

Prototipo de Ciclo Rankine Didáctico para Prácticas de Laboratorio

R. Adame-Delgado¹, R.A. Favela-Herrera¹, A. Reynoso-Segovia¹

Resumen— El presente artículo tiene como propósito el diseño y fabricación de un dispositivo con fines académicos que muestre cómo se aplica y cómo funciona el ciclo Rankine en la generación de energía eléctrica para que los estudiantes del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo practiquen con él. Algunas de las prácticas que por lo general no se pueden realizar con instalaciones reales es el estudio del Ciclo Rankine, dado su alto costo y complejidad de instalación.

De tal manera con el prototipo del ciclo Rankine didáctico el estudiante tendrá más oportunidades de practicar y aprender de forma sencilla, adquiriendo más experiencia antes de egresar, así las industrias estarán más seguras al realizar sus contrataciones porque los nuevos ingenieros estarán más capacitados.

Palabras claves— Banco didáctico, generación de energía, generación de vapor, termodinámica, Ciclo Rankine.

Abstract— This paper aims to show the design and manufacture of an academic prototype for a Rankine cycle. The purpose is to show how it is applied and how works the Rankine cycle in generating electricity. This prototype will permit to the students of the Higher Institute of Technology Lerdo practice with him and do some of the practices that usually cannot be performed with actual installations is the study of Rankine cycle, given its high cost and complexity of installation.

So with this prototype the student will have more opportunities to practice and learn easily, gain experience before graduation and industries will be safer to make their hiring because new engineers will be most qualified.

Keywords— Didactic equipment, energy generation, steam generation, thermodynamic, Rankine Cycle.

I. INTRODUCCIÓN

El prototipo de ciclo Rankine didáctico fue diseñado conforme a la nueva reforma educativa, debido a que la mayoría de las instituciones tecnológicas y privadas de

nivel medio y superior están enfocadas a la modernización y a la implantación de nuevas tecnologías en su forma de enseñar. Pero esto plantea un problema, dada la dificultad en muchos centros educativos, tanto de enseñanza superior como de enseñanza media, de disponer de ciertos aparatos para la realización de prácticas de laboratorio, se ha propuesto una solución [1] que consiste en un módulo de enseñanza que no es muy costoso y sin la necesidad de comprarlo fuera del país. Dicha solución se enfoca para algunas asignaturas en específico, como lo son: Termodinámica, Máquinas y equipos térmicos I y II, etc.

Este problema afecta a la institución debido a que su prestigio está involucrado al no estar al día con su tecnología y enseñanza, al ir perdiendo credibilidad en la sociedad estudiantil, y bajando su nivel ante las instituciones competidoras. Asimismo afecta tanto a los docentes y estudiantes condicionalmente al no tener los recursos para una enseñanza, se ven forzados a seguir la vieja forma educativa y quedar sin la experiencia que puede ofrecer un módulo o banco educativo.

Las prácticas de laboratorio ocupan un lugar cada vez más importante en el proceso de enseñanza de las asignaturas, motivado primeramente por el carácter activo que le confieren al proceso de aprendizaje y porque contribuyen al proceso de aprendizaje, a hacerlo más consolidado y duradero. Secundariamente, son, de las formas de enseñanza, las que más se acercan al estudiante de forma natural al trabajo científico-investigativo, así que contribuyen al desarrollo de habilidades para el trabajo científico y a que, cada vez más, predomine la lógica del mismo en su actividad profesional. Finalmente, la realización de las prácticas de laboratorio desarrolla las habilidades experimentales exclusivas de esta forma de enseñanza, las cuales no pueden lograrse por ninguna de las anteriores [2].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El banco didáctico puede ser utilizado en cualquier laboratorio de ingeniería electromecánica en las principales áreas de termodinámica, control y mediciones e instrumentación. A través de la generación de energía

¹ R. Adame-Delgado (radame@itslerdo.edu.mx), R.A. Favela-Herrera (rfavela@itslerdo.edu.mx), A.Reynoso-Segovia (areynoso@itslerdo.edu.mx). Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Av. Tecnológico N 1555 Sur Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, Cd. Lerdo, Dgo. C.P. 35150

eléctrica por medio de vapor y controlada por código G (LabVIEW) y una tarjeta adquisitora de datos (Arduino). Como primera actividad se realizó la búsqueda de los materiales necesarios para el desarrollo del nuevo prototipo [3]. A continuación se muestra en la tabla I el material y equipo utilizado:

