia.com/npp-pwr/turbine>
- [27] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Diseño y fabricación de un generador eólico de baja capacidad para sectores sin cableado eléctrico. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/7628>
- [28] Paul Flowers (Universidad de Carolina del Norte, Pembroke), Klaus Theopold (Universidad de Delaware) y Richard Langley (Universidad Estatal Stephen F. Austin). "Nuclear Fission". [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General\\_Chemistry/Map%3A\\_Chemistry\\_-\\_The\\_Central\\_Science\\_\(Brown\\_et\\_al.\)/21%3A\\_Nuclear\\_Chemistry/21.06%3A\\_Nuclear\\_Fission](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Map%3A_Chemistry_-_The_Central_Science_(Brown_et_al.)/21%3A_Nuclear_Chemistry/21.06%3A_Nuclear_Fission)
- [29] Pérez Quisphe E. "DESARROLLO DE UN MÉTODO COMPUTACIONAL DE DINÁMICA DE FLUIDOS PARA CARACTERIZACIÓN DE UNA SECCIÓN DEL NÚCLEO DE UN REACTOR NUCLEAR DE AGUA PRESURIZADA". <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7400/1/CD-5557.pdf>
- [30] Delgado F, Fernández C, Ibarra m. "Ampliación de Ingeniería Nuclear y Ciclo de Combustible" [PDF]. <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1804/course/section/1380/BLOQUE-I.pdf>
- [31] Lamas I. (2021). "PROBLEMAS RESUELTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR". [PDF]. [https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/29903/Lamas\\_MI\\_2022\\_Problemas\\_resueltos\\_transmision\\_de\\_calor.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/29903/Lamas_MI_2022_Problemas_resueltos_transmision_de_calor.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- [32] MAVAINSA. "TURBINAS DE VAPOR". [PDF]. [https://www.mavainsa.com/pdfs/8\\_turbinas\\_de\\_vapor.pdf](https://www.mavainsa.com/pdfs/8_turbinas_de_vapor.pdf)
- [33] LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS. "APUNTES TEÓRICOS EXPERIENCIA: INTERCAMBIADORES DE CALOR". [PDF]. <https://www.eiq.cl/lou/assets/files/04-INTERCAMBIADORES.pdf>
- [34] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (febrero 2007). "Guía técnica Torres de refrigeración". [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10540\\_Torres\\_refrigeracion\\_GT4\\_07\\_05eca613.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Torres_refrigeracion_GT4_07_05eca613.pdf)
- [35] Física Universitaria. "Volumen 2, 13.6 Generadores eléctricos y fuerza contraelectromotriz". <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-2/pages/13-6-generadores-electricos-y-fuerza-contraelectromotriz>
- [36] UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN. "CENTRALES ELÉCTRICAS ED VAPOR CICLO DE RANKINE". [PDF]. [https://catedras.facet.unt.edu.ar/centraleselectricas/wp-content/uploads/sites/19/2014/10/TP-3-Ciclo-de-Rankine\\_2015.pdf](https://catedras.facet.unt.edu.ar/centraleselectricas/wp-content/uploads/sites/19/2014/10/TP-3-Ciclo-de-Rankine_2015.pdf)

[37] Loza Yáñez J. (31 de agosto de 2015). "Introducción al estudio de la fisicoquímica:

Unidades de medición: Temperatura". [PDF].

<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/34008/secme-16077.pdf?sequence=1>

[38] University of North Georgia. (s.f.). Chapter 5: Thermochemistry. En Principles of Chemistry. University of North Georgia Press DELTA T.

<https://web.ung.edu/media/chemistry/Chapter5/Chapter5-Thermochemistry.pdf>

[39] Matemática en Línea. (2018). Cilindros, conos, esferas y pirámides.

<https://matematicaenlinea.com/recursos/wp-content/uploads/2018/11/2.7-Cilindros-conos-esferas-y-piramides.pdf>

[40] Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). Physics for scientists and engineers with modern physics (7th ed.). Cengage Learning.

<http://www2.fisica.unlp.edu.ar/materias/fisgenI/T/Libros/Serway-7Ed.pdf>

[41] University of North Georgia. (s.f.). Chapter 5: Thermochemistry. En Principles of Chemistry. University of North Georgia Press QCICLO.

<https://web.ung.edu/media/chemistry/Chapter5/Chapter5-Thermochemistry.pdf>

[42] Jiménez Carballo Carlos A. "MOVIMIENTO ARMÓNICO

SIMPLE (MAS)".

<https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10191/MAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[43] Original Teachy. Calorimetría: Potencia Térmica.

<https://www.teachy.app/es/resumenes/educacion-media/media-superior-2-grado/fisica-a-espanol/explorando-la-potencia-termica-de-la-teoria-a-la-practica-d4ba8>

[44] Medrano Gauna E. (2019). "2.10 Potencia eléctrica ". [PDF].

[https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P\\_Presentaciones/b\\_sahagun/2019/emmg-electricidad-2.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/b_sahagun/2019/emmg-electricidad-2.pdf)

[45] García Parcel. (01 de junio 2021). "4. CONCEPTOS SOBRE EFICIENCIA EN UN MOTOR ELÉCTRICO". [PDF].

[https://amperxgroup.com/wp-content/uploads/2024/07/ART2-Eficiencia-Energetica-1.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://amperxgroup.com/wp-content/uploads/2024/07/ART2-Eficiencia-Energetica-1.pdf?utm_source=chatgpt.com)

[46] FIT4LIFEACADEMY. (19 de septiembre 2019). "Frecuencia Cardíaca y Potencia en Ciclo Indoor... : diferencias, similitudes y compatibilidad"

[https://fit4lifeacademy.es/blog/frecuencia-cardiaca-potencia-ciclo-indoor/#:~:text=POTENCIA%20\(W\)%20%3D%20Fuerza%20\(J\)%20x%20Velocidad%20\(Rpm\)&text=Aumentando%20la%20resistencia%20de%20la,aumentado%20la%20velocidad%20de%20pedaleo.](https://fit4lifeacademy.es/blog/frecuencia-cardiaca-potencia-ciclo-indoor/#:~:text=POTENCIA%20(W)%20%3D%20Fuerza%20(J)%20x%20Velocidad%20(Rpm)&text=Aumentando%20la%20resistencia%20de%20la,aumentado%20la%20velocidad%20de%20pedaleo.)

[47] UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA. "Ley de Ohm – Potencia y Energía Eléctrica".

<https://unlp.edu.ar/wp-content/uploads/31/33731/c303158542c0a3b2668c10c564d1ded7.pdf>