



CIENCIAS DE LA INGENIERIA - F I U A C A M

INGENIERÍA
CIVIL

INGENIERÍA
COSTERA

INGENIERÍA
AMBIENTAL

INGENIERÍA
EN ENERGÍA

INGENIERÍA
MECATRÓNICA

INGENIERÍA
EN SISTEMAS

INGENIERÍA
EN MATERIALES

Vol. 1 Núm 2
Julio - Diciembre 2025

Ciencias de la Ingeniería - FIUACAM es una publicación digital científica de la Facultad de Ingeniería, UACAM, Año 1, No. 2, Julio - Diciembre 2025. Es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Campeche, Campus V, Predio S/N por Avenida Ing. Humberto Lanz Cardénas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, C.P. 24085, San Francisco de Campeche, Campeche, México, Tel. (981) 19800 ex. 3030100, <https://cienciasdelaingenieria.uacam.mx/index.php/cdi/index>, roacanul@uacam.mx. Editor Responsable: Dr. Román Alejandro Canul Turriza. Reserva de Derechos al uso Exclusivo: en trámite ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Facultad de Ingeniería UACAM, Dr. Román Alejandro Canul Turriza, Campus V, Predio s/n por Avenida Ing. Humberto Lanz Cardénas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, C.P. 24085, Ciudad de San Francisco de Campeche, México, fecha de la última modificación Febrero 2026.

REVISTA CIENCIAS DE LA INGENIERÍA - FIUACAM

Revista de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México

Consejo Editorial de la Universidad Autónoma de Campeche

Dra. Fanny Guillermo Maldonado

Rectora - Universidad Autónoma de Campeche, México

Mtro. Fernando Medina Blum

Secretario General - Universidad Autónoma de Campeche, México

Dra. Gladys Remigia Acuña González

Directora General de Posgrado de Investigación - Universidad Autónoma de Campeche, México

Mtro. Óscar Adrián Sosa Oreza

Coordinador General Académica - Universidad Autónoma de Campeche, México

Lic. Enna Verónica Lara Gamboa

Coordinadora General de Vinculación y Extensión Académica - Universidad Autónoma de Campeche, México

MAC. Francisco Javier Barrera Lao

Director Académico de la Facultad de Ingeniería - Universidad Autónoma de Campeche



UACAM
Universidad Autónoma de Campeche

DIRECCIÓN:

Av. Agustín Melgar S/N entre Calle 20 y Juan de la Barrera. Col. Buenavista. CP 24039

Los criterios expuestos en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no reflejan necesariamente la opinión de la dirección de la revista.

Ciencias de la Ingeniería - FIUACAM es una publicación digital científica de la Facultad de Ingeniería, UACAM. Es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Campeche, Campus V, Predio s/n por Avenida Ing. Humberto Lanz Cardénas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, C.P. 24075, San Francisco de Campeche, Campeche, México, Tel. (981) 81 19800 ext. 3030100, <https://cienciasdelaingenieria.uacam.mx/index.php/cdi/index>, roacanul@uacam.mx. Editor responsable: Dr. Román Alejandro Canul Turriza. Reserva de Derechos al uso Exclusivo: en trámite, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Facultad de Ingeniería UACAM, Dr. Román Alejandro Canul Turriza, Campus V, Predio s/n por Avenida Ing. Humberto Lanz Cardénas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, C.P. 24085, Ciudad de San Francisco de Campeche, México fecha de la última modificación Junio 2025

Ciencias de la Ingeniería / Vol 1 / N° 1 / 2025 / ISSN EN TRAMITE





REVISTA CIENCIAS DE LA INGENIERÍA - FIUACAM

Revista de la Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México

EDITOR RESPONSABLE:

DR. Román Alejandro Canul Turriza / Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Campeche, México
roacanul@uacam.mx

DR. Oscar de Jesús May Tzuc / Facultad de Ingeniería, Universidad
Autónoma de Campeche, México
oscajmay@uacam.mx

DR. Mario Antonio Jiménez Torres / Centro de Investigaciones
Jurídicas, Universidad Autónoma de Campeche, México
majimene@uacam.mx

APOYO EDITORIAL - INFORMATICA

Dr. Joel C. Flores Escalante / Universidad Autónoma de Campeche,
México

CONSEJO EDITORIAL CIENTIFICO:

DR. YOUNESS ABDELLAOUI / Centro de Investigación y de Estudios
Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México
<https://orcid.org/0000-0003-3865-3691>

DR. PEDRO ALFONSO AGUILAR CALDERÓN / Escuela de Ingeniería
de Mazatlán, Universidad de Sinaloa, México
<https://orcid.org/0000-0003-3881-909X>

MAC. FRANCISCO JAVIER BARRERA LAO / Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0001-5144-8305>

DR. VICTOR COLLI EK / Centro de Investigaciones Jurídicas,
Universidad Autónoma de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0002-8524-6055>

DR. GUSTAVO DOMINGUEZ RODRIGUEZ / Centro de Investigación
en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0002-9434-9937>

MAC. ANDREA DEL ROSARIO CRUZ Y CRUZ / Facultad de
Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0001-8661-1276>

DR. VIOLETA FERNANDEZ DIAZ / Facultad de Ciencias Marinas,
Universidad Autónoma de Baja California, México
<https://orcid.org/0000-0003-0450-2385>

DR. JOSE ISRAEL HERRERA / Centro de Investigaciones Jurídicas,
Universidad Autónoma de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0001-6961-8958>

DR. DANIEL SANCHEZ GARCIA / Departamento de Ingeniería
Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz, España
<https://orcid.org/0000-0002-3080-0821>

DR. LILIANA SAN PEDRO CEDILLO / Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Yucatán, México
<https://orcid.org/0000-0002-6533-6571>

DR. RENAN GABRIEL QUIJANO CETINA / Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Yucatán
<https://orcid.org/0000-0001-9515-9249>

DR. MANUEL JESUS RODRIGUEZ PEREZ / Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0003-1531-9180>

DIRECCIÓN:

Av. Humberto Lanz Cárdenas Siglo XXIII, Ex-Hacienda Kalá, C.P.
24085, San Francisco de Campeche, Campeche, México

Los criterios expuestos en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no reflejan necesariamente la opinión de la dirección de la revista.

Ciencias de la Ingeniería - FIUACAM es una publicación digital científica de la Facultad de Ingeniería, UACAM. Es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Campeche, Campus V, Predio s/n por Avenida Ing. Humberto Lanz Cárdenas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, C.P. 24075, San Francisco de Campeche, Campeche, México, Tel. (981) 81 19800 ext. 3030100, <https://cienciasdelaingenieria.uacam.mx/index.php/cdi/index>, roacanul@uacam.mx. Editor responsable: Dr. Román Alejandro Canul Turriza. Reserva de Derechos al uso Exclusivo: en trámite, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Facultad de Ingeniería UACAM, Dr. Román Alejandro Canul Turriza, Campus V, Predio s/n por Avenida Ing. Humberto Lanz Cárdenas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, C.P. 24085, Ciudad de San Francisco de Campeche, México fecha de la última modificación Junio 2025

Ciencias de la Ingeniería / Vol 1 / N° 1 / 2025 / ISSN EN TRAMITE



01

EDITORIAL

Román Canul Turriza, Oscar May Tzuc, Mario Jiménez Torres

4 - 5

02

EVALUACIÓN DE UNA NUEVA PROPUESTA DIDÁCTICA PARA LA HIDRÁULICA BÁSICA

6 - 9

03

EVALUACIÓN DE RESIDUOS MADERABLES DE PINUS SSP., DE 12 COMUNIDADES DE LA MESETA PURÉPECHA EN MICHOACÁN MÉXICO, PARA SU VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES DENSIFICADOS

10 - 15

04

ANÁLISIS TERMO-ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN CASCADA CON REFRIGERANTES DE BAJO GWP

16 - 23

05

OPTIMIZACIÓN EN UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE IMPLEMENTANDO SUBSECTORES

24 - 30



EDITORIAL

Es un honor para nosotros presentar el segundo número de la revista Ciencias de la Ingeniería, albergada por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche (UACAM). Este hito representa el fruto de un arduo trabajo y el compromiso inquebrantable por fomentar la divulgación científica, dando visibilidad a las investigaciones y desarrollos tecnológicos generados por los académicos de nuestra institución, así como por investigadoras e investigadores de otras universidades y centros de investigación.

La creación de esta revista surge con el firme propósito de consolidarse como un espacio de encuentro para investigadores, cuerpos académicos, redes de colaboración y especialistas en las diversas áreas de la ingeniería. A través de esta plataforma, buscamos difundir conocimiento de alto impacto, promoviendo el intercambio de ideas y resultados que contribuyan al avance científico y tecnológico en México y más allá de sus fronteras.

Agradecemos profundamente a los autores que han depositado su confianza en este proyecto al someter sus valiosas contribuciones para este primer número, así como a sus instituciones de origen por respaldar esta iniciativa. Nuestro compromiso es garantizar la calidad y el rigor académico de cada publicación, con el objetivo de posicionar a Ciencias de la Ingeniería en los índices y bases de datos más representativos de Latinoamérica y, a largo plazo, del ámbito internacional.

Sin duda, este primer ejemplar marca el inicio de una publicación científica con gran potencial para albergar trabajos mult institucionales y transdisciplinarios, reflejando la esencia misma de la ingeniería: innovación, colaboración y solución de problemas complejos.

Invitamos a la comunidad académica a sumarse a este esfuerzo, contribuyendo con sus investigaciones y siendo parte activa del crecimiento de esta revista. Estamos convencidos de que Ciencias de la Ingeniería se convertirá en un referente para la difusión del conocimiento científico y tecnológico en nuestra región y más allá.



EDITORES

OSCAR DE JESÚS MAY TZUC

Doctor en Ingeniería opción Energías Renovables
Facultad de Ingeniería - Universidad Autónoma de Campeche
Editor Responsable, Revista Ciencias de la Ingeniería
<https://orcid.org/0000-0001-7681-8210>
oscajmay@uacam.mx

ROMÁN ALEJANDRO CANUL TURRIZA

Doctor en Ingeniería Civil opción en Puertos y Costas
Facultad de Ingeniería - Universidad Autónoma de Campeche
Editor Responsable, Revista Ciencias de la Ingeniería
<https://orcid.org/0000-0001-7681-8210>
roacanul@uacam.mx

MARIO ANTONIO JIMÉNEZ TORRES

Doctor en Ingeniería opción Energías Renovables
Centro de Investigaciones Jurídicas - Universidad Autónoma de Campeche
Editor Responsable, Revista Ciencias de la Ingeniería
<https://orcid.org/0000-0001-7681-8210>
majimene@uacam.mx



Recibido 12/04/2025
Aceptado 07/10/2025

EVALUACIÓN DE UNA NUEVA PROPUESTA DIDÁCTICA PARA LA HIDRÁULICA BÁSICA

EVALUATION OF A NEW DIDACTIC PROPOSAL FOR BASIC HYDRAULICS

Edmundo Pedroza-González^{1*}, Julio Sergio Santana Sepúlveda¹, Emilio García Díaz¹

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, Morelos, México
Correo de autor de correspondencia: epedroza@tlaloc.imta.mx

RESUMEN

En este artículo se presenta la evaluación de una propuesta alterna para la enseñanza de la hidráulica básica basada en tres estrategias didácticas: el aprendizaje significativo, la transposición didáctica y la historia. Inicialmente se diseñó un cuestionario relacionado con los contenidos disciplinares considerados en la propuesta y, en un primer momento, dicho cuestionario se aplicó a estudiantes de seis grupos de diferentes escuelas. Posteriormente se impartieron las clases a tres grupos, denominados "grupos de referencia", usando la didáctica tradicional. Con los otros tres grupos, reconocidos como "grupos experimentales" se utilizó la nueva didáctica. En un segundo momento, al terminar las clases, se aplicó el mismo cuestionario a todos los estudiantes. Los resultados de las calificaciones se analizaron mediante el promedio simple y mediante la herramienta ANOVA. También se realizó una encuesta sobre la opinión de los profesores. Los promedios simples entre los grupos de control fueron ligeramente superiores. Al ser pequeña la diferencia, podría confundirse el efecto real del experimento con la magnitud de errores aleatorios del análisis. Mediante el ANOVA, se eliminó la incertidumbre, quedando claro que la nueva didáctica sí influyó en los resultados. Adicionalmente, la opinión de los profesores fue definitivamente positiva.

PALABRAS CLAVE

Hidráulica básica, estrategias didácticas, ANOVA.

ABSTRACT

This article presents the evaluation of an alternative approach to teaching basic hydraulics based on three teaching strategies: meaningful learning, didactic transposition, and the history. Initially, a questionnaire related to the disciplinary content considered in the proposal was designed and initially administered to students in six groups from different schools. Classes were subsequently taught to three groups, referred to as "reference groups," using traditional teaching methods. The new teaching methods were used for the other three groups, referred to as "experimental groups." The same questionnaire was administered to all students at the end of the classes. Grade results were analyzed using simple averages and ANOVA. A survey of teacher opinions was also conducted. The simple averages among the control groups were slightly higher. The small differences could confuse the true effect of the experiment with the magnitude of random errors in the analysis. Using ANOVA, uncertainty was eliminated, making it clear that the new teaching method did influence the results. Additionally, the teachers' feedback was overwhelmingly positive.

KEYWORDS

Basic hydraulics, teaching strategies, ANOVA.

INTRODUCCIÓN

A partir de algunos inconvenientes relacionados con el aprendizaje de la hidráulica básica entre estudiantes de ingeniería civil, se propuso una manera alterna para enseñar dicha materia. La propuesta incluye innovaciones basadas en estrategias didácticas, como el aprendizaje significativo y la transposición didáctica. Asimismo, se utilizan aspectos históricos relacionados con el desarrollo mismo de las ecuaciones y con anécdotas interesantes de los hombres y las circunstancias relacionadas con las ecuaciones. La propuesta se concretó en un libro de texto [1].

1.1 EL APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO

El aprendizaje significativo es una propuesta de David Ausubel [2] con una base simple: los nuevos conocimientos se basan en los ya adquiridos. En la enseñanza de la hidráulica, por ejemplo, para comprender la ecuación fundamental de la hidrostática se requiere tener conocimientos previos, tales como presión, fuerza, gravedad, o bien el conocimiento de lo que es un puente de hidrógeno. Estos conocimientos se pueden acomodar en bloques, de tal manera que los bloques de abajo "soporten" a los de arriba (Figura 1).

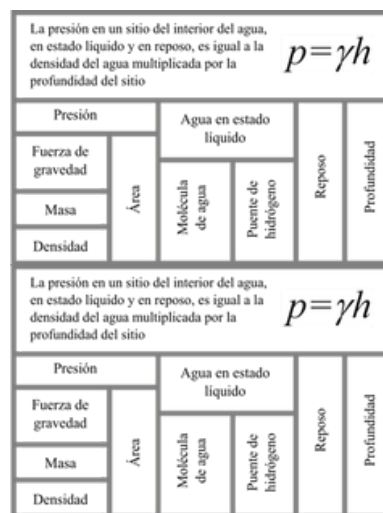


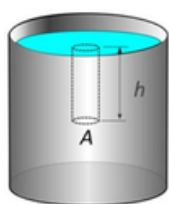
Figura 1. Estructura cognitiva de la ecuación fundamental de la hidrostática.



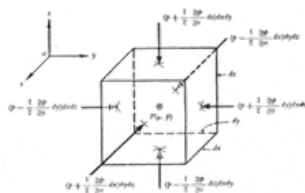


1.2 TRANSPOSICIÓN DIDÁCTICA

En palabras de Chevallard [3]: “un contenido del saber sabio que haya sido designado como saber a enseñar, sufre un conjunto de transformaciones adaptativas que van a hacerlo apto para tomar lugar entre los objetos de enseñanza. El ‘trabajo’ realizado en un objeto de saber sabio para transformarlo en un objeto de enseñanza se llama transposición didáctica”. En la nueva propuesta, la transposición didáctica se concreta mediante la deducción simplificada de las ecuaciones principales. Dicha simplicidad se logra sin menoscabo del rigor matemático o físico. Por ejemplo, la deducción simplificada de la ecuación fundamental de la hidrostática parte de la imagen de la Figura 2a. Nótese la simplicidad comparada con la Figura 2b.



(a) Deducción simplificada [4]



(b) Deducción de Sotelo [5]

Figura 2. Apoyos gráficos para deducción de la ecuación fundamental de la hidrostática.

1.3 LA HISTORIA COMO ESTRATEGIA DIDÁCTICA

El uso de la historia como estrategia didáctica se ha propuesto por varios autores [6], [7]. Con base en estas recomendaciones se recopilieron diversas anécdotas históricas relacionadas con las cuatro ecuaciones principales de la hidráulica.

METODOLOGÍA

La aplicación y evaluación de la propuesta se realizó a través de los momentos sustantivos que enseguida se enlistan.

- Diseño de un cuestionario
- Primera aplicación del cuestionario
- Impartición de clases de manera tradicional y con la nueva propuesta
- Segunda aplicación del mismo cuestionario
- Entrevista a profesores

2.1 DISEÑO DE CUESTIONARIO

Se diseñó un cuestionario mediante el cual se inspeccionan conocimientos previos que el alumno debiera tener antes de iniciar el curso de hidráulica, sobre todo contenidos de física y de conocimientos relacionados con las ecuaciones principales de la hidráulica [8].