TABLA I
MATERIAL REQUERIDO PARA EL PROTOTIPO

Material	Características	
	Descripción	Cantidad
Caldera	Contenedor de agua y tubería interna	1
Llave de paso	Tipo esfera ½"	1
Reducción	½" a ¼" macho-hembra y hembra-macho	2
Reducción	3/8" a ¼" macho-hembra	1
Niple	T de ¼"	1
Niple	¼"	4
Manguera hidráulica	¼"	1
Niple	¼" para manguera	1
Válvula	Seguridad 140 psi	1
Manómetro	300 psi	1
Quemador	Tipo soplete industrial	1
Placa	Acrílico	2
Tubo PVC	12" diámetro	1
Turbina de aire lavado	10" diámetro	1
Barra de acero	½" diámetro	1
Balero	½" diámetro	2
O-ring	½" diámetro	2
Tornillos	Esparragos de ½"	4
Motor	Corriente directa 12 V	1
Electroválvulas	½" 12 VCD	2
Termopar	Tipo J	1
Bujía	De carro	1
Cable	De bujía	1
Bobina	De ignición para carro	1
Manguera	1" Licuatite	1
Manguera y conexiones	Para tanque de gas	1
Clemas	¼"	20
Arduino	Mega	1
Cable	USB	1
Relevadores	12 V	4
Transistores	2N2222	4
Resistencias	220 ohms, 330 ohms y 10 kohms	3
Protoboard	Tablilla de pruebas	1
Baquelita perforada	7 X 5 cm	1
Diodos	1N4001	4
Compuertas	Abiertas	2
Sensor de temperatura	LM355	1
Cable	Calibre 14	1
Alambre	Calibre 22	1
Computadora	Procesador de 64 bits	1

La construcción del nuevo prototipo consistió en cuatro etapas principales que a continuación se mencionan:

A. Etapa 1: Sistema de Generación de Vapor

En esta parte del desarrollo de la construcción del prototipo, la primera actividad a realizar fue el pintado del depósito de aire comprimido, que es el encargado de contener el vapor generado dentro del mismo haciendo función como caldera, así mismo se le añadió la instrumentación necesaria para su buen funcionamiento de esta parte del prototipo [4].

A continuación se muestra la instrumentación añadida al prototipo:

- **Manómetro:** Es un instrumento utilizado para la medir la presión del vapor generado dentro de la caldera.
- **Válvula de seguridad:** Esta sirve para aliviar la presión cuando el vapor supera el límite establecido en la programación para así mismo evitar accidentes.
- **Electroválvula:** Se encarga de controlar el paso del vapor generado dentro de la caldera, es accionado a través de un pulso por el programa a su bobina.
- **Termopar tipo J:** Es un sensor utilizado para medir la temperatura dentro de la caldera.
- Diferentes tipos de reducción y conexiones utilizados en la caldera.
- **Mangueras:** Son las encargadas de dirigir el vapor generado en la caldera hacia la turbina.
- **Quemador:** Es el que genera la flama para calentar la caldera.

B. Etapa 2: Sistema de Generación de Energía

Esta segunda etapa es el proceso de construcción del prototipo que consistió en armar la turbina que es la encargada de generar el movimiento que es transmitido al generador.

A continuación se menciona el material utilizado para la construcción de la turbina:

- **Turbina:** Es la encargada de convertir la presión que genera el vapor en movimiento para que se transmita al generador.
- **Generador:** Se usa un motor de corriente directa de 12 V que al aplicarle movimiento en su flecha genera energía eléctrica.
- **Esparrago:** Es el material utilizado para la fijación de la caldera.
- **Flecha:** Es la encargada de sostener a la turbina y ayuda a transmitir el movimiento al generador.

- *Balero*: Sirve como apoyo para facilitar el movimiento de la flecha donde va sentada la turbina.

C. Etapa 3: Sistema de Control

La tercera etapa del prototipo consiste en la construcción del control y es una de las más importantes, debido a que de ella depende la comunicación del programa con los elementos externos a controlar. A continuación se describen los materiales y los elementos tanto eléctricos como electrónicos que se emplearon para la construcción de la caldera.

- *Arduino Mega*: Tarjeta adquisitora de datos para recibir lecturas de los sensores y mandar pulsos a los relevadores realizar una acción.
- *Sensor de temperatura LM355*: Sirve para medir la temperatura dentro de la turbina.
- *Transistor 2N2222*: Cuya función es amplificar una señal mandada por el Arduino.
- *Relevador*: Este dispositivo fue utilizado como etapa de potencia.
- *Resistencia*: Sirve como un reductor de corriente para las entradas del Arduino y de esta manera protegerlo, así mismo se implementaron mediante un circuito para de esta forma poder medir voltaje.
- *Clemas*: Utilizadas para unir cables y dar una mejor estética en el banco didáctico.
- *Cable y alambre*: Para la conducción de señales.
- *Diodos*: Para protección de componentes.

D. Etapa 4: Programación

La programación fue la etapa más importante de todo el prototipo debido a que de ella depende el control de toda la caldera; así mismo la lógica y automatización de la caldera.

Para la programación de la caldera utilizamos el programa LabVIEW; este tipo de programación es a bloques [5].

E. Resultados

Con la creación del prototipo del ciclo Rankine el docente tendrá una herramienta más en el proceso de enseñanza-aprendizaje para que el estudiante realice las comparaciones pertinentes de la parte teórica con la parte práctica. Y juntamente obtener un aprendizaje significativo, en dichas comparaciones la memoria de cálculos realizada en el aula se coteja con los resultados obtenidos en la práctica con el prototipo, el cual está

constituido por partes mecánica, eléctrica y electrónica; lo cual nos lleva a tener un sistema integral, automatizado al 100%, utilizando las herramientas y equipos proporcionados por el instituto.

De tal manera que con la fabricación de esta herramienta didáctica podemos contribuir en el aseguramiento del cumplimiento del plan de estudios de asignaturas tales como: Termodinámica, Máquinas y Equipos Térmicos I y II, Controles Eléctricos, Aplicaciones Industriales, Máquinas Eléctricas, Sensores, procesadores y reguladores de control, Electrónica Analógica, Electrónica Digital y Diseño Asistido por Computadora.

A continuación se visualiza el panel frontal del programa diseñado en LabVIEW para controlar el sistema (Figura 1).

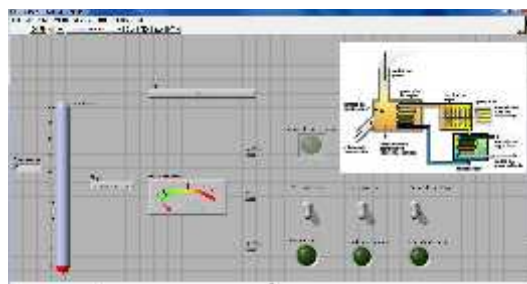


Figura 1. Panel frontal del programa

III. CONCLUSIÓN

Todo instituto educativo de nivel medio y superior está en la necesidad de modernizar su forma de educación al igual muchas empresa necesitan una mejor forma de enseñar y en donde practicar para sus trabajadores.

Nosotros ofrecemos las herramientas para que las instituciones se modernicen y que las empresas estén más seguras de que sus trabajadores tienen la experiencia al menos didáctica de su trabajo.

El banco didáctico que se ha implementado en el instituto ha incrementado la participación de los estudiantes en las asignaturas implicadas en el tema en cuestión, dando una mejor enseñanza y claridad a la aplicación del ciclo en la práctica.

IV. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo el apoyo para llevar a cabo esta investigación y desarrollar este proyecto en conjunto con los estudiantes de la Ingeniería en Electromecánica.

V. APÉNDICES

El Ciclo Rankine es un ciclo de potencia representativo del proceso termodinámico, que tiene lugar en una central térmica de vapor. Maneja un fluido de trabajo que alternativamente evapora y condensa, típicamente agua, aunque también existen otras sustancias que pueden ser utilizadas.

Un Ciclo Rankine ideal está formado por cuatro procesos: dos isotrópicos y dos isobáricos. Los estados principales del ciclo quedan definidos por los números del 1 al 4, 1) vapor sobrecalentado; 2) mezcla bifásica de título elevado o vapor húmedo; 3) líquido saturado; y 4) líquido su enfriado.