2.2 PRIMERA APLICACIÓN DEL CUESTIONARIO

Antes de iniciar las clases de hidráulica básica, se aplicó el cuestionario a seis grupos de estudiantes de diversas escuelas. Las instituciones participantes fueron el Tecnológico de Monterrey, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, la Universidad Autónoma de Zacatecas y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Las tres primeras instituciones participaron con un grupo cada una, mientras que la Universidad Michoacana participó con tres grupos. Cabe destacar que se invitó a 20 profesores y el número de grupos fue función de las respuestas positivas por parte de los profesores que atendieron la invitación. No hubo intención en el número de grupos por institución.

2.3 IMPARTICIÓN DE CLASES DE MANERA TRADICIONAL Y CON LA NUEVA PROPUESTA

A tres de los grupos de estudiantes participantes se les impartió la clase de manera tradicional. A estos grupos se les reconoció como “grupos de referencia”. A los otros tres grupos se les impartió la clase utilizando la nueva propuesta, a este segundo conjunto se les llamó “grupos experimentales”.

2.4 SEGUNDA APLICACIÓN DEL MISMO CUESTIONARIO

Al terminar de ver el tema de ecuaciones básicas, tanto en grupos de referencia como en grupos experimentales, se aplicó el mismo cuestionario inicial.

2.5 ENTREVISTA A PROFESORES

Para apoyar la bondad o desventaja de la nueva propuesta, además de los cuestionarios se realizó una entrevista a los profesores que trabajaron con grupos de control.

RESULTADOS

Primeramente se analizaron los resultados utilizando los promedios simples de las calificaciones. En este análisis se detectó una diferencia muy pequeña entre las calificaciones de los grupos de referencia y los grupos experimentales. Para revisar si los resultados eran diferentes entre los grupos debido a un efecto de la propuesta o si eran diferentes por errores aleatorios, ajenos a la aplicación de la nueva propuesta, se utilizó el ANOVA, herramienta que aclara la naturaleza de los resultados cuando estos son muy parecidos dentro de un experimento.

3.1 REVISIÓN DE RESULTADOS POR PROMEDIO

Los promedios de las calificaciones obtenidas por los alumnos de cada grupo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Conjunto de datos utilizado

Grupos	Primera aplicación del cuestionario	Segunda aplicación del cuestionario	Diferencia
Grupos de referencia (didáctica tradicional)			
A	3.76	3.26	-0.5
B	3.48	3.43	-0.05
C	3.69	4.18	0.49
Grupo experimentales (nueva propuesta)			
1	3.27	4.20	0.93
2	2.49	4.34	1.85
3	3.69	4.51	0.82

Los resultados son claramente peculiares. En primer lugar se tienen promedios reprobatorios en todos los grupos, y los grupos de referencia no solo no mejoraron, sino que bajaron su calificación, a excepción del grupo C, que sí mejoró, pero marginalmente. Ello acusa una baja comprensión de los conceptos previos para iniciar la enseñanza de la hidráulica. El promedio, en general, de los grupos experimentales es mejor por muy poco. Los profesores opinaron que las causas de tal circunstancia fueron, por una parte, la nula motivación o presión de los alumnos, ya que dichas calificaciones no tenían ningún impacto en la calificación oficial de la materia. Dicha circunstancia se hace evidente si se observa el número de alumnos en la primera aplicación del cuestionario y se compara con el número de alumnos en la segunda aplicación, como se muestra en la Tabla 2.



Tabla 2. Número de alumnos que participaron en los cuestionarios

Grupo	Número de alumnos		Deserción (%)
	Primera aplicación	Segunda aplicación	
1	35	35	0%
2	35	33	6%
3	33	12	64%
A	31	14	55%
B	28	13	54%
C	22	13	41%

Otra circunstancia que influyó en la escasa mejoría se relaciona con la manera diferente de actuar por parte de los profesores de los grupos experimentales. Por ejemplo, un profesor dejó el primer momento del cuestionario para resolver en casa y el segundo se aplicó en clase. Otro profesor dejó la lectura del material didáctico para clase y solo se leyó voluntariamente.

3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS POR ANOVA

La ínfima diferencia en los promedios sugiere la posibilidad de una baja o nula ventaja de la nueva didáctica, sin una diferencia estadísticamente significativa, lo cual conlleva el riesgo de que las variaciones de calificación entre los exámenes pudieran obedecer a errores aleatorios y no al efecto de la nueva didáctica. Con el fin de establecer un mayor rigor analítico se recurre a una herramienta común en la estadística avanzada: el análisis de varianza (ANOVA por su acrónimo en inglés), la cual permite detectar las diferencias entre grupos para concluir alguna resolución o emitir un juicio. El ANOVA es un análisis de las varianzas dentro de grupos, comparadas con las varianzas entre grupos. Al realizar esta comparación se puede determinar si las diferencias de las medias dentro los grupos son estadísticamente significativas o no. En caso de que lo sean, se considera que las diferencias entre los grupos no dependen del azar, y que hay afectación sobre la variable independiente que provoca dicha diferencia. Si no lo son, se puede concluir que las diferencias entre los grupos se deben a cuestiones aleatorias y que los efectos externos no afectan a la variable independiente o cuantitativa. La gráfica de la Figura 3 es ilustrativa de la esencia del ANOVA.

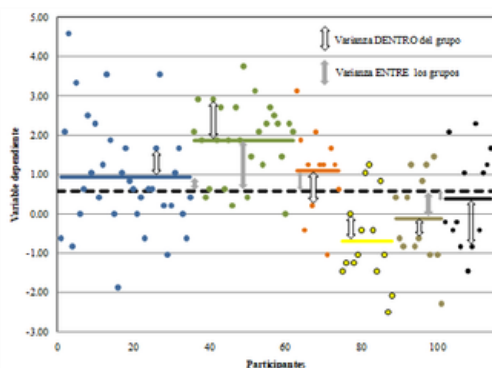


Figura 3. Varianza dentro de un grupo y varianza entre los grupos

Para este caso, se planteará la hipótesis nula y la hipótesis alterna, de la misma manera que se plantean comúnmente, es decir:

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ $H_1: \text{Al menos dos medias no son iguales}$	(1)
--	-----

En la hipótesis nula H_0 se supone que las medias de cada grupo son iguales. En la hipótesis alterna H_1 se supone que al menos dos de dichas medias no son iguales. Cada hipótesis tiene su significado: si la hipótesis nula resulta verdadera, quiere decir que aquellos grupos a los que se les impartió la clase con la nueva didáctica no experimentaron ningún cambio con respecto a los grupos a los que se les impartió la clase de manera tradicional y que las diferencias se deben a errores aleatorios.

Primeramente se acomodan las observaciones de cada muestra por columnas. En este caso, las muestras son los grupos que respondieron el cuestionario en una primera y en una segunda aplicación. Los datos son las diferencias de calificación de cada alumno entre la primera y la segunda aplicación. Asimismo, se aclara que se desecharon y acomodaron los espacios vacíos correspondientes a los alumnos que ya no se presentaron a la segunda aplicación del cuestionario. Posteriormente se utilizó la tabla ANOVA (Tabla 3).

Tabla 3. Número de alumnos que participaron en los cuestionarios

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados de medias	f calculado
Tratamientos	$SSA = \sum_k C_k^2 - \frac{(\sum x_i^2)}{n}$	c-1	$s_i^2 = \frac{SSA}{c-1}$	$\frac{s_i^2}{s^2}$
Error	$SSE = \sum x_i^2 - \sum C_k^2$	n-c	$s^2 = \frac{SSE}{n-c}$	

Donde:

C = suma de datos por columna

i = contador correspondiente al orden de cada columna (1ª columna i=1; 2ª columna i=2; etc.)

c = número de columnas

n = número de datos

k = número de datos en cada columna

= suma de todos los datos

Realizando los cálculos se encontraron los datos siguientes (Tabla 4):

Tabla 4. Resultados del ANOVA

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados de medias	f calculado
Tratamientos	SSA = 78.29	5	15.65	10.69
Error	SSE = 156.63	107	1.46	

El valor de f calculado es 10.69. Ahora bien, para un nivel de significancia estadística de 0.05, la curva de distribución F, para los grados de libertad señalados en la Tabla 4, arroja un valor crítico de 2.3. El valor de f calculado es varias veces mayor que dicho valor crítico, con un p-value de 2.39×10^{-6} ; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula. Esto quiere decir que la varianza entre los grupos es diferente de la varianza dentro de los grupos. Resulta válido afirmar que el hecho de haber impartido la clase a los alumnos de los grupos experimentales, utilizando la nueva propuesta, sí tuvo efecto, mostrándose en las calificaciones más altas que las calificaciones de los estudiantes de los grupos de referencia.

3.3 ENTREVISTA A PROFESORES COLABORADORES

Para contar con otro elemento de campo para la evaluación de la nueva propuesta se realizó una encuesta a los tres profesores de los grupos de control (Tabla 5).



Tabla 5. Opiniones de tres profesores colaboradores

Aspectos de la propuesta	Opiniones (resumidas)
Claridad de los contenidos	Muy claros/ claros/ muy claros
Cobertura del programa de la materia	Total/falta bombeo y canales/total
Explicaciones de los conceptos	Muy claras y sencillas/muy claras y sencillas/ claras pero extensas, propician la divagación
Conveniencia didáctica de la parte histórica	Es interesante y muy útil/ útil a secas/interesante pero distrae
Rigor matemático y físico de las deducciones	Adecuado/suficiente/adecuado
Complejidad de las deducciones	No son complejas/ no son complejas/ no son complejas
Adecuación de las deducciones para los objetivos de la materia	Muy adecuadas/ suficientemente adecuadas/ muy adecuadas.
Utilidad de la propuesta en general	Muy útil/muy útil/necesaria
Comentario general sobre la propuesta	Muy buena propuesta/excelente intención/definiciones agradables

En las celdas donde se muestran las opiniones, se separa mediante diagonales la opinión de cada profesor para cada aspecto de la propuesta. La evaluación general de los profesores se puede cuantificar de la manera siguiente: se multiplican las tres opiniones por cada aspecto, lo cual arroja 27 opiniones, de las cuales únicamente tres no son definitivamente positivas. Expresado en porcentaje, se puede decir que en un 89 % la evaluación de la propuesta de la nueva didáctica es favorable. Este resultado es importante porque proviene de autoridades en la materia, como lo son los profesores de la asignatura con amplia experiencia docente.

CONCLUSIONES

Se demostró, mediante tres revisiones, que la propuesta alterna es adecuada para mejorar la enseñanza la hidráulica básica. Se recomienda a los profesores utilizar la propuesta haciendo uso de la libertad de cátedra, entendida como la facultad de enseñar de manera diferente los contenidos curriculares, pero respetando su planteamiento oficial en los planes de estudio. Se recomienda igualmente seguir generando nuevas propuestas didácticas para la enseñanza de los contenidos curriculares de los temas hidráulicos de conductos presurizados y escurrimiento a superficie libre.

REFERENCIAS

- [1] E. Pedroza González, Hidráulica básica: historia, conceptos previos y ecuaciones. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2018.
- [2] S. Aparecido Dos Santos, "La Enseñanza de ciencias con un enfoque integrador a través de actividades colaborativas, bajo el prisma de la teoría del aprendizaje significativo con el uso de mapas conceptuales y diagramas para actividades demostrativo-interactivas ADI", Tesis doctoral, Universidad de Burgos, Burgos, 2008.
- [3] Y. Chevallard. La transposición didáctica, del saber sabio al saber enseñado. Argentina: Editorial Aique. 1998.
- [4] M. Kay, Practical Hydraulics. England: Taylor and Francis, 2008.
- [5] G. Sotelo Ávila, Hidráulica General Volumen 1 Fundamentos, México: Editorial Limusa, 1999.
- [6] D. P. Rodríguez Pineda y J González Flores, "La historia de la ciencia como herramienta para la construcción de significados en los cursos de física universitarios: un ejemplo en fuerza y movimiento," Tecné, episteme y didaxis: TED, no. 12, jul., 2002. doi: 10.17227/ted.num12-5965.

[7] J. Solbes y M. J. Traver Rives, "Resultados obtenidos introduciendo historia de la ciencia en las clases de física y química: mejora de la imagen de la ciencia y desarrollo de actitudes positivas," Enseñanza de las Ciencias, no. 12, ene., 2001. doi: 10.5565/rev/ensciencias.4020

[8] E. Pedroza-González, (2025, Abril 10) Encuesta de Hidráulica Básica para estudiantes. [En línea]. doi: 10.5281/zenodo.15191816.



Recibido 05/12/2025
Aceptado 22/01/2026

EVALUACIÓN DE RESIDUOS MADERABLES DE PINUS SPP., DE 12 COMUNIDADES DE LA MESETA PURÉPECHA EN MICHOACÁN MÉXICO, PARA SU VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES DENSIFICADOS

EVALUATION OF WOOD WASTE FROM PINUS SPP., FROM 12 COMMUNITIES OF THE PURÉPECHA PLATEAU IN MICHOACÁN, MEXICO, FOR ITS TECHNICAL AND ECONOMIC VIABILITY FOR THE GENERATION OF DENSIFIED BIOFUELS

Mario Morales-Máximo¹, José Guadalupe Rutiaga-Quiriones^{1*}

¹Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Mújica SN, Ciudad Universitaria, Morelia 58040, Michoacán, México
Correo de autor de correspondencia: mmoralesmaximo@gmail.com

RESUMEN

El cambio climático y el uso de combustibles fósiles han propiciado el cambio hacia la búsqueda de fuentes de energía renovable. En ese sentido, la biomasa forestal termina siendo una alternativa fundamental en el proceso de transición energética, preferiblemente en áreas rurales. Esta investigación analizó la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento de los residuos maderables de las residencias del género Pinus, generados mediante la recolección en 12 comunidades de la Meseta Purépecha, Michoacán, México, para la producción de biocombustibles densificados. La producción mostró que existía un importante volumen de residuos con alta potencia energética; comunidades como Angahuan (49,500 kg/mes) y la Mojonera (25,666 kg/mes) cuentan con el mayor volumen de residuos, lo que representa una clara ventaja para proyectos de bioenergía. La caracterización fisicoquímica y energética demostró que el material que se recolectó es óptimo para tal fin, ya que el contenido promedio de humedad es de 12.76% y el de poder calorífico promedio es de un alto valor de 17.89 MJ/kg. Adicionalmente, los altos contenidos de lignina (26.07% de promedio) favorecen la compactación y la eficiencia energética general de los biocombustibles sólidos. Del mismo modo, el análisis económico, mediante un costo esperado estimado en 0.025 USD/kg, sugiere un costo total de 41,700 USD para el aprovechamiento de los residuos de las 12 comunidades. Los resultados indican que los residuos de madera en la Meseta Purépecha cuentan con una altura de condiciones favorables para la producción de biocombustibles densificados, lo que repercute en la autosuficiencia energética, el desarrollo económico local y la práctica de la renovación de recursos en la región.

PALABRAS CLAVE

Forestal, Michoacán, Sustentabilidad, Bioenergía, Biocombustibles

ABSTRACT

Climate change and the use of fossil fuels have driven the shift towards renewable energy sources. In this context, forest biomass has become a key alternative in the energy transition process, particularly in rural areas. This research analyzed the technical and economic feasibility of utilizing wood waste from residential Pinus trees, collected in 12 communities of the Purépecha Plateau, Michoacán, Mexico, for the production of densified biofuels. The results showed a significant volume of waste with high energy potential; communities such as Angahuan (49,500 kg/month) and La Mojonera (25,666 kg/month) have the largest volumes of waste, representing a clear advantage for bioenergy projects. The physicochemical and energetic characterization demonstrated that the collected material is optimal for this purpose, given its average moisture content of 12.76% and a high average calorific value of 17.89 MJ/kg. Additionally, the high lignin content (26.07% on average) promotes compaction and the overall energy efficiency of the solid biofuels. Similarly, the economic analysis, using an estimated expected cost of USD 0.025/kg, suggests a total cost of USD 41,700 for utilizing the waste from the 12 communities. The results indicate that the wood waste in the Purépecha Plateau offers favorable conditions for the production of densified biofuels, which contributes to energy self-sufficiency, local economic development, and the practice of resource renewal in the region.

KEYWORDS

Forestry, Michoacán, Sustainability, Bioenergy, Biofuels

INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye uno de los más serios problemas socioambientales a los que nos enfrentamos en la actualidad. Las emisiones que resultan del extenso uso de combustibles fósiles han incrementado las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI), alterando los ciclos biogeoquímicos y afectando la estabilidad del clima en todo el planeta. Ante esta situación, la necesidad de buscar fuentes de energía renovable, segura y asequible se ha convertido en una prioridad en nuestro afán de lograr un desarrollo sostenible. En este sentido, los recursos forestales y la biomasa se convierten en alternativas cruciales que facilitan el camino a seguir en la transición energética en particular en áreas rurales o bien con poco compromiso energético [1][2].

La biomasa en su acepción de materia orgánica de la naturaleza, ya sea vegetal o animal se presenta como una fuente de energía renovable muy versátil, ya que parte de residuos agrícolas, forestales o incluso industriales para generar calor, electricidad o biocombustibles [3].

Los residuos maderables generados en la explotación forestal o en la industria de la madera aserraderos, trabajos de talas y transformación y cortes suponen una parte importante de la biomasa potencial en muchos de los territorios boscosos [4].

El aprovechamiento de residuos forestales para bioenergía proporciona infinitas ventajas. Por un lado, supone una diversificación de la matriz energética y una disminución de depender de los combustibles fósiles y las emisiones de CO₂ ya que la combustión de la biomasa recicla el carbono biogénico previamente capturado en la producción de biomasa. Por otra parte, se desarrollan economías circulares, que permiten la reducción de residuos forestales, generan menor presión de extracción de combustibles fósiles y, a la vez, en el medio rural pueden generar servicios sociales como el trabajo, el desarrollo económico local y la autosuficiencia energética [5].



Paralelamente, la pertinencia del empleo sostenible de la biomasa se encuentra estrechamente vinculada a los compromisos internacionales en relación al desarrollo sostenible. Efectiva, el ODS 7 (Objetivo de Desarrollo Sostenible) parte del objetivo de que "en 2030 se haya asegurado el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos, con la promoción de las fuentes de energía renovables como es el caso de la bioenergía no sólo contribuirá a la seguridad energética, sino que también se conseguirán los objetivos de tanto los ambientales como los climáticos y se contribuirá a una transición energética justa y responsable [6].

Particularmente en el caso de México, se ha reconocido que la biomasa forestal es una fuente estratégica para la energía energética renovable; su utilización como biocombustible puede contribuir a la diversificación energética del país y a la autonomía energética. En zonas rurales y en las comunidades forestales, en las que existen residuos de madera, la producción de biocombustibles sólidos (astillas, pellets, briquetas) es una alternativa técnica viable, con potencial para su implementación local, que reduce residuos y proporciona energía [7].

No obstante, el uso de biomasa debe comprenderse desde la sostenibilidad en su sentido más amplio, es decir, en la interrelación de las dimensiones ambientales, técnicas, económicas y sociales. La conversión de residuos forestales en energía debe hacerse bajo criterios de gestión forestal sostenible, para evitar la transformación en energía a expensas de la regeneración del bosque, de la biodiversidad, o bien de la capacidad de secuestro de carbono del ecosistema [8].

En este sentido, se hace necesario, llevar a cabo investigaciones de carácter local para evaluar la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento energético de residuos maderables, tomando en cuenta las características ambientales, sociales y productivas de cada área; para territorios como la Meseta Purépecha (Michoacán, México), donde la explotación y transformación de madera de *Pinus* spp. es habitual; conocer el volumen de residuos que se generan, las características físico-químicas de los mismos, la capacidad calorífica, los costos de recolección y procesamiento y la cantidad de energía que se pueda acumular, es sin lugar a dudas, importante. En la Meseta Purépecha, Michoacán, numerosas comunidades generan permanentemente residuos procedentes de la explotación y transformación de la madera de *Pinus* spp., que muchas veces no son aprovechados; el propósito de esta investigación es valorar esos residuos maderables provenientes de 12 comunidades de la región, para conocer su viabilidad técnica y económica para la producción de biocombustibles densificados; los resultados esperan generar un diagnóstico del potencial energético de los residuos de madera e información de interés para la generación de estrategias que promuevan su aprovechamiento responsable y que fomenten la autosuficiencia energética en comunidades rurales, fortaleciendo prácticas productivas y ambientales en la Meseta Purépecha [9].

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 SELECCIÓN DE LAS 12 COMUNIDADES DE ESTUDIO

La ejecución de la investigación tuvo como punto de partida la selección de las 12 comunidades de estudio de la Meseta Purépecha, Michoacán, México, para la que se definieron unos criterios específicos que garantizaran la pertinencia y representatividad de los datos obtenidos. El primer criterio implicaba que cada comunidad tuviese como actividad económica factible de su recurso maderable, concretamente en los procesos relacionados al manejo y transformación de la madera. Un segundo criterio es que las comunidades generen residuos maderables no aprovechados, ya fuesen limitaciones técnicas, económicas o la ausencia de proyectos para su valorización. El tercer criterio consistía en que, las actividades producidas estuvieran directamente vinculadas a la producción forestal de madera de las especies de *Pinus* spp., por su amplia distribución en la región y por su importancia a nivel de la industria local [10].

Con las comunidades seleccionadas, se hace la recolección de datos de campo a través de visitas técnicas, entrevistas con autoridades comunales y productores forestales y observación directa de los procesos de aprovechamiento y transformación de la madera. A la par, se hace el registro cuantitativo y cualitativo de los residuos maderables generados en cada sitio, considerando variables como tipo de residuo, volúmenes estimados, frecuencia de generación y prácticas locales de manejo.

Se recogieron también muestras representativas de los residuos para su análisis en laboratorio, donde se evaluaron características físicas (mecánicas) y propiedades energéticas relevantes que sirvieron para determinar su viabilidad, técnica y económica, en la producción de biocombustibles densificados. Todo el proceso metodológico se llevó a cabo siguiendo principios de una investigación aplicada, bajo el enfoque de la sostenibilidad y la economía circular y el uso eficiente de los recursos forestales.

2.2 CUANTIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN DE LOS RESIDUOS MADERABLES

La segunda fase de la investigación fue la cuantificación de los residuos maderables generados en cada una de las 12 comunidades objeto de estudio. Para tal fin se realizaron visitas a cada una de las comunidades y se definió, como criterio mínimo, un aserradero de cada comunidad representativo de la producción de madera basada en *Pinus* spp.

Durante cada visita, se llevó a cabo una estimación mensual de la cantidad de residuos generados, de manera de poder obtener un valor aproximado de la producción regular de subproductos maderables. El procedimiento de cuantificación consistió en pesar los residuos en un costal de almacenamiento que utilizamos como unidad estándar para la medición. Una vez hecho el pesaje del costal lleno, multiplicamos este valor por el número total de costales acumulados en el aserradero durante el periodo de referencia, de forma tal que obtuvimos la estimación mensual de residuos en kilogramos.

Una vez hecha la cuantificación, se evaluó también la viabilidad energética de esos residuos; para ello se utilizó la misma fórmula que hicimos servir para calcular el potencial energético (PE) expresado en megajulios (MJ) [11]. La expresión utilizada fue la siguiente:

$$PE = \text{Masa del residuo (kg)} \times \text{Poder Calorífico (MJ/kg)} \quad (1)$$

Esta fórmula permitió estimar la energía potencial disponible en los residuos maderables generados en cada comunidad, proporcionando información clave para su posible aprovechamiento en la producción de biocombustibles densificados.

2.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS

El tercer paso de la investigación era llevar a cabo un análisis físico, químico y energético de los residuos maderables de *Pinus* spp. previamente caracterizados en las 12 comunidades elegidas. Este análisis tenía como finalidad poder determinar si los residuos analizados presentaban las características adecuadas para aprovecharse en la elaboración de biocombustibles densificados, considerando tres parámetros básicos: contenido de humedad, composición química básica y poder calorífico.

El contenido de humedad inicial se determinó o por triplicado mediante el método de deshidratación mediante el secado en estufa, conforme a la Norma UNE-EN 14774-1 [12]. Y aplicando la siguiente ecuación:

$$CH = \frac{(\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco})}{(\text{Peso húmedo})} \times 100 \quad (2)$$

donde Ph representa el peso inicial de la muestra fresca y Ps el peso final después del secado a temperatura constante. Este parámetro permitió conocer el grado de humedad presente en los residuos, un factor decisivo para la eficiencia energética y la calidad del biocombustible.

Posteriormente, se realizó el análisis químico básico de los residuos mediante un método estandarizado en el que se determinan cuatro componentes básicos fundamentales: celulosa, hemicelulosa, lignina y extraíbles. Se estableció por medio de un procedimiento de análisis de fibras basado en el método gravimétrico denominado Van Soest utilizando α -amilasa [13]. Para ello se tomaron 0.5 g de harina de conos de pino en peso anhidro, para este proceso se utilizó un equipo ANKOM-200. Con ello se determinó la composición estructural del material y su potencial para ser transformado en un biocombustible sólido de calidad.

Finalmente, el poder calorífico de cada una de las muestras fue determinado mediante la utilización de una bomba calorimétrica, instrumento que permite medir la cantidad de energía que se libera por unidad de masa en el proceso de combustión total del residuo. Este valor es necesario para poder determinar la



viabilidad energética del material pues indica la cantidad de energía que se podría liberar una vez el residuo se haya densificado y utilizado como biocombustible [14].

La determinación del contenido de humedad, así como el análisis químico básico y la determinación del poder calorífico, han sido elegidos porque son aquellos parámetros que se pueden considerar como indicadores en la evaluación técnica de los residuos maderables en torno a su uso en la obtención de biocombustibles sólidos; todos estos parámetros dan lugar a una visión del comportamiento físico, de la composición estructural y del rendimiento energético, parámetros básicos que determinan el potencial de aprovechamiento del propio material en las condiciones exigidas de sostenibilidad.

2.4 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL RESIDUO MADERABLE

El cuarto paso del proceso de indagación consistió en llevar a cabo un estudio económico de los residuos maderables de *Pinus* spp. con el fin de estudiar su viabilidad técnica y económica para su aprovechamiento como recurso energético o productivo. Esta fue una investigación de tipo cuantitativo que permitió estimar los costos integrales asociados a la utilización de los mencionados residuos en las 12 comunidades objeto de estudio.

Para ello, se generó una base de datos que concentró la información obtenida en etapas de cuantificación y caracterización de los residuos. Posteriormente, se definieron los parámetros económicos inherentes a su manejo, transporte y eventual transformación. La principal línea de estudio estuvo centrada en poder establecer la relación correspondiente entre la cantidad total de residuos disponibles (kg) y su costo unitario por kilogramo, lo que permitió llegar a una estimación clara y comparable entre las comunidades.

La evaluación económica se llevó a cabo utilizando una ecuación de costo total básico que integra la disponibilidad del recurso y su valor económico unitario, tal y como se formula (ver Ecuación 3):

$$\text{Costo Total (CT)} = Q_r \times C_{kg} \quad (3)$$

donde:

Q_r = Cantidad de residuo maderable disponible (kg),

C_{kg} = Costo unitario por kilogramo del residuo.

Esta ecuación permitió determinar el costo estimado de los residuos maderables para cada comunidad, facilitando la comparación entre escenarios y contribuyendo a la evaluación de su factibilidad económica para la generación de biocombustibles densificados.

RESULTADOS

3.1 COMUNIDADES SELECCIONADAS

Las comunidades participantes en el estudio, que fueron seleccionadas de acuerdo a criterios previamente establecidos vinculados al aprovechamiento forestal como principal actividad económica, quedan presentadas en la Tabla 1, donde aparecen las comunidades que fueron escogidas, dado que sus características más relevantes para esta investigación son la existencia de actividades productivas asociadas al uso de recursos maderables de *Pinus* spp., la presencia de aserraderos locales, así como también la generación continua de residuos derivadas de procesos de transformación primaria de la madera.

La información inicial evidencia que las comunidades mantienen una fuerte dependencia por la actividad forestal como la principal actividad económica del lugar. Esta situación permitió evidenciar un volumen importante de residuos maderables susceptibles de ser evaluados por su posible aprovechamiento energético y/o productivo. También se evidenció que, en la mayoría de los casos, los residuos no se encuentran valorizados, lo que los convierte en una oportunidad para ser integrados en procesos de generación de bioenergía o bien en procesos de elaboración de biocombustibles densificados.

De acuerdo con la información obtenida, las características sociodemográficas y productivas de las comunidades permiten cumplir con las condiciones necesarias para avanzar hacia alternativas sustentables que propicien un uso eficiente de los residuos forestales. La información obtenida en la Tabla 1 puede considerarse como un punto de partida importante para entender el contexto territorial y productivo en el cual se ha desarrollado el trabajo y estudio que se presenta en esta investigación.

Tabla 1. Comunidades analizadas

Comunidad	Ubicación geográfica
Angahuan	19°32'50" 102°13'34"
Arantepacua	19°35'44" 101°58'06"
Capacuaro	19°32'47" 102°03'08"
Cherán	19°41'16" 101°57'17"
Comachuen	19°34'16" 101°54'18"
La Mojonera	19°42'11" 101°50'00"
Nahuatzen	19°39'18" 101°54'59"
Paracho	19°38'50" 102°02'54"
Pichátaro	19°34'15" 101°48'25"
Sevina	19°37'44" 101°54'02"
Turícuaró	19°34'15" 101°56'23"
Quinceo	19°35'37" 101°59'58"

3.2 ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE RESIDUOS Y POTENCIAL ENERGÉTICO

Las doce comunidades seleccionadas para este estudio quedan reflejadas en la Tabla 2, donde se aporta información sobre la cantidad de residuos maderables generados y su potencial energético estimado. A medida que se cuantificaron los residuos de aserrín de *Pinus* spp en kg. por mes se procedió a calcular su potencial energético anual a partir de la Ecuación 1, lo que nos permitió estimar la viabilidad de la biomasa generada para la generación de biocombustibles densificados.

En términos generales, los resultados demuestran una notable variabilidad entre comunidades tanto en la generación de residuos y el potencial energético asociado, y dicha variabilidad parece estar relacionada directamente con la intensidad de las actividades forestales, así como con la intensidad de aprovechamiento maderable propia de cada una de las localidades.

Los valores obtenidos indican que la comunidad de Angahuan genera un mayor volumen de residuos, alcanzando los 49,500 kg/mes, lo que se traduce en un potencial energético en el orden de los 11,632.6 TJ del mismo modo que la comunidad con mayor cantidad de biomasa utilizada para fines energéticos. Por el contrario, Turícuaró y Paracho son los que tienen los volúmenes más bajos, 3,000 kg/mes, y 3,200 kg/mes, con potenciales energéticos para la generación de biocombustibles que no alcanzan los 800 TJ/año.

La Tabla 2. presenta de forma resumida los resultados del análisis anual de los residuos maderables de *Pinus* spp. contenidos en los mismos y su potencial energético estimado para cada una de las comunidades evaluadas.

A partir de los resultados se identifica las comunidades que poseen un mayor potencial al momento de desarrollar proyectos de bioenergía, siendo Angahuan y La Mojonera las que más producen residuos, circunstancia que les brinda una clara ventaja comparativa para poder generar biocombustibles densificados. Este hecho es un soporte fundamental para la toma de decisiones que vayan encaminadas a la valorización energética de los residuos forestales ubicados en la región de la Meseta Purépecha.



Tabla 2. Estimación del residuo maderable de *Pinus* spp., y su potencial energético

Comunidad	Residuos de biomasa de aserrín (kg/mes)	Potencial energético (TJ/año)
Angahuan	49,500	11,632.6
Arantepacua	8,500	2,856.4
Capacuaro	9,000	2,890
Cherán	8,000	2,728
Comachuen	5,000	2,062
La Mojonera	25,666	6,704.50
Nahuatzen	5,200	2,116.96
Paracho	3,200	787.36
Pichátaro	10,000	3,172
Sevina	5,200	2,116.96
Turícuro	3,000	740.8
Quinceo	6,700	2,439.16

3.3 CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA Y ENERGÉTICA

La caracterización físicoquímica y energética de los residuos maderables de *Pinus* spp. generados en las 12 comunidades seleccionadas se muestra en la Tabla 3. Estos resultados permiten evaluar la viabilidad técnica del material para la producción de biocombustibles densificados, considerando variables fundamentales como el contenido de humedad, poder calorífico, composición estructural (celulosa, hemicelulosa), lignina, extraíbles y contenido de cenizas. Los valores de contenido de humedad mostraron diferencias significativas entre comunidades, presentando, en términos generales, un contenido de humedad de 12.76%. Restando a las comunidades con los menores valores de humedad se encuentran: Nahuatzen (5.61%), Arantepacua (6.24%), Capacuaro (10.29%).

Se considera que, en la elaboración de biocombustibles sólidos, es un excelente resultado una humedad menor a un 12% puesto que no es necesario realizar procesos previos, lo que contribuiría en rebajar. Los procesos previos y requerimientos de tiempo de acondicionamiento. La literatura científica sugiere que los biocombustibles con un contenido inferior al 12% permiten la optimización de los procesos de compactación, una reducción de pérdidas de energía en el momento de la combustión, así como una mejor distribución de las condiciones de combustión [15][16]. En este sentido, las comunidades citadas configuran materiales idóneos para el briqueteado o el peletizado.

El poder calorífico (PC) representa un valor fundamental para la elaboración de biocombustibles sólidos, ya que es un parámetro que permite saber qué cantidad de energía puede producirse en el proceso de combustión. La Tabla 3 presenta un promedio de 17.89 MJ/kg, con las mejores comunidades siguientes: Cherán (19.0 MJ/kg), Paracho (18.9 MJ/kg), Quinceo (18.9 MJ/kg), Turícuro (18.8 MJ/kg) y Sevina (18.6 MJ/kg). Estas cifras altas de PC son muy coincidentes con las obtenidas para biomasa de *Pinus* spp. en trabajos anteriores, donde los rangos son entre 18 y 20 MJ/kg [17][18]. La obtención de poderes caloríficos altos sugiere que los residuos evaluados tienen una gran habilidad para generar energía térmica, ya que favorecen combustiones eficientes y estables en biocombustibles sólidos en ámbitos domésticos o industriales.

Tabla 3. Caracterización físicoquímica y energética

Comunidad	Contenido de humedad (%)	Poder calorífico (MJ/kg)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Extraíbles (%)	Cenizas (%)
Angahuan	15.68	18.9	55.64	14.93	25.75	2.46	1.22
Arantepacua	6.24	17.2	52.58	14.29	27.16	2.72	3.25
Capacuaro	10.29	16.2	57.70	15.33	24.34	1.45	1.18
Cherán	15.69	19.0	51.09	13.63	26.30	7.24	1.74
Comachuen	11.78	18.7	53.04	18.59	24.96	2.20	1.21
La Mojonera	11.84	17.5	54.33	17.33	24.64	1.53	2.17
Nahuatzen	5.61	16.3	53.02	16.88	25.44	1.20	3.46
Paracho	13.85	18.9	49.50	16.51	25.76	4.99	3.24
Pichátaro	23.53	17.1	52.36	17.23	25.46	1.77	3.18
Quinceo	13.22	18.9	51.00	17.47	26.66	1.62	3.25
Sevina	13.84	18.6	50.76	13.68	28.95	5.44	1.17
Turícuro	16.61	18.8	52.27	16.73	27.38	2.45	1.17
Promedio	12.76(± 3.31)	17.89(± 0.16)	52.61(± 2.09)	15.22(± 2.13)	26.07(± 1.30)	2.84(± 2.00)	2.186(± 0.963)

La lignina es uno de los más poderosos efectores de la calidad de los biocombustibles densificados. La presencia de lignina incluye directamente valores de poder calorífico más altos y mejor capacidad de ignición, al igual que también actúa como aglutinante natural en el proceso de compactado. La caracterización muestra contenidos de lignina elevados en las comunidades como: Sevina (28.95%), Cherán (26.30%), Quinceo (26.66%), Paracho (25.76%). Los contenidos de lignina más altos al 25% aparecen en materiales con buenos desempeños energéticos y alta estabilidad estructural, lo cual está en concordancia con lo reportado en estudios previos en los cuales la lignina es reportada como una de las características para mejorar el desempeño de briquetas y pellets [19][20][21]. Esto indica que los restos de maderas comunes de estas comunidades presentan algunas características intrínsecas en las que propician el uso de biocombustibles densificados.

La celulosa y la hemicelulosa, aunque menos influyentes en la iniciación del fuego que la lignina, juegan un papel fundamental en la cantidad de energía total registrada, con valores promediados de 52.61% para celulosa y de 15.22% para hemicelulosa, los cuales corresponden a los rangos que se encuentran reportados para diferentes tipos de maderas pertenecientes a las coníferas.



Estas moléculas estructurales ceden energía en forma de gases combustibles en virtud de la descomposición producida por la descomposición térmica de la celulosa y la hemicelulosa, manteniendo la combustión y la liberación de calor a partir de la propagación de la flameante ignición, como confirman y explican autores en sus pertinentes estudios de composición dentro de la biomasa lignocelulósica [18].

Los resultados obtenidos son coherentes con los trabajos previos de *Pinus* spp., los cuales explican que los materiales que presentan humedades menores de 10%, un alto contenido de lignina (<25%) y un alto poder calorífico (~18 MJ/kg) son óptimos para la producción de biocombustibles sólidos.

Los trabajos de Carrillo-Parra [20] y Correa-Méndez [22], también demuestran la importancia de estas características en la eficiencia en la combustión, las reducciones de emisiones y la compactación de briquetas y pellets, características que no necesitan de la adición de componentes externos. Así mismo, la variabilidad entre comunidades que se ha puesto en evidencia en este trabajo hace también que esas variaciones no se deban a la coincidencia de las comunidades, como el caso de la altitud, el manejo del arbolado, la edad del árbol o las condiciones de almacenamiento y que incluso son consistentes a las reportadas en otras comunidades por autores que han evaluado biomasa forestal en ambientes montañosos del resto de América Latina, como ya fue mencionado.

En resumen, los valores obtenidos son positivos. Es evidente que los residuos maderables de las comunidades evaluadas reúnen condiciones óptimas para su aprovechamiento energético y están en condiciones para producir biocombustibles densificados, entendiendo como tales briquetas o pellets de baja humedad, alto poder calorífico y enriquecidos en lignina porque representan alternativas muy competitivas frente a otros recursos que hay en la región.

3.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

Mediante la aplicación del análisis económico realizado en las doce comunidades que disponían de residuos maderables de *Pinus* spp. se consideraron las cantidades mensuales de residuos generados en las localidades (Tabla 2). Aplicada la ecuación de costo total (Ecuación n.º 3) estableciendo un valor unitario estimado de 0,025 USD/kg, el coste por el aprovechamiento de los residuos llegó hasta variar entre estos dos extremos: 900 USD y 14.850 USD, dependiendo de la cantidad que se tenía disponible. El coste total de las doce comunidades alcanzó un coste total proyectado de 41.700 USD. Este resultado constituye una referencia fundamental para la dimensión económica de la viabilidad del aprovechamiento de estos residuos como energía o alimentación de la industria dentro de los marcos de la bioeconomía circular comunitaria. Dichos valores se muestran en la Figura 1.

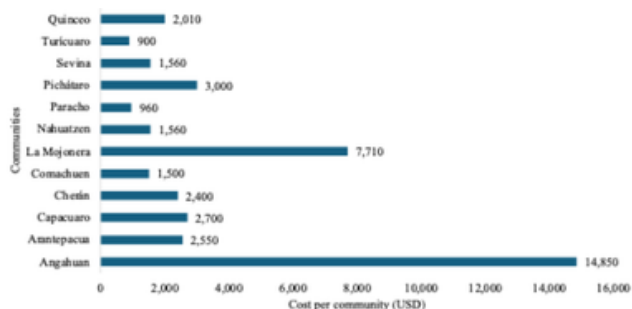


Figura 1. Proyección económica por comunidad del aprovechamiento de los residuos maderables

Los valores se hallan dentro de los rangos recogidos por la bibliografía científica internacional. Por ejemplo, un estudio desarrollado en Indonesia pone de manifiesto que el valor de los residuos de aserradero utilizados como leña fue de 0,019 USD/kg, mientras que dicho valor aumentó hasta 0,0296 USD/kg cuando fueron aprovechados para la producción de pellets -lo que significa un aumento del 56 % [23] en su valorización. Complementariamente, un análisis comparativo internacional, en el cual se incluyen países como Canadá, Brasil, Argentina y China, fijó un coste medio entre 0,018 y 0,036 USD/kg [24]. Este último dato confirma que la estimación empleada en este estudio (0,025 USD/kg) es razonable y se encuentra dentro de los parámetros de la media a escala internacional.

En el caso de América Latina, trabajos como el desarrollado en Costa Rica [25] consideran la cantidad y calidad de los residuos maderables, aunque sin la elaboración de un precio unitario.

En definitiva, los resultados van en la dirección de poder avanzar hacia evaluaciones de costo-efectividad más globales o integrales, que consideren los costes de transformación, transporte y comercialización, pero también los beneficios derivados de la sustitución de las fuentes de energía convencionales. Igualmente, confirman la conveniencia de impulsar los esquemas comunitarios de aprovechamiento energético que favorecen la autonomía energética, el desarrollo económico de proximidad y la reducción del impacto ambiental, en la línea de los principios de la economía circular y la transición energética justa.

CONCLUSIONES

La investigación muestra que resulta altamente factible técnica y económicamente la posibilidad de producir biocombustibles densificados en forma de briquetas o pellets a partir de los residuos constitutivos de los residuos de *Pinus* spp., generados en las 12 comunidades forestales caracterizadas en la Meseta Purépecha en Michoacán, México.

Así pues, el primer punto importante resulta ser el alto potencial de biomasa disponible para su aprovechamiento. Su cuantificación puso de manifiesto una destacada variabilidad, con Angahuan y La Mojonera, que generan dos de los mayores volúmenes de residuos y, como consecuencia, del mayor potencial energético estimado. Este excedente de residuo, que no tiene un aprovechamiento en la mayoría de los casos en la actualidad, constituye una materia prima local y continua que facilita el desarrollo de proyectos de bioenergía en comunidades. La caracterización fisicoquímica y energética respalda la calidad intrínseca de los residuos para su transformación.

Los promedios de poder calorífico (17.89 MJ/kg) son elevados y coinciden con los rangos de los valores reportados para *Pinus* spp., asegurando un rendimiento térmico adecuado, y el contenido de humedad promedio de 12.76% sumado con los contenidos de lignina altos (26.07%) son óptimos además; la disminución de la humedad permite compactar con poca necesidad de secados, y la lignina actúa de aglutinante natural aumentando la estabilidad del producto final (briquetas o pellets) y su calidad, prescindiendo de un aditivo sintético alguno.

El análisis de cenizas en los residuos de *Pinus* spp., de 12 comunidades presenta un promedio de 2.186 % (± 0.963), que es notablemente inferior a los límites establecidos para biocombustibles sólidos; como resultado, es posible comprobar que los residuos, tras combustión, generan un número mínimo de cenizas, evitando el hecho de tener que afrontar problemas operativos. Por tanto, estos materiales ofrecen un alto potencial para la producción de biocombustibles densificados y aseguran su calidad y eficiencia.

El análisis económico confirma que existen posibilidades de iniciar proyectos de valorización. La estimación de un costo total proyectado de 41,700 USD (dólares estadounidenses) por el volumen de residuos anuales correspondientes a las 12 comunidades, para un coste unitario razonable de 0.025 USD/kg de residuo, da un buen punto de partida para futuras evaluaciones de costes que tengan en cuenta la transformación y comercialización.

Al mismo tiempo, el contexto pone de manifiesto que la implementación de estos esquemas de aprovechamiento ayudaría en la medida de lo posible al desarrollo sostenible y a la economía circular; se ahorraría dependencia de combustibles fósiles, ayudando a reducir las emisiones de CO₂ y, con el aprovechamiento de los residuos, se generarían oportunidades de autoabastecimiento y empleos locales (por ejemplo, en las comunidades).

Estos resultados son un diagnóstico fundamental para la formulación de unas estrategias responsables que ayuden a fortalecer las prácticas productivas y ambientales en la Meseta Purépecha.

AGRADECIMIENTOS

Mario Morales Máximo agradece al CONAHCYT por la beca Posdoctoral de estancia académica por México Convocatoria 2023(I) (6175421), para llevar a cabo la investigación. Asimismo los autores expresamos nuestro agradecimiento a cada una de las comunidades que participaron y brindaron



las facilidades necesarias para el desarrollo de esta investigación. De igual manera, reconocemos el apoyo académico y logístico de las instituciones educativas involucradas, particularmente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, cuya colaboración fue fundamental para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] R. B. Mangoyana, "Bioenergy for sustainable development: An African context", *Phys. Chem. Earth Parts ABC*, vol. 34, núm. 1, pp. 59–64, ene. 2009, doi: 10.1016/j.pce.2008.01.002.
- [2] E. Medina-Ríos, M. Morales-Máximo, L. B. López-Sosa, A. Aguilera-Mandujano, y J. C. Corral-Huacuz, "Life cycle analysis (LCA) of the production of wood waste briquettes from *Pinus* spp.: Case study San Francisco Pichátaro, México.", *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 912, núm. 1, p. 012011, nov. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/912/1/012011.
- [3] M. Fontecave et al., "What energy prospects for biomass? Report by the Energy Foresight Committee of the French Academy of Sciences - January 2024", *Academie des sciences*, 23, quai de Conti, 75006 Paris (France), INIS-FR-24-0247, ene. 2024. Consultado: el 29 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://inis.iaea.org/records/b0rjl-s3k14>
- [4] N. Ayala-Mendivil, G. Sandoval, N. Ayala-Mendivil, y G. Sandoval, "Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera", *Madera Bosques*, vol. 24, núm. SPE, 2018, doi: 10.21829/myb.2018.2401877.
- [5] C. R. Plascencia, K. Mora, y N. Tancredi, "Bioenergía y desarrollo sostenible: Alternativa en la producción de biocombustibles", *GEOS*, vol. 44, núm. 2, dic. 2024, Consultado: el 29 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://geos.cicese.mx/index.php/geos/article/view/91>
- [6] B. Hasanain, "The Role of Ergonomic and Human Factors in Sustainable Manufacturing: A Review", *Machines*, vol. 12, núm. 3, Art. núm. 3, mar. 2024, doi: 10.3390/machines12030159.
- [7] C. T. Wright, K. L. Kenny, J. R. Hess, C. T. Wright, K. L. Kenny, y J. R. Hess, *A Review on Biomass Densification Technologies for Energy Application* Jaya Shankar Tumulu. 2010.
- [8] N. Ahmed, M. K. Banjare, S. B. Singh, A. B. Khan, K. N. Sharma, y K. Behera, "Biomass Wastes for Bioenergy-Based Applications", en *Biomass Wastes for Sustainable Industrial Applications*, CRC Press, 2024.
- [9] M. Morales-Máximo y J. G. Rutiaga-Quñones, "Analysis and utilization of lignocellulosic materials for the generation of solid biofuels from the Purépecha Plateau in the state of Michoacán, Mexico", *Results Eng.*, vol. 26, p. 105230, jun. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.105230.
- [10] M. Morales-Máximo, V. M. Ruiz-García, L. B. López-Sosa, y J. G. Rutiaga-Quñones, "Exploitation of Wood Waste of *Pinus* spp for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico", *Appl. Sci.*, vol. 10, núm. 8, Art. núm. 8, ene. 2020, doi: 10.3390/app10082933.
- [11] M. Morales-Máximo et al., "Multifactorial Assessment of the Bioenergetic Potential of Residual Biomass of *Pinus* spp. in a Rural Community: From Functional Characterization to Mapping of the Available Energy Resource", *Fire*, vol. 6, núm. 8, Art. núm. 8, ago. 2023, doi: 10.3390/fire6080317.
- [12] UNE-EN 14774-1, "Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad.", en Parte 1: Humedad total, AENOR., Madrid, España, 2010, p. 10.
- [13] H. K.; Goering y P. J. Van Soest, *Forage fiber analyses: apparatus, reagents, procedures, and some applications*, vol. No. 379. 1970.
- [14] L. F. Pintor-Ibarra, J. J. Alvarado-Flores, J. G. Rutiaga-Quñones, J. V. Alcaraz-Vera, M. L. Ávalos-Rodríguez, y O. Moreno-Anguiano, "Chemical and Energetic Characterization of the Wood of *Prosopis laevigata*: Chemical and Thermogravimetric Methods", *Molecules*, vol. 29, núm. 11, Art. núm. 11, ene. 2024, doi: 10.3390/molecules29112587.
- [15] Ö. Kabaş, İ. Ünal, S. Sözer, K. C. Selvi, y N. Ungureanu, "Quality Assessment of Biofuel Briquettes Obtained from Greenhouse Waste Using a Mobile Prototype Briquetting Machine with PTO Drive", *Energies*, vol. 15, núm. 22, Art. núm. 22, ene. 2022, doi: 10.3390/en15228371.
- [16] M. Järvinen et al., "Bioenergy and Waste", en *Designing Renewable Energy Systems within Planetary Boundaries: A Textbook for Energy Engineers*, M. Järvinen y H. Paulomäki, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 461–544. doi: 10.1007/978-3-031-69856-9_6.
- [17] C. Antwi-Boasiako y B. B. Acheampong, "Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities", *Biomass Bioenergy*, vol. 85, pp. 144–152, feb. 2016, doi: 10.1016/j.biombioe.2015.12.006.
- [18] R. Bhattacharya, S. Arora, y S. Ghosh, "Utilization of waste pine needles for the production of cellulolytic enzymes in a solid state fermentation bioreactor and high calorific value fuel pellets from fermented residue: Towards a biorefinery approach", *Renew. Energy*, vol. 195, pp. 1064–1076, ago. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.06.067.
- [19] L. Burhenne, J. Messmer, T. Aicher, y M.-P. Laborie, "The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis", *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 101, pp. 177–184, may 2013, doi: 10.1016/j.jaap.2013.01.012.
- [20] C. P. Artemio, N. H. Maginot, C.-U. Serafin, F. P. Rahim, R. Q. J. Guadalupe, y C.-M. Fermín, "Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species", *PeerJ*, vol. 6, p. e5504, sep. 2018, doi: 10.7717/peerj.5504.
- [21] J. G. Rutiaga-Quñones et al., "Characterization of Mexican Waste Biomass Relative to Energy Generation", *BioResources*, vol. 15, núm. 4, pp. 8529–8553, 2020, doi: DOI:10.15376/biores.15.4.8529-8553.
- [22] F. Correa-Méndez et al., "Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas", *Rev. Mex. Cienc. For.*, vol. 5, núm. 25, pp. 52–63, oct. 2014, Consultado: el 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-11322014000500005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [23] Bintang Charles Hamonangan SIMANGUNSONG et al., "Economic Value of Wood Processing Mill Residues as Feedstock for Bioenergy in Indonesia", *Journal of the Japan Institute of Energy*, vol. 98, núm. 05, pp. 110–114, 2019. Consultado: el 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jie/98/5/98_110/_article
- [24] A. Canatay, L. Prieto, y M. R. Amin, "Integrating 'Neoliberal-Turn' and 'Social-Turn' Constructs in Examining Sustainable Development and Happiness and Life Satisfaction: A Global-, Country Cluster-, and Country-Level Study", *Sustainability*, vol. 15, núm. 13, Art. núm. 13, ene. 2023, doi: 10.3390/su151310010.
- [25] J. Soto Sandoval, J. A. Aguirre, J. Méndez, y G. Pérez, "Evaluación económica y ambiental de residuos forestales en aserraderos de Costa Rica", abr. 2000, Consultado: el 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6288>



Recibido 05/12/2025
Aceptado 22/01/2026

ANÁLISIS TERMO-ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN CASCADA CON REFRIGERANTES DE BAJO GWP

THERMO-ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF A CASCADE REFRIGERATION SYSTEM WITH LOW GWP REFRIGERANTS

Jorge A. Monroy-Azpeitia¹, Juan M. Belman-Flores², Óscar J. May-Tzuc³, Juan Serrano-Arellano¹, F. Noé Demesa-López¹

¹ Tecnológico Nacional de México, Campus Pachuca, Carretera México-Pachuca Km 87.5, Colonia Venta Prieta, MX-42080, Pachuca de Soto-Hidalgo, México.

² Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5+1.8, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca-Guanajuato, México.

³ Universidad Autónoma de Campeche, Facultad de Ingeniería, Humberto Lanz Cárdenas y Fracc. Ecológico Ambiental Siglo XXIII, Colonia Ex Hacienda Kalá, MX-24085, San Francisco de Campeche-Campeche, México.

Correo de autor de correspondencia: jorgealberto.monroy.98@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis termoeconómico y ambiental de un sistema de refrigeración por compresión mecánica en cascada orientado a aplicaciones de baja temperatura, empleando refrigerantes con bajo GWP. Se construyó un modelo termodinámico empleando Spyder y la librería CoolProp para el cálculo de propiedades termodinámicas, con la finalidad de analizar parámetros clave del sistema, como la temperatura del evaporador y la temperatura del intercambiador de calor de cascada. Se identificó que el par R744-RE170 mostró el mejor comportamiento integral, alcanzando valores máximos de COP y ECOP de 1.43 y 0.34, respectivamente. Los compresores concentran el 45 % de la exergía destruida total. De igual forma, el condensador es el componente con menor eficiencia exergética, debido al elevado gradiente entrópico asociado al cambio de fase. Desde el punto de vista económico, los retornos de inversión están en torno a los 3.5 y 8.1 años, con mejoras al aumentar la temperatura del evaporador y disminuir la temperatura del intercambiador de calor en cascada. En términos ambientales, el par R744-RE170 permitió minimizar las emisiones indirectas derivadas del consumo eléctrico, alcanzando valores mínimos de 56.23 ton CO₂/año. En conjunto, los resultados confirman que los sistemas en cascada constituyen una alternativa viable y sostenible cuando se emplean refrigerantes de bajo GWP.

PALABRAS CLAVE

Sistema de refrigeración en cascada, refrigerantes de bajo GWP, exergía, análisis termo-económico

ABSTRACT

This work presents a thermoeconomic and environmental analysis of a cascade mechanical vapor-compression refrigeration system aimed at low-temperature applications, using low-GWP refrigerants. A thermodynamic model was developed using Spyder and the CoolProp library for the calculation of thermodynamic properties, with the purpose of evaluating key system parameters such as the evaporator temperature and the cascade heat exchanger temperature. It was found that the R744-RE170 pair exhibited the best overall performance, achieving maximum COP and ECOP values of 1.43 and 0.34, respectively. The compressors account for 45% of the total exergy destruction. Likewise, the condenser is the component with the lowest exergetic efficiency due to the high entropic gradient associated with the phase-change process. From an economic perspective, payback periods range from 3.5 to 8.1 years, with improvements observed when increasing the evaporator temperature and decreasing the cascade heat exchanger temperature. From an environmental standpoint, the R744-RE170 pair enabled the minimization of indirect emissions derived from electricity consumption, achieving minimum values of 56.23 ton CO₂/year. Overall, the results confirm that cascade systems constitute a viable and sustainable alternative when low-GWP refrigerants are employed.

KEYWORDS

cascade refrigeration system, low-GWP refrigerants, exergy, thermo-economic analysis

INTRODUCCIÓN

La refrigeración a bajas temperaturas es esencial para la conservación de alimentos, medicamentos y bioproductos, así como para el acondicionamiento térmico de edificaciones y recintos críticos, incluyendo laboratorios, centros de salud e instalaciones industriales especializadas. En este contexto, los sistemas de refrigeración por compresión de vapor constituyen la tecnología predominante para la producción de frío, debido a sus elevados coeficientes de desempeño (COP, por sus siglas en inglés) y a su amplio rango de aplicación en refrigeración y aire acondicionado [1]. No obstante, cuando se requieren temperaturas de operación por debajo de -10 °C, en el rango de baja y ultra-baja temperatura, los ciclos de compresión de una sola etapa presentan relaciones de compresión muy altas y una reducción apreciable del COP, lo que compromete su eficiencia y limita su campo de aplicación [2]. Para mitigar estas restricciones, los sistemas de refrigeración por compresión en cascada (VCRS, por sus siglas en inglés) dividen el salto térmico en dos o más etapas acopladas mediante un intercambiador de calor intermedio, lo que permite alcanzar temperaturas de evaporación más bajas manteniendo presiones y temperaturas de descarga del compresor en rangos aceptables [3]. De este modo, los VCRS se han consolidado como una alternativa robusta para aplicaciones de baja temperatura que exigen un control térmico estricto, tales como la congelación y almacenamiento de productos alimentarios, la conservación de vacunas y fármacos, y el enfriamiento de materiales o equipos sensibles al calor [2].

El crecimiento sostenido de la demanda de servicios de refrigeración plantea, sin embargo, retos energéticos y ambientales de gran escala. El International Institute of Refrigeration (IIR) estima que el sector de la refrigeración, incluyendo refrigeración, acondicionamiento de aire y bombas de calor, representa alrededor del 20 % del consumo mundial de electricidad y contribuye con aproximadamente el 7.5 % de las emisiones globales de CO₂ [4]. Este peso sobre la demanda eléctrica se traduce en una mayor carga para las redes y en un incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero. De forma complementaria, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) reporta que el suministro de calefacción y refrigeración en los sectores residencial, comercial e industrial concentra cerca de la mitad del consumo final de energía a nivel mundial, lo que refuerza la necesidad de transitar hacia soluciones más eficientes y basadas en energías renovables [5]. Además, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA/UNEP) advierte que, bajo escenarios de continuidad de las políticas actuales, la demanda global de servicios de refrigeración podría más que triplicarse hacia 2050 si no se adoptan de forma masiva estrategias de eficiencia energética y enfoques de refrigeración sostenible [6].

En los sistemas de compresión en cascada, la selección de los refrigerantes constituye un factor de diseño crítico.





Históricamente se han empleado refrigerantes fluorados (CFC, HCFC y HFC) con elevados valores de Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés), cuya reducción o eliminación progresiva ha sido impulsada por regulaciones internacionales orientadas a la protección de la capa de ozono y la mitigación del cambio climático [7]. En este contexto, los hidrocarburos ligeros (R290, R600a, R1270) se han consolidado como alternativas de bajo GWP, con Potencial de Agotamiento de Ozono (ODP, por sus siglas en inglés) nulo y propiedades termodinámicas favorables, capaces de ofrecer desempeños energéticos y exergéticos comparables a los de R134a, al tiempo que reducen de manera significativa la huella de CO₂ equivalente del sistema [8].

La evaluación del desempeño de ciclos de compresión de vapor, incluidos los sistemas en cascada, se ha basado tradicionalmente en indicadores energéticos de la Primera Ley de la Termodinámica, tales como el COP. Sin embargo, el análisis energético no permite localizar ni cuantificar las irreversibilidades internas del ciclo ni la degradación de la calidad de la energía. En contraste, el análisis exergético —formulado a partir de la Primera y la Segunda Ley de la Termodinámica— permite desagregar la destrucción de exergía por componente e identificar qué equipos (compresores, condensadores, evaporadores, válvulas de expansión) concentran las mayores irreversibilidades, proporcionando una base más sólida para priorizar acciones de mejora [7]. Aplicado a sistemas en cascada con refrigerantes de bajo GWP, este enfoque ha demostrado que la destrucción de exergía se concentra típicamente en el compresor y en los elementos asociados a la transferencia de calor, en particular el condensador y el intercambiador de calor en cascada, siendo estos los principales candidatos para estrategias de intensificación y optimización termodinámica [9], [10], [11].

Los sistemas en cascada que emplean CO₂ en el ciclo de baja temperatura y NH₃ en el de alta han sido objeto de numerosos estudios teóricos y de optimización, en los que se evalúan COP y eficiencia exergética en función de parámetros de diseño como las temperaturas de evaporación y condensación, la temperatura intermedia y el salto térmico en el intercambiador de calor intermedio [3], [9], [10], [11]. Sobre esta base se han desarrollado metodologías de optimización termoeconómica y análisis exergético avanzado que descomponen la destrucción de exergía en fracciones evitables/inevitables y propias/ajenas, proporcionando criterios cuantitativos para priorizar mejoras en compresores, válvulas de expansión e intercambiadores de calor dentro del ciclo CO₂/NH₃ [10], [11]. De forma complementaria, el análisis conjunto de energía y exergía se ha extendido al estudio de parejas de refrigerantes de bajo GWP en sistemas en cascada, evaluando múltiples combinaciones y mostrando que ciertos pares, como R41/R161 o R170/R161, presentan ventajas claras en términos de COP, eficiencia exergética y distribución de irreversibilidades [12]. En sistemas en cascada con R41/R404A y R23/R404A se ha demostrado, además, que el par R41/R404A conduce a temperaturas de descarga más bajas, menor destrucción de exergía y mayores valores de eficiencia exergética, por lo que se considera un sustituto termodinámicamente más ventajoso de R23 [12]. A escala de aplicación real, estudios en supermercados han comparado sistemas en cascada R744/R404A con configuraciones convencionales basadas en R404A y R22, reportando reducciones apreciables en el consumo eléctrico y en la relación de compresión del compresor de CO₂, lo que confirma el potencial de las arquitecturas en cascada para mejorar el desempeño energético en el sector comercial [13].

A pesar de estos avances, la mayor parte de la literatura sobre ciclos de compresión de vapor y sistemas en cascada continúa enfocándose en métricas estrictamente termodinámicas (COP, eficiencia exergética, distribución de irreversibilidades), sin integrar de manera sistemática criterios económicos ni indicadores ambientales. En años recientes han surgido enfoques integrados de tipo “3E” que combinan análisis exergético, económico y ambiental en ciclos en cascada CO₂/NH₃, permitiendo evaluar de forma simultánea la eficiencia, los costos de inversión y operación y el impacto climático del sistema [10]. De manera paralela, se han propuesto análisis conjuntos energético/exergético/ambiental para sistemas de compresión de vapor con refrigerantes de bajo GWP, en los que se cuantifica la contribución directa e indirecta a las emisiones equivalentes de CO₂ mediante indicadores como el TEWI (Total Equivalent Warming Impact) [8], [9].

En este contexto, se identifica la necesidad de estudios que aborden de forma coherente, y en un mismo marco metodológico, el desempeño termodinámico, económico y ambiental de sistemas de refrigeración en cascada con refrigerantes de bajo GWP. En este trabajo se lleva a cabo una evaluación integrada del desempeño termodinámico, económico y ambiental de un sistema de refrigeración por compresión en cascada de baja temperatura que emplea refrigerantes de bajo GWP, representativo de aplicaciones industriales y comerciales exigentes. Se busca proporcionar una base cuantitativa robusta que apoye el diseño y la adopción de sistemas de refrigeración en cascada más eficientes y alineados con los objetivos de descarbonización del sector de la refrigeración.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de refrigeración en cascada se muestra en la Figura 1, la configuración opera mediante dos ciclos independientes pero interconectados térmicamente: un ciclo de baja temperatura (LT) y otro de alta temperatura (HT).

El acoplamiento entre ambos se realiza a través de un intercambiador de calor en cascada (CHX), que actúa como el condensador del ciclo LT y el evaporador del ciclo HT. En el ciclo de baja temperatura, el refrigerante absorbe calor en el evaporador (EVA), donde se evapora para producir el efecto refrigerante. Este vapor es luego comprimido en el compresor de baja presión (COMP LT), incrementando su presión y temperatura. A continuación, el vapor sobrecalentado libera su calor en el CHX, condensándose al transferir energía al ciclo HT.

Por su parte, en el ciclo de alta temperatura, el refrigerante capta esta energía en el CHX, evaporándose. El vapor resultante es comprimido en el compresor de alta presión (COMP HT), donde alcanza su mayor nivel de presión y temperatura. Finalmente, el fluido se condensa en un condensador enfriado por aire (CON), cediendo su calor latente al ambiente. Para completar ambos ciclos, los refrigerantes en estado líquido pasan por sus respectivas válvulas de expansión (V-1 y V-2), donde experimentan una reducción de presión y temperatura antes de retornar a los evaporadores, reiniciando así el proceso.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Para la simulación se implementó un entorno de programación Python (Spyder 6.0.4) [14], empleando la biblioteca CoolProp [15], para la determinación de las propiedades termodinámicas de los refrigerantes. La elección de esta herramienta se basa en la necesidad de facilitar el acceso y a la reproducibilidad de la investigación.

Con el objetivo de simplificar el análisis y mantener una consistencia con investigación previas, se emplearon las siguientes suposiciones reportadas en literatura:

- Operación en estado estacionario.
- La energía cinética y potencial, son despreciables.
- Los refrigerantes se encuentran en estado de saturación a la salida de evaporadores y condensadores.
- Las válvulas de expansión se modelan como dispositivos de estrangulamiento isoentálpico.
- Se consideran despreciables las pérdidas de calor al ambiente y las caídas de presión en tuberías y componentes.
- El estado muerto para el análisis exergético se define a 298.2 K (25 °C) y 101.3 kPa.

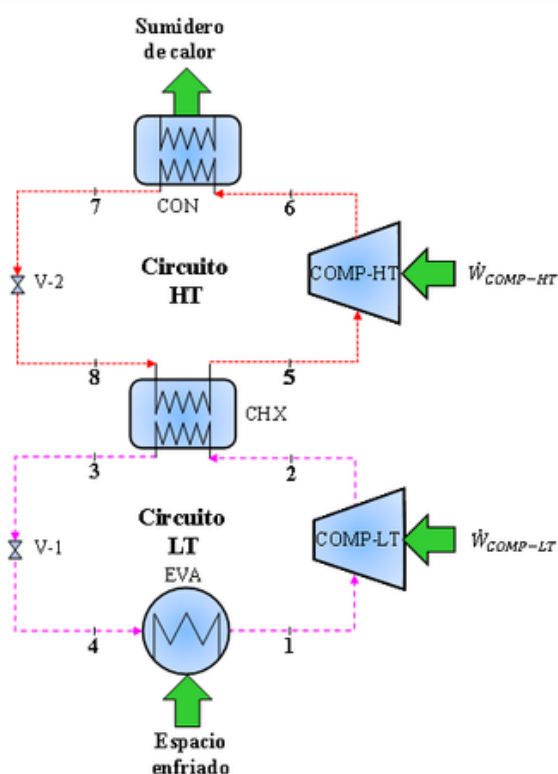


Figura 1. Sistema de compresión de vapor en cascada.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros de operación para el análisis, donde se incluye la carga térmica del evaporado, la eficiencia isoentrópica de los compresores, los intervalos de temperatura en el evaporador, intercambiador de cascas y condensador.

Tabla 1. Parámetros operativos del sistema de compresión.

Parámetro	Valor
Carga térmica del evaporador ($\dot{Q}_{EVA}$)	10 kW
Eficiencia isoentrópica en los compresores (η_i)	0.8
Eficiencia mecánica en los compresores (η_{mec})	0.9
Eficiencia eléctrica en los compresores (η_{elec})	0.95
Temperatura a la salida del evaporador (T_1)	-40 a -10 °C
Temperatura a la salida del circuito LT del intercambiador de calor de cascada (T_3)	-20 a 0 °C
Temperatura a la salida del condensador (T_7)	40 °C

2.3 PRIMERA Y SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

El balance de masa y energía para cada equipo del sistema de compresión se establece a partir de la Primera Ley de la Termodinámica [16]:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \quad (1)$$

$$\sum \dot{m}_i X_i = \sum \dot{m}_o X_o \quad (2)$$

$$\sum \dot{m}_i h_i + \sum \dot{Q}_i + \dot{W}_i = \sum \dot{m}_o h_o + \sum \dot{Q}_o \quad (3)$$

donde $\dot{m}$ es el flujo másico (kg/s), X es la fracción másica (kg de soluto/kg de solución), h es la entalpía específica (kJ/kg), $\dot{W}$ y $\dot{Q}$ son los flujos de trabajo y calor respectivamente, en kW. Los subíndices "i" y "o" denotan entrada y salida.

Por otro lado, el análisis exergético se fundamenta en la Segunda Ley de la Termodinámica, donde la exergía total de una corriente compone por exergía física y exergía química [17]:

$$\dot{E}x = \dot{E}x_{ph} + \dot{E}x_{ch} \quad (4)$$

Mientras que, la exergía física de una corriente se define como [17]:

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m}[(h - h_o) - T_o(s - s_o)] \quad (5)$$

donde s es la entropía específica (kJ/kg°C). Los subíndices O denotan los valores en el estado de referencia (estado muerto). Por otra parte, la exergía química en una mezcla se expresa como [18]:

$$\dot{E}x_{ch,k} = \dot{m} \left[\frac{\bar{e}_{ch}^0}{PM} \right]_k (1 - X_k) \quad (6)$$

donde, $\bar{e}_{ch}^0$ es la exergía estándar de formación (kJ/kmol) del componente k , y PM es el peso molecular (kg/kmol) del componente k . Otro indicador importante es eficiencia exergética de cada equipo que denota la relación entre la exergía suministrada (sum) y la exergía producida (prod) del sistema definida por [17]:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{prod}}{\dot{E}x_{sum}} \times 100 \quad (7)$$

La exergía destruida (irreversibilidades) del sistema son cuantificados mediante [18]:

$$\dot{E}x_D = \sum \dot{E}x_i - \sum \dot{E}x_o \quad (8)$$

donde $\dot{E}x_i$ es la exergía de entrada y $\dot{E}x_o$ es la exergía de salida en cada componente expresada en kW. Mientras que, el coeficiente de desempeño energético (COP) y el coeficiente de desempeño exergético (ECOP) se determina por:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{EVA}}{\dot{W}_{COMP HT} + \dot{W}_{COMP LT}} \quad (9)$$

$$ECOP = \frac{\left(1 - \frac{T_o}{T}\right) \dot{Q}_{EVA}}{\dot{W}_{COMP HT} + \dot{W}_{COMP LT}} \quad (10)$$

2.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para obtener el costo del sistema es necesario calcular el área de los intercambiadores de calor dados mediante [19]:

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \Delta T_{ml}} \quad (11)$$

donde $\dot{Q}$ es la potencia térmica (kW) obtenida a partir del balance energético, A es el área de transferencia de calor (m^2) y U es el coeficiente global de transferencia de calor ($kW/m^2 \text{ } ^\circ C$).

El costo de cada equipo de intercambio de calor está en función del área de transferencia de calor. Por lo que, se han establecido correlaciones que calculan el costo de inversión en equipamiento. Debido a parámetros económicos como la inflación es necesario realizar un ajuste con respecto al tiempo, para ello se utiliza el Índice de Costos de Plantas de Ingeniería Química (CEPCI) que muestra la relación entre el precio reciente del equipo (CEPCI2025) y el precio del mismo equipo en años anteriores (CEPCI ref) resultando en [20]:



$$PEC_{k,2023} = PEC_{k,ref} \times \frac{CEPCI_{2025}}{CEPCI_{ref}} \quad (12)$$

La tasa de costo de inversión del equipo ($\dot{Z}_k$), es la suma del costo de capital ($\dot{Z}_k^{CI}$) y de los costos de operación y mantenimiento ($\dot{Z}_k^{OM}$) determinado por [18]:

$$\dot{Z}_{tot} = \sum \dot{Z}_k^{CI} + \sum \dot{Z}_k^{OM} \quad (13)$$

$$\dot{Z}_k^{CI} = \frac{PEC_k CRF}{\tau} \quad (14)$$

$$\dot{Z}_k^{OM} = \frac{\phi PEC_k CRF}{\tau} \quad (15)$$

donde ϕ es el factor de mantenimiento ($\phi=1.06$), y τ son las horas operacionales anuales (8280 h) del sistema. Mientras que el factor de recuperación de la inversión (CRF) calculado mediante [20]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (16)$$

donde "i" es la tasa de interés anual ($i=0.10$) [21], y el período de vida útil del sistema ($N=20$ años) [21]. Mientras que el costo del suministro eléctrico se calcula por [21]:

$$\dot{C}_F = \frac{\dot{W}_{tot} k_{elec}}{\tau} \quad (17)$$

Donde, k es el costo asociado por la electricidad (0.09 \$/kWh). El costo nivelado de enfriamiento (LCOC) viene dado por [21]:

$$LCOC = \frac{\dot{C}_F + \dot{Z}_{tot}}{\dot{E}_{x_{prod,EVA}}} \quad (18)$$

2.4 ANÁLISIS AMBIENTAL

Con la finalidad de obtener el desempeño ambiental del sistema, es necesario estimar las toneladas de CO_2 liberadas por 1 kW de energía eléctrica utilizada. La cantidad estimada en toneladas de CO_2 se obtiene a partir de [22]:

$$\dot{m}_{CO_2} = \lambda \tau (\dot{W}_{tot}) \quad (19)$$

donde λ es el factor de emisiones liberadas para haber consumido un kWh de energía eléctrica consumida (0.968 kg CO_2 / kWh) [22], y $\dot{W}_{tot}$ es la potencia eléctrica consumida por los compresores del sistema por compresión de vapor.

3 RESULTADOS

3.1 VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Con la finalidad de determinar la fiabilidad del modelo computacional, se compararon datos de este estudio con los reportados por Faruque et al [23]. La Figura 2 muestra la comparación de los datos obtenidos con los del modelo reportado en literatura, para el par de trabajo R41/R601A considerando la variación de la temperatura del condensador del ciclo de compresión de baja temperatura frente al COP del sistema.

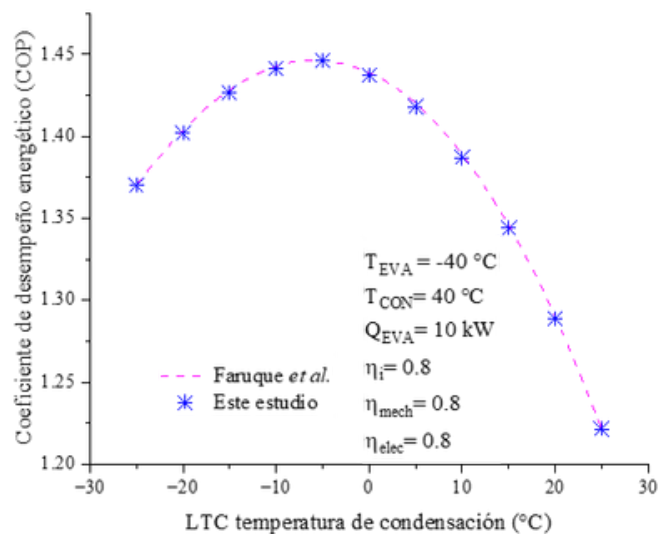


Figura 2. Validación del sistema de compresión en cascada.

3.2. DESEMPEÑO DEL SISTEMA EN CASCADA PARA DIVERSOS REFRIGERANTES

Con la finalidad de obtener el desempeño de los refrigerantes empleados, la Figura 3 muestra el COP y el ECOP para diversos refrigerantes. Incrementar la temperatura del CHX en cierto punto ocasiona un aumento máximo del COP y ECOP. Después de alcanzar su valor máximo ambos indicadores empiezan a disminuir. En un inicio incrementar la T_{CHX} ocasiona una subida en el trabajo del COMP-LT, pero se ve compensada con un aumento mayor en la carga de refrigeración. Sin embargo, al llegar al punto óptimo, predomina el trabajo del compresor sobre el efecto de refrigeración, ocasionando que un aumento en la T_{CHX} exija más trabajo al COMP-LT, mientras que la carga de enfriamiento va disminuyendo. Este comportamiento se puede observar en los 4 pares de trabajo planteados, tanto para COP, como para ECOP. El par de trabajo que resultó con mayor COP y ECOP fue el R744-RE170, con 1.42 y 0.33, respectivamente. Los COP y ECOP más altos para R744-R717, R744-R600 y R744-R600a se obtuvieron para temperaturas del CHX de -12, -10 y -8 °C, respectivamente. Esto se asocia a las propiedades termodinámicas del refrigerante del ciclo de alta presión, como el calor latente de vaporización o la presión de vapor para una temperatura dada para cada refrigerante.

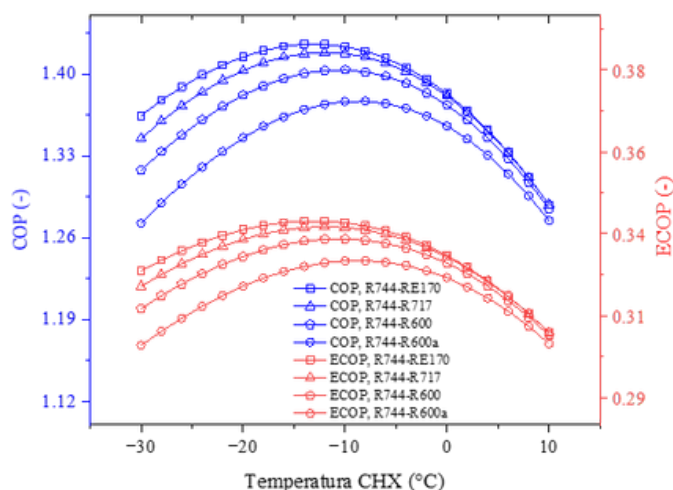


Figura 3. COP y ECOP para diversos refrigerantes del ciclo de compresión en cascada.



Por otro lado, la Figura 4 muestra la exergía destruida total para cada refrigerante. El par R744-RE170 es el equipo con menor exergía destruida (4.60 kW), mientras que el equipo que presentó mayor destrucción de exergía fue el R744-R600a (5.4 kW). Al igual que en el COP y ECOP, los pares restantes de refrigerantes encuentran su valor mínimo de exergía destruida en -12, -10 y -8 °C. Esto se asocia a que la destrucción de exergía está relacionada con el ECOP global del sistema. El par R744-RE170 muestra que está operando más cerca de los límites ideales, desperdiciando menos energía para el mismo sistema.

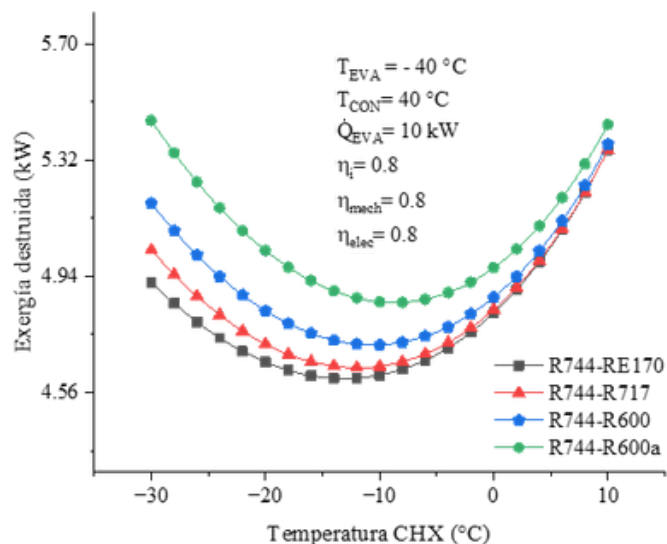


Figura 4. Exergía destruida para diversos refrigerantes del ciclo de compresión en cascada.

Mientras que, en la Figura 5 se muestra el costo nivelado de enfriamiento (LCOC) del sistema de compresión. Aumentar la T_{CHX} ocasiona que el LCOC aumente para todos los refrigerantes, esto debido a que incrementa la presión del COMP-LT, ocasionando un aumento en el costo del sistema de refrigeración. El par refrigerante con menor LCOC fue el R744-R717, este fenómeno se asocia a que con este par de trabajo se obtienen los menores costos por unidad de tiempo en el sistema de compresión, por su calor de vaporización más alto en comparación con los otros refrigerantes; es decir, el R717 absorbe más calor por kg de fluido, esto permite reducir el flujo másico para una misma capacidad, reduciendo el trabajo del compresor.

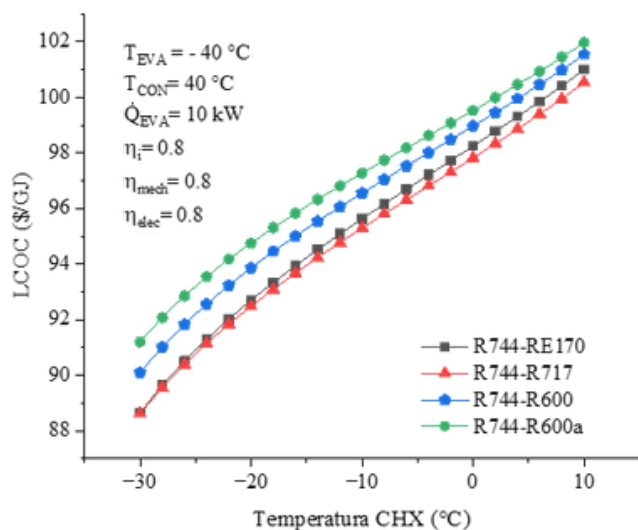


Figura 5. LCOC para diversos refrigerantes del ciclo de compresión en cascada.

Para el desempeño ambiental del sistema, se evaluaron las emisiones de CO_2 del sistema de compresión en ton/año. Como se observa en la Figura 6, al incrementar la T_{CHX} disminuyen las emisiones de CO_2 , hasta llegar a un punto óptimo. Después de esa temperatura las emisiones vuelven a aumentar, la T_{CHX} ocasiona que el sistema consuma energía eléctrica adicional en ambos compresores aumentando las emisiones por kWh consumida. El par con menores emisiones es el R744-RE170 (56.23 ton/año), mientras que el de mayores emisiones fue el R744-R600a (63 ton/año).

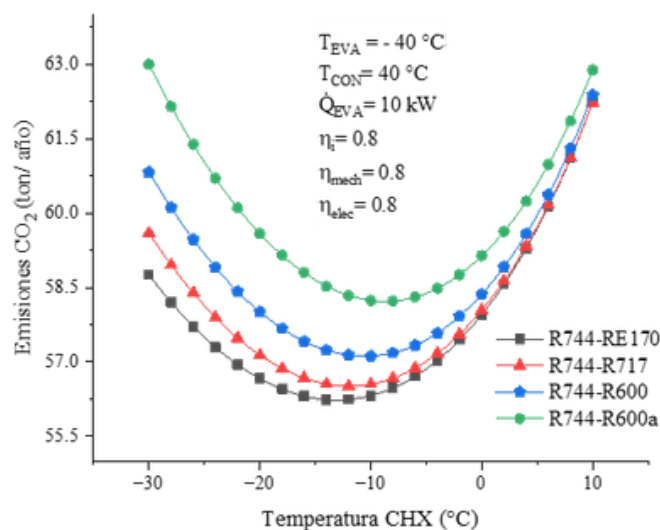


Figura 6. Emisiones de CO_2 para diversos refrigerantes del ciclo de compresión en cascada.

Es evidente que los indicadores de desempeño termodinámico (COP y ECOP), y las emisiones de CO_2 , derivadas del consumo eléctrico del sistema de compresión presentan un comportamiento inverso. Mientras que el COP y ECOP alcanzan su máximo, las emisiones alcanzan su mínimo. Debido a esta relación opuesta, la robusticidad del sistema, las diversas variables operativas y la existencia de varios puntos óptimos, ambos parámetros, se consideran candidatos para procesos de optimización multiobjetivo, especialmente en futuros estudios de eficiencia energética, desempeño económico y reducción de impacto ambiental en sistemas de refrigeración.

3.3 CASO DE ESTUDIO

Con la finalidad de obtener diversos parámetros termodinámicos, económicos y ambientales del sistema de refrigeración por compresión mecánica, se desarrollará un caso de estudio orientado a analizar como varían las principales indicadores termodinámicos, económicos y ambientales del sistema, empleando los refrigerantes R744 en el circuito de LT y R600 en el circuito de HT.

En la Figura 7 se muestran las eficiencias exergéticas, es evidente que las válvulas de expansión son los equipos con mayor eficiencia exergética, porque las principales pérdidas energéticas se asocian a efectos de pequeños cambios de presión y pequeñas disipaciones de calor, en lugar de grandes procesos termodinámicos irreversibles. Mientras que en otros equipos como el CON, la baja eficiencia exergética se asocia al gradiente de entropía (8 kJ/kg °C) por el proceso de cambio de fase del refrigerante de vapor sobrecalentado a líquido saturado. En general, el cambio de entropía afecta al flujo de exergía, provocando pérdidas representativas de exergía, y a su vez provocando una relación desproporcionada entre exergía suministrada y producida ocasionando una disminución significativa en la eficiencia exergética en este equipo. Ambos compresores presentaron una eficiencia exergética cercana al 70 %.

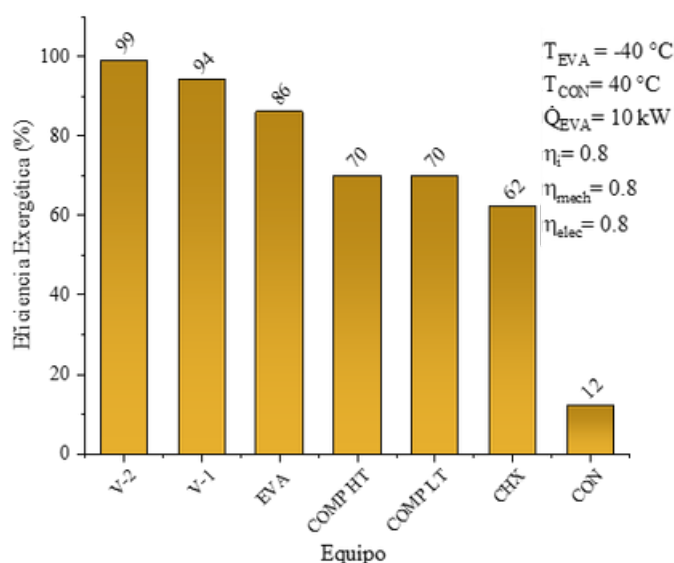


Figura 7. Eficiencia exergética por equipo para el sistema de compresión en cascada.

Por otro lado, la Figura 8 muestra la contribución de exergía destruida (irreversibilidades) por equipo, donde es evidente que la mayor contribución de exergía es por parte del COMP-LT y el COMP-HT con un 23.6 y 21.5 %, respectivamente. Esto debido a que estos equipos tienen un principio de operación que implica trabajo mecánico significativo, suministrado por una gran cantidad de energía eléctrica (kW por ambos compresores). Desde una perspectiva termodinámica, un compresor opera bajo un proceso isentrópico, es decir, provoca incrementos de entropía asociados al calentamiento del refrigerante durante la compresión. Aunado a eso, existe un salto de presión y de temperatura requerido en cada etapa (LT y HT), implicando que existan gradientes térmicos entre cada etapa del ciclo de compresión en cascada. Mientras que, el CHX, muestra una contribución de exergía destruida cercana al 11.3 %, a pesar de no involucrar trabajo mecánico, este porcentaje se asocia a los gradientes térmicos significativos entre las corrientes que intercambian calor en este equipo. Cuando la transferencia de calor ocurre, se incrementa la generación de entropía en cada corriente y, por ende, ocurre un incremento en la destrucción de exergía. Finalmente, las válvulas (V-1 y V-2), son los equipos con menor contribución en la destrucción de exergía, esto debido a que son dispositivos que no realizan ningún trabajo mecánico, y que tampoco implican algún proceso de transferencia de calor desde o hacia el entorno, su única función es disminuir la presión de los refrigerantes del circuito de LT y de HT.

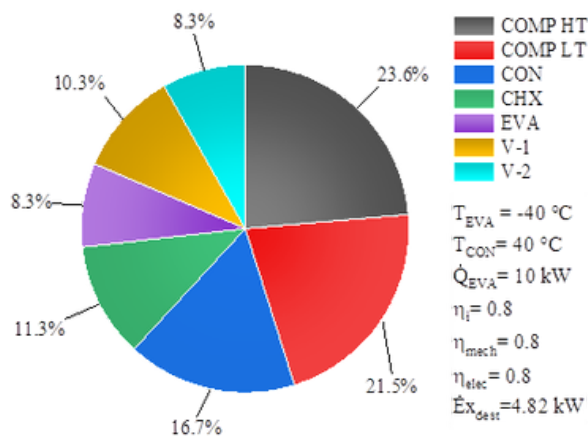


Figura 8. Porcentaje de exergía destruida por equipo para el sistema de compresión en cascada.

La Figura 9 muestra la gráfica de contorno del tiempo de retorno de la inversión en función de la temperatura de evaporación del ciclo de baja (T_{EVA}) y de la temperatura del intercambiador en cascada (T_{CHX}) para el caso de estudio. Los menores tiempos de recuperación (≈ 3.5 años) se concentran en la región donde T_{EVA} se sitúa en torno a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y T_{CHX} adopta valores cercanos a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la combinación de evaporaciones más profundas ($T_{EVA} \approx -55\text{ }^{\circ}\text{C}$) con temperaturas elevadas en el intercambiador de calor de cascada ($T_{CHX} \approx 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) conduce a retornos superiores a 7-8 años.

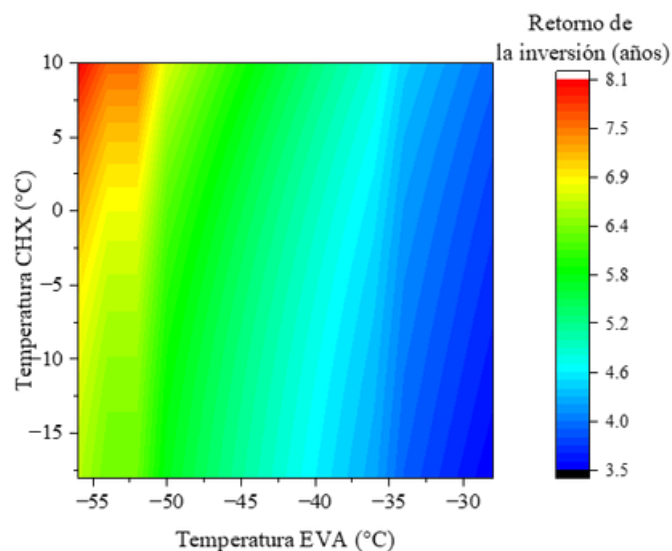


Figura 9. Superficie de contorno del retorno de la inversión en función de T_{EVA} y T_{CHX} .

Esta tendencia refleja el compromiso entre carga térmica y consumo eléctrico: al aumentar T_{EVA} disminuye el salto térmico del ciclo de baja, se reduce el caudal másico requerido y mejora el desempeño de los compresores, lo que se traduce en menores potencias de compresión instaladas y en una reducción tanto de los costos de inversión (menores áreas de intercambio de calor en el evaporador y el intercambiador en cascada) como de los costos de operación asociados al trabajo de compresión.

Para una T_{CHX} fija, el incremento de T_{EVA} acorta de forma casi monótona el tiempo de retorno desde valores cercanos a 8 años hasta aproximadamente 3.5 años, mientras que variaciones moderadas de T_{CHX} a T_{EVA} constante tienen un efecto comparativamente menor. En términos económicos, esta relajación de las condiciones de evaporación reduce el consumo eléctrico anual y, en consecuencia, acelera la recuperación de la inversión. La pendiente marcada de las bandas de color a lo largo del eje de T_{EVA} confirma que, dentro del rango analizado, el indicador económico es mucho más sensible a la temperatura de evaporación que a cambios en T_{CHX} .

Por otro lado, en la Figura 10 muestra la superficie de contorno del LCOC, en función de T_{EVA} y T_{CHX} . El valor óptimo del LCOC, se localiza en la región donde $T_{EVA} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T_{CHX} = -15$, esto indica que con estos parámetros operativos permiten mejores valores de LCOC, en esta zona es aprovechada la exergía producida del EVA.

Cuando la T_{CHX} aumenta manteniendo constante T_{EVA} , el LCOC se incrementa debido a la razón de compresión del ciclo de alta, incrementando el trabajo específico y reduciendo la exergía neta disponible en el evaporador. La disminución de exergía útil, combinada con mayores costos eléctricos, provoca un aumento directo en el LCOC al crecer el numerador (costo operativo) y disminuir el denominador (exergía producida). De forma similar, al incrementar T_{EVA} manteniendo fija T_{CHX} , el LCOC también se incrementa, aunque mediante un mecanismo distinto. Un aumento en T_{EVA} disminuye la entalpía de vaporización y reduce la exergía del proceso de evaporación, lo que obliga a incrementar el caudal másico para sostener la misma capacidad frigorífica. Este incremento en el flujo másico implica mayores áreas de transferencia de calor en el evaporador y en el intercambiador de cascada, elevando los costos de inversión. Al mismo tiempo, la exergía específica del frío producido disminuye, lo que reduce el valor del denominador en el cálculo del LCOC.

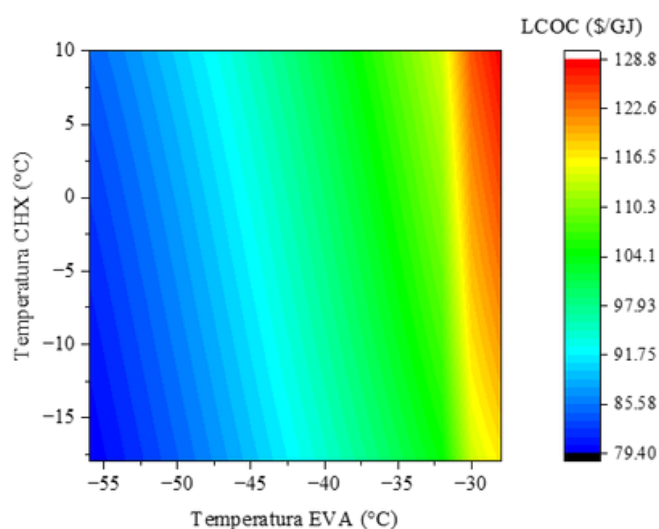


Figura 10. Superficie de contorno del LCOC en función de T_{EVA} y T_{CHX} .

Finalmente, la Figura 11 muestra la superficie de contorno de las emisiones de CO_2 del sistema de compresión de vapor en cascada. El valor óptimo de las emisiones se localiza en la región donde $T_{EVA} = -30^\circ C$ y $T_{CHX} = -15^\circ C$, lo cual indica que en este rango operativo las potencias tanto de la turbina de alta como de la turbina de baja se mantienen en niveles moderados, permitiendo un funcionamiento más equilibrado del sistema. En esta región, el gradiente térmico entre los componentes es suficiente para sostener la producción de exergía sin exigir incrementos abruptos de flujo másico ni demandas energéticas adicionales, lo que se traduce en menores emisiones indirectas asociadas al consumo eléctrico en ambos compresores. Por otra parte, cuando T_{CHX} aumenta, manteniendo constante T_{EVA} , se observa un incremento pronunciado en las emisiones de CO_2 . Esto ocurre debido a que una T_{CHX} más elevada reduce la capacidad del intercambiador de cascada para disipar calor, obligando al ciclo de alta a operar con una mayor razón de compresión. Este incremento ocasiona un aumento en la potencia consumida por el COMP-HT y aumenta las pérdidas irreversibles por compresión. A su vez, la mayor potencia requerida se traduce en un incremento directo de emisiones por unidad de exergía útil producida. Conforme T_{CHX} se aproxima a valores positivos (especialmente alrededor de $10^\circ C$), este efecto se vuelve más marcado, alcanzando el máximo incremento de emisiones.

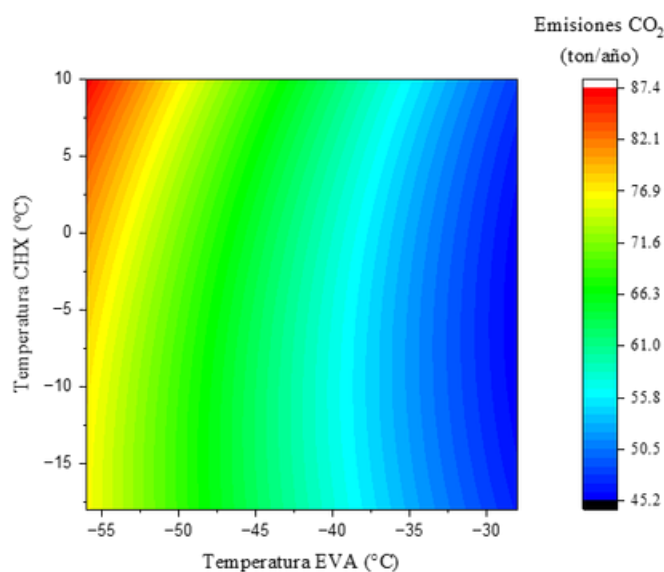


Figura 11. Superficie de contorno de emisiones de CO_2 en función de T_{EVA} y T_{CHX} .

De forma similar, al disminuir T_{EVA} hacia temperaturas más bajas, manteniendo fija T_{CHX} , las emisiones también incrementan. Una T_{EVA} demasiado baja (por ejemplo $-55^\circ C$) ocasiona un aumento en la diferencia de temperatura en el evaporador, elevando la carga térmica que debe ser compensada por el sistema. Para mantener la capacidad de enfriamiento, el flujo másico en el ciclo de compresión debe aumentar, lo cual incrementa la potencia del COMP-LT y la demanda energética total. Adicionalmente, la exergía específica del proceso de evaporación disminuye cuando la temperatura cae demasiado, reduciendo la eficiencia global del ciclo. Este deterioro exergético obliga al sistema a trabajar con mayor potencia para generar la misma capacidad de frío, incrementando las emisiones resultantes.

CONCLUSIONES

Este trabajo presentó el análisis termo-económico y ambiental de un sistema de compresión en cascada para aplicaciones de baja temperatura (0 a $-60^\circ C$), utilizando pares refrigerantes de bajo GWP. Los resultados obtenidos permiten destacar las siguientes conclusiones:

- Los valores máximos de COP y ECOP fueron de 1.43 y 0.34, respectivamente.
- El par R744-RE170 mostró los mejores resultados globales, al presentar los valores más altos de COP y ECOP, las menores tasas de exergía destruida, así como los valores más bajos de LCOC e impacto ambiental. Este comportamiento se atribuye a la elevada estabilidad termodinámica del RE170 y a su buena compatibilidad con el ciclo transcrito del CO_2 .
- Los compresores (COMP-LT y COMP-HT) fueron identificados como los componentes con mayor contribución a la destrucción de exergía, con valores cercanos al 45 %, lo que los posiciona como los principales candidatos para implementar estrategias de optimización, como mejoras en uso de compresión asistida o recuperación de trabajo, etc.
- El condensador (CON) se determinó como el componente con menor eficiencia exergética, debido al elevado gradiente de entropía asociado al proceso de rechazo de calor y al cambio de fase (de vapor sobrecalentado a líquido saturado).
- Los periodos de retorno de la inversión (payback) se ubicaron entre 3.5 y 8.1 años. Aumentar la T_{EVA} y disminuir la T_{CHX} mejora sustancialmente este indicador, al reducir los costos operativos asociados al trabajo específico de compresión.
- Incrementar T_{EVA} contribuye a reducir las emisiones de CO_2 , debido a la disminución en la potencia combinada de los compresores y a una mejora en la calidad exergética del frío producido.

Los sistemas de compresión mecánica en cascada se erigen como una alternativa viable cuando se emplean refrigerantes de bajo GWP, como el RE170, permitiendo obtener un buen desempeño termoeconómico y ambiental. Se recomienda complementar estos estudios con análisis exergoeconómicos y exergéticos avanzados, así como el uso de herramientas de optimización multiobjetivo, que permitan identificar los parámetros óptimos del sistema de refrigeración.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo financiero otorgado en el marco del Sistema Nacional de Posgrados (CVU No. 1240331). Asimismo, se reconoce al Tecnológico Nacional de México, campus Pachuca, por las facilidades, instalaciones e infraestructura brindadas para el desarrollo de esta investigación.



REFERENCIAS

- [1] F. Lontsi, O. Hamandjoda, O. T. Sosso Mayi, and A. Kemajou, "Development and performance analysis of a multi-temperature combined compression/ejection refrigeration cycle using environment friendly refrigerants," *International Journal of Refrigeration*, vol. 69, pp. 42–50, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2016.05.018.
- [2] M. Z. Saeed, L. Contiero, S. Blust, Y. Allouche, A. Hafner, and T. M. Eikevik, "Ultra-Low-Temperature Refrigeration Systems: A Review and Performance Comparison of Refrigerants and Configurations," *Energies* (Basel), vol. 16, no. 21, p. 7274, Oct. 2023, doi: 10.3390/en16217274.
- [3] J. Alberto Dopazo, J. Fernández-Seara, J. Sieres, and F. J. Uhía, "Theoretical analysis of a CO₂-NH₃ cascade refrigeration system for cooling applications at low temperatures," *Appl Therm Eng*, vol. 29, no. 8–9, pp. 1577–1583, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.07.006.
- [4] M. Baha, S. Hammami, and Dupont J-L, "The role of refrigeration in the global economy," Paris, 2025.
- [5] International Renewable Energy Agency, "Urgent Action Needed for the Energy Transition in Heating and Cooling," 2020.
- [6] United Nations Environment Programme, "Global Cooling Watch 2025," Nairobi, Kenya, 2025. doi: 10.59117/20.500.11822/48926.
- [7] J. U. Ahamed, R. Saidur, and H. H. Masjuki, "A review on exergy analysis of vapor compression refrigeration system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1593–1600, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.039.
- [8] M. Ghanbarpour, A. Mota-Babiloni, B. E. Badran, and R. Khodabandeh, "Energy, Exergy, and Environmental (3E) Analysis of Hydrocarbons as Low GWP Alternatives to R134a in Vapor Compression Refrigeration Configurations," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 13, p. 6226, Jul. 2021, doi: 10.3390/app11136226.
- [9] Z. Sun, Q. Wang, Z. Xie, S. Liu, D. Su, and Q. Cui, "Energy and exergy analysis of low GWP refrigerants in cascade refrigeration system," *Energy*, vol. 170, pp. 1170–1180, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.055.
- [10] O. Rezayan and A. Behbahaninia, "Thermoeconomic optimization and exergy analysis of CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems," *Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 888–895, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.energy.2010.12.022.
- [11] E. Gholamian, P. Hanafizadeh, and P. Ahmadi, "Advanced exergy analysis of a carbon dioxide ammonia cascade refrigeration system," *Appl Therm Eng*, vol. 137, pp. 689–699, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.03.055.
- [12] Z. Sun et al., "Comparative analysis of thermodynamic performance of a cascade refrigeration system for refrigerant couples R41/R404A and R23/R404A," *Appl Energy*, vol. 184, pp. 19–25, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.014.
- [13] A. da Silva, E. P. Bandarra Filho, and A. H. P. Antunes, "Comparison of a R744 cascade refrigeration system with R404A and R22 conventional systems for supermarkets," *Appl Therm Eng*, vol. 41, pp. 30–35, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.12.019.
- [14] Spyder Development Team, "Spyder: The Scientific Python Development Environment," 2025, 6.1.1.
- [15] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, and V. Lemort, "Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp," *Ind Eng Chem Res*, vol. 53, no. 6, pp. 2498–2508, Feb. 2014, doi: 10.1021/ie4033999.
- [16] K. Wark and Donald. E. Richards, *Termodinámica*. McGraw-Hill, 2000.
- [17] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. J. Moran, *Thermal Design and Optimization*, Wiley, 1996.
- [18] H. Ghiasirad, N. Asgari, R. Khoshbakhti Saray, and S. Mirmasoumi, "Thermoeconomic assessment of a geothermal based combined cooling, heating, and power system, integrated with a humidification-dehumidification desalination unit and an absorption heat transformer," *Energy Convers Manag*, vol. 235, p. 113969, May 2021, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2021.113969.
- [19] F. Kreith, R. Manglik, and M. Bohn, *Principios de transferencia de calor*, Segunda. CENGAGE Learning, 2012.
- [20] Y. Cao et al., "Examination and optimization of a novel auxiliary trigeneration system for a ship through waste-to-energy from its engine," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 31, p. 101860, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.101860.
- [21] J. Dai et al., "Financially focused 3E optimization of innovative solar-powered dual-temperature refrigeration systems: Balancing cost-effectiveness with environmental sustainability," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 59, p. 104597, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.CSITE.2024.104597.

[22] Y. Xu, N. Jiang, F. Pan, Q. Wang, Z. Gao, and G. Chen, "Comparative study on two low-grade heat driven absorption-compression refrigeration cycles based on energy, exergy, economic and environmental (4E) analyses," *Energy Convers Manag*, vol. 133, pp. 535–547, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.10.073.

[23] M. W. Faruque, M. R. Uddin, S. Salehin, and M. M. Ehsan, "A Comprehensive Thermodynamic Assessment of Cascade Refrigeration System Utilizing Low GWP Hydrocarbon Refrigerants," *International Journal of Thermofluids*, vol. 15, p. 100177, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.IJFT.2022.100177.



Recibido 05/12/2025
Aceptado 22/01/2026

OPTIMIZACIÓN EN UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE IMPLEMENTANDO SUBSECTORES

OPTIMIZATION IN A DRINKING WATER SUPPLY SYSTEM BY IMPLEMENTING SUB-SECTORS.

Marcelino Morales Inocente¹, Guillermo Gómez Pulido¹, Jorge Alberto Castro Viazcan¹, Narciso Vicente Cruz¹.

¹ Calzada Dr. Víctor Bravo Ahuja Num. 561, Col. Predio el Paraíso, C.P. 68350, San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca.
Correo de autor de correspondencia: mmorales5750@gmail.com

RESUMEN

En la actualidad, existen problemas por la falta de agua y uno de los temas en cuestión es el desperdicio del vital líquido dentro de un sistema de abastecimiento de agua potable. Tal es el caso de las fugas, que contemplan una salida de agua no controlada dentro de un sistema hidráulico, ya sea por diversas causas, como fallas en su diseño, roturas en las tuberías, conexiones defectuosas o corrosión en la estructura de la red. El presente trabajo tiene como propósito contrarrestar el volumen de agua fugado. La metodología comprende desde un diagnóstico del funcionamiento hidráulico del sistema, aplicando un modelo matemático en el diseño de distribución para identificar los puntos de vulnerabilidad, hasta la propuesta de mejoras, implementando subsectores que controlen el caudal inyectado. Los resultados obtenidos al proponer una sectorización en la red, redujeron un 10 % la fuga de diseño, además de permitir un mejor control de las presiones y velocidades admisibles en los componentes del sistema, recuperando el 15 % del volumen fugado desde la fuente de abastecimiento hasta los consumidores. La falta de conocimiento respecto a las fugas nos afecta de gran manera, ya que no se tiene un concepto claro del volumen total que podría estarse perdiendo por una fuga no aparente. Por ello, es preciso implementar este tipo de acciones para mejorar los sistemas y evitar que se pierda el agua a lo largo de la vida útil de la red.

PALABRAS CLAVE

Palabras Clave: Fugas, volumen, presiones, velocidades, red de agua.

ABSTRACT

Currently, there are problems due to water scarcity, and one of the key issues is the waste of this vital resource within potable water supply systems. A clear example of this is leakage, which refers to uncontrolled water outflow within a hydraulic system. This can be caused by various factors, such as design flaws, pipe breakages, defective connections, or corrosion in the network's structure. The purpose of this study is to reduce the volume of leaked water. The methodology involves diagnosing the hydraulic performance of the system, applying a mathematical model to the distribution design to identify vulnerable points, and proposing improvements by implementing subsectors that regulate the injected flow. The results obtained through the proposed sub-sector led to a 10% reduction in design leakage, in addition to better control over the pressures and permissible velocities in the system components. Furthermore, 15% of the previously lost volume—from the water source to the end users—was recovered. The lack of awareness regarding leakages significantly affects us, as there is often no clear understanding of the total volume that might be lost due to non-visible leaks. Therefore, it is essential to implement this type of action to improve systems and prevent water loss throughout the lifespan of the network infrastructure.

KEYWORDS

Leaks, volume, pressures, speeds, water network.

INTRODUCCIÓN

La sectorización en los sistemas de redes de agua potable, también conocida como subsectores, o bien, áreas con medidores distritales, se originó en el Reino Unido durante la década de 1980. Esta técnica fue desarrollada para mejorar la eficiencia en la distribución de las redes hidráulicas, facilitando la detección y control de fugas (escapes de aguas), además de controlar las presiones en toda la estructura de la red al optimizar el caudal propuesto en el diseño. Su implementación permitió a las compañías de agua, reducir pérdidas y mejorar la calidad del servicio¹.

Algunas de las dependencias, como lo son; PUMAGUA, ANEAS, IMTA, SACMEX, CONAGUA, entre otras, en los últimos tiempos han integrado acciones dentro del programa de Manejo Sustentable del Agua para la República Mexicana, las cuales plantearon las siguientes propuestas y prioridades para la solución de la problemática en las zonas más urbanizadas en materia de agua, drenaje, alcantarillado y saneamiento¹. Por parte de la Ciudad de México, en el año 2004, fue iniciado el proyecto

de sectorización de redes, el cual, ha sido continuado como una respuesta a la problemática del desabasto de agua y al incremento poblacional en algunas zonas del suministro; dicha problemática ha dejado en condiciones desfavorables a las redes existentes, afectando su funcionamiento hidráulico en la longitud del sistema, ya que, se ha incrementado considerablemente durante los últimos años, dificultado su mantenimiento y operación, provocando algunas deficiencias y variaciones de presión en diversos puntos de la su estructura. Partiendo de un punto en específico, se tiene el presente tema de estudio, una zona urbanizada con un manejo muy desgastante en cuanto a la dotación de los habitantes, del cual, tienen problemas con el desabasto de agua potable por el mal funcionamiento del sector, dicho sector abastecido por los tanques Chalmista. Para apoyar a la población se implementaron estrategias para el suministro, atendiendo la problemática de la red ubicada en la colonia Barrio Candelaria Ticomán, perteneciente a la delegación Gustavo A. Madero, que muestra deficiencias, tanto por la falta de agua, así como el problema de las fugas en algunos puntos del sistema, ya que, por los desniveles del terreno se tienen presiones hasta 50 metros columna de agua (M.C.A.) [4].





En palabras de Chevallard [3]: “un contenido del saber sabio que haya sido designado como saber a enseñar, sufre un conjunto de transformaciones adaptativas que van a hacerlo apto para tomar lugar entre los objetos de enseñanza. El ‘trabajo’ realizado en un objeto de saber sabio para transformarlo en un objeto de enseñanza se llama transposición didáctica”. En la nueva propuesta, la transposición didáctica se concreta mediante la deducción simplificada de las ecuaciones principales. Dicha simplicidad se logra sin menoscabo del rigor matemático o físico. Por ejemplo, la deducción simplificada de la ecuación fundamental de la hidrostática parte de la imagen de la Figura 2a. Nótese la simplicidad comparada con la Figura 2b.

La alternativa de la sectorización ofreció la posibilidad de justificar el control activo de fugas en una forma eficiente, obteniendo información sobre la cantidad de agua que maneja todo el sector de la zona de estudio, permitiendo un mejor control sobre la red de distribución al proporcionar un entendimiento más preciso del comportamiento del agua en la misma. En el objetivo de implementar alternativas para el control de las fugas, se requirió aislar la red primaria de los sectores de la red secundaria, haciendo un nuevo sistema de subsectores, estas con la finalidad de controlar las presiones en las líneas de distribución y elaborar un balance que permitiera identificar y determinar el agua que se pierde por fugas, por sub medición y por tomas no autorizadas. Particularmente el modelo sectorizado requiere que una red primaria abastezca a una secundaria, de tal manera que el sistema cuente con válvulas reguladoras para que las presiones no sean excesivas.

MATERIALES Y MÉTODOS.

La metodología aplica estrategias en la reducción de pérdidas de agua, como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Metodología aplicada para la sectorización.

Como primera propuesta se realiza la calibración en condiciones actuales de la red, partiendo de un modelo matemático con el software libre EPANET [3]. Este análisis es el estudio comparativo de las diferentes alternativas a proponer. Por ello, se estudió con el análisis estático y dinámico el comportamiento hidráulico de la red existente en de la zona estudio conocida Barrio Candelaria Ticoman, perteneciente a la delegación Gustavo A. Madero, Ciudad de México.

- La figura 2 representa el análisis estático: Consumo promedio en Litros Por Segundo (LPS).



Figura 2. Análisis Estático.

- La figura 3 representa el análisis dinámico: Consumo máximo de acuerdo a la curva de demanda durante 24 horas en (LPS).



Figura 3. Análisis Dinámico.

Para calibrar la red fue necesario conocer en forma detallada su topología: El material, la rugosidad, la longitud y el diámetro real de cada tubería, el coeficiente de pérdidas menores de cada accesorio y la topografía del lugar.

La dificultad central de la calibración es el desconocimiento de variables que eran constantes conocidas en el problema de la comprobación hidráulica de la red para su diseño original. Por cada variable que se libera, se debería incluir una ecuación o medición para mantener la solubilidad del sistema. Sin embargo, no existen más ecuaciones y es imposible tener un punto de medición por cada variable liberada por los costos a los que esto llevaría (Saldarriaga y salas, 2005).

2.1 DATOS DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EXISTENTE.

La estructura de la red mostrada en la figura 4 se encuentra con elevaciones de 2350 Metros Sobre el Nivel del Mar (m.s.n.m) empezando en la parte de arriba con la delimitación en color rojo y las curvas de nivel en color azul, con elevación de 2297 (m.s.n.m) proyectando un desnivel promedio 53 metros, además de sus secciones longitudinales de tuberías como se muestra en la imagen 5, (Rojo) Tubería de Polietileno de Alta Densidad (PAED) cuenta con una longitud 1.55 km y un diámetro de 12 pulgadas. Tubería asbesto-cemento cuenta con una longitud de 7.96 (km) y un diámetro de 6 (pulgadas). Tubería asbesto-cemento cuenta con una longitud de 16.81 (km) y un diámetro de 4 pulgadas. Tubería de Cloruro de Polivinilo (PVC) cuenta con una longitud de 0.53 (km) y un diámetro de 4 (pulgadas).



Figura 4. Topología de la estructura del sector en estudio.

2.2 APLICACIÓN DEL MODELO A CODIGO ABIERTO EPANET

Consta de tres entradas, como se muestra en la figura 5, con un consumo promedio total de 187 (LPS), para 456 puntos de interconexiones conocidas como nodos, equivalente el consumo por cada nodo de 0.41 (LPS), arrojando resultados de acuerdo a la evolución estática y temporal, en el funcionamiento del día.



Figura 5. Morfología del sector en estudio.

De la tabla 1. se puede observar que la relación al total de personas por tanques (GM-10, GM-11 y Candelaria No. 3) su población varía en porcentajes al número total de habitantes, GM-10 con un 20%, Candelaria No. 3, con un 30% y el tanque GM-11 con un 50%. La propuesta para los cálculos a la solución del número de habitantes se plantea como el resultado del total del área (80.916 ha.) multiplicando al porcentaje de personas (800 personas por hectárea) que para el total de área se tiene un total de 64,733 habitantes.

Tabla 1. Suministro de agua en las entradas del sistema.

TANQUE	VOLUMEN INYECTADO
GM-11	93.65 LPS
GM-10	37.46 LPS
Candelaria No. 3	56.19 LPS
TOTAL	187.31 LPS

El proceso de simulación se calculó por medio del análisis dinámico para emisores (calibración de fugas) de 0 a 0.0455, 0.02954 y 0.0651, considerando el 100% del consumo diario, con un 40% de fugas en el sistema. La calibración para los tanques de suministro GM-11 figura 6, Candelaria No. 3 figura 7 y GM-10 figura 8 se realizó con un total de 187 (LPS) y la comparación en relación a sus consumos arrojando una cantidad de 3,571.20 (m³) al día en los tres subsectores [6].

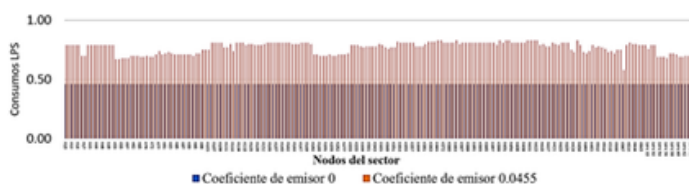


Figura 6. Evolución de la demanda base aplicando el 40% en fugas para el tanque GM-11. en modo dinámico.

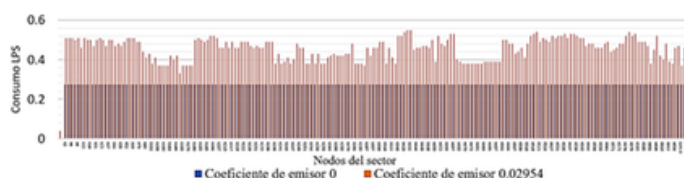


figura 7. Evolución de la demanda base aplicando el 40% en fugas para el tanque Candelaria No. 3 en modo dinámico.

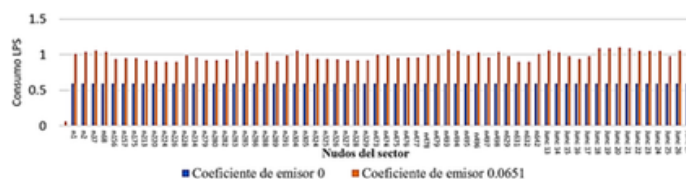


Figura 8. Evolución de la demanda base aplicando el 30% en fugas para el tanque GM-10 en modo dinámico.

2.3 PROPUESTA DE REHABILITACIÓN SECTORIZANDO LA RED DE DISTRIBUCIÓN.

Asignación de consumos en los nodos de la red representada en la tabla. 2, quedando una demanda de consumos por cada nodo de 0.46 (LPS) para el tanque GM-11, 0.27 (LPS) para el tanque CANDELARIA No. 3 y para los nodos que se suministran del tanque GM-10 igual a 0.59 (LPS).

Tabla 2. Asignación de consumos para las entradas del sistema.

CONSUMO TOTAL	APORTACIÓN	TANQUES	NODOS DE CONSUMO
187.31 LPS	50%	GM-11	203
	30%	Candelaria No.3	205
	20%	GM-10	63

De los resultados obtenidos en el diagnóstico de la red y conociendo los valores de la demanda, se deduce que, como primer objetivo, la red necesita tener la capacidad de suministrar la dotación en toda su estructura, es por eso que se propone a un cambio de tuberías que van de las existente con un diámetro de 100 (mm) a una de 150 (mm), en las secciones que a continuación se muestra en la figura 9.

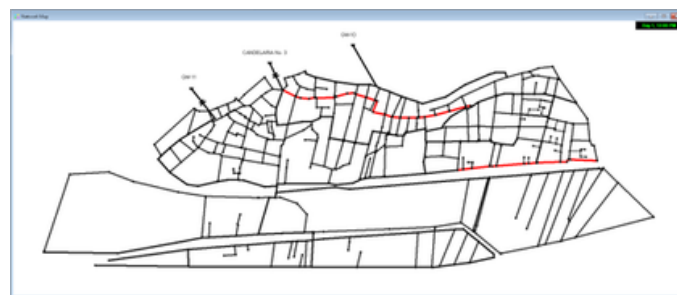


Figura 9. Mapa de la estructura de la red marcando el cambio de tubería.

Sabiendo que la sustitución de tuberías será con un diámetro mayor, se proponen dividir los sectores de acuerdo a los tanques de distribución, para tener un mejor control en el suministro, por ello el subsector para el tanque GM-10 en azul, para el tanque Candelaria No. 3 en negro y para el tanque GM-11 en verde, como se muestra en la figura 10.



Figura 10. Mapa de la estructura de la red marcando el cambio de tubería.



Los criterios a seguir para la división de subsectores, se muestran en la figura 11, parten de la infraestructura existente y de las diferentes zonas de presión en operación normal antes de iniciar el proceso, lo que resulta, una propuesta de sectorización, apoyado por las cotas de elevación