VARIABLES:

$q_{entrada}$,	Potencia térmica de entrada y potencia térmica de salida (energía por unidad de tiempo)
q_{salida} ,	
\dot{m}	Caudal másico (masa por unidad de tiempo)
W	Potencia mecánica suministrada o absorbida (energía por unidad de tiempo)
y	Rendimiento térmico del ciclo (relación entre la potencia generada por el ciclo y la potencia térmica suministrada en la caldera, adimensional)
$h_1, h_2,$	Entalpías específicas de los estados principales del ciclo
h_3, h_4	
s_1, s_2, s_3, s_4	Entropías específicas de los estados principales del ciclo
x	Calidad de la mezcla

Ecuaciones:

Las ecuaciones (1) a (3) se obtienen del balance de energía y del balance de masa para un volumen de control. La ecuación (4) describe la eficiencia termodinámica o rendimiento térmico del ciclo.

$$q_{entrada} = h_3 - h_2 \quad (1)$$

$$q_{salida} = h_4 - h_1 \quad (2)$$

$$\frac{W_{bomba}}{\dot{m}} = h_4 - h_3 \quad (3)$$

$$y_{térmica} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} \quad (4)$$

Para resolver los problemas se supone un ciclo ideal, en el que las irreversibilidades no ejercen cambios significativos en el sistema. Existen condiciones estables y se desprecian los cambios en energía cinética y potencial.

Para ahorrar tiempo, se recomienda buscar en las tablas del agua las entalpías en cada estado, así como otros datos de importancia, como: entropías, volumen específico, u otros que se requieran para el cálculo.

Ejemplos de aprendizaje teórico-práctico:

1. Una central termoeléctrica cuenta con un sistema de bombeo de agua a 10 kPa hacia la caldera, la cual incrementa la temperatura y presión del fluido de 8 MPa y 650 °C. Determine la eficiencia de la central.

Datos conocidos:

Estado 1	Estado 2
$P_1 = 10 \text{ kPa}$	$s_1 = s_2$
$V_1 = 0.001010 \text{ m}^3/\text{kg}$	$P_2 = 8 \text{ MPa}$
$h_1 = h_f = 191.81 \text{ kJ/kg}$	
$s_1 = 0.6492 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$	
Estado 3	Estado 4
$P_3 = 8 \text{ MPa}$	$P_4 = 10 \text{ kPa}$
$T_3 = 650 \text{ }^\circ\text{C}$	$s_3 = s_4$
$h_3 = 3762.3 \text{ kJ/kg}$	$s_f = 0.6492 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
$s_3 = 7.15215 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$	(Tabla de saturación)

Procedimiento:

$$W_{bomba} = V_1(P_2 - P_1)$$

$$W_{bomba} = 0.001010 \text{ m}^3/\text{kg}((8000 - 10)\text{kPa})$$

$$W_{bomba} = 8.0699 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h_1 + W_{bomba} = 191.81 + 8.0699$$

$$h_2 = 199.8799 \text{ kJ/kg}$$

$$x_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} = \frac{7.15215 - 0.6492}{7.4996} = 0.8671$$

$$h_4 = h_f + x_4 h_{fg} = 191.81 + (0.8671 * 2392.1)$$

$$h_4 = 2265.9999 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{entrada} = h_3 - h_2$$

$$q_{entrada} = 3762.3 - 199.8799 = 3562.4201 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{salida} = h_4 - h_1$$

$$q_{salida} = 2265.9999 - 191.81 = 2074.1899 \text{ kJ/kg}$$

$$y_{\text{térmica}} = 1 - \frac{q_{\text{salida}}}{q_{\text{entrada}}}$$

$$y_{\text{térmica}} = 1 - \frac{2074.1899}{3562.4201} = 0.4177 = 41.77\%$$

2. Una central eléctrica de vapor opera con un ciclo Rankine y succiona el agua de un depósito a 9 kPa y lo manda a una caldera la cual incrementa la temperatura del agua de 35 °C a 625 °C, y 15 MPa a la salida de la turbina de 10 KPa.

- a) Calcular la eficiencia térmica del ciclo.
- b) La salida de potencia neta de la central que pasa por un flujo másico a 15 kg/s.

Datos conocidos:

Estado 1	Estado 2
$P_1 = 9 \text{ kPa}$	$s_1 = s_2$
$V_1 = 0.001006 \text{ m}^3/\text{kg}$	$P_2 = 15 \text{ MPa}$
$h_1 = 146.64 \text{ kJ/kg}$	
$s_1 = 0.5051 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$	
$T_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	
Estado 3	Estado 4
$P_3 = 15 \text{ MPa}$	$P_4 = 10 \text{ kPa}$
$T_3 = 625 \text{ }^\circ\text{C}$	$s_3 = s_4$
$h_3 = 3647.6 \text{ kJ/kg}$	$h_4 = 2138.78 \text{ kJ/kg}$
$s_3 = 6.7514 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$	

Procedimiento:

$$W_{\text{bomb}} = V_1(P_2 - P_1)$$

$$W_{\text{bomb}} = 0.001006 \text{ m}^3/\text{kg}((15000 - 9)\text{kPa})$$

$$W_{\text{bomb}} = 15.079 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{\text{bomb}} = h_2 - h_1$$

$$h_2 = W_{\text{bomb}} + h_1$$

$$h_2 = 15.079 + 146.64 = 161.719 \text{ kJ/kg}$$

$$x_4 = \frac{s_4 - s_1}{s_g} = \frac{6.7514 - 0.5051}{7.4996} = 0.8328$$

$$a) y_{\text{térmica}} = 1 - \frac{q_{\text{salida}}}{q_{\text{entrada}}}$$

$$y_{\text{térmica}} = 1 - \frac{1992.14}{3485.89} = 0.4372 = 43.72\%$$

$$b) \dot{m} = \frac{\dot{W}_{\text{neto salida}}}{\dot{W}} \quad \dot{W} = \text{salida} - \text{entrada}$$

$$W_{\text{neto salida}} = \dot{m} \dot{W} = 15 \text{ kg/s}(1493.74 \text{ kJ/kg})$$

$$W_{\text{neto salida}} = 122.40 \text{ Watts}$$

VI. REFERENCIAS

- [1] Castelló, M. C. J., & de Adana Santiago, M. M. R. (1998). *Programa didáctico sobre el Ciclo de Rankine sencillo RANKINE VI.0*. IE Comunicaciones: Revista Iberoamericana de Informática Educativa, (10), 6.
- [2] Hernández, A., Hernández, A., & Tsering, S. *Sistema de prácticas de laboratorio para la asignatura física III de ingeniería mecánica; evaluación de su impacto en la calidad y formación del profesional*. Temas, 1(50/100), 2.
- [3] León, O. G., & García-Celay, I. M. (2006). *Métodos de investigación en Psicología y Educación*.
- [4] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2003). *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.
- [5] Vizcaíno, J. R. L., & Sebastián, J. P. (2011). *LabView: entorno gráfico de programación*. Marcombo.

VII. BIOGRAFÍA



Ing. Raymundo Adame Delgado, nacido en Durango Dgo. el día 04 de Enero de 1973. Se graduó de la Ingeniería Industrial Mecánica, con especialidad en Térmica, en el Instituto Tecnológico de Durango. Estudio la Maestría en Educación en la Universidad Interamericana para el Desarrollo, en Gómez Palacio, Dgo. Él actualmente labora en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo en la carrera de Electromecánica, y en la Universidad Politécnica de Gómez Palacio en la especialidad de Ingeniería en Tecnologías de Manufactura. Ha participado en el desarrollo de los prototipos "Convertidor de energías", "Ciclo Rankine", "Protector Solar para Auto" y "Bobinadora de mínimo Error". Líneas de Investigación de interés: Automatización y Procesos de Manufactura.



Raquel Araceli Favela Herrera: nacida en Durango, Durango el 09 de enero de 1980. Se graduó del Instituto Tecnológico de Durango de la carrera de Licenciatura en Administración. Estudió la Maestría en Administración en la Universidad Autónoma de la Laguna, en Torreón, Coahuila, titulándose en 2009. Ella es docente de la División de Ingeniería Electromecánica en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo y ha

laborado en la industria para diversas empresas de la Comarca Lagunera. Sus áreas de interés son: Gestión de proyectos, Gestión de la innovación, incubación de empresas y emprendimiento.

La M.A. Favela ha sido consultora en la incubación de diversas empresas.



M.C. Adriana Reynoso Segovia. Nació en 1986 en Torreón, Coahuila, México. En 2007 obtuvo el grado de Ingeniero Electromecánico en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Durango. Y el grado de Maestra en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de la Laguna en 2011.

Ella es docente de la División de Ingeniería Electromecánica en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Sus áreas de interés son: Redes de tierras, Descargas Atmosféricas, Control de Ruidos y Energías renovables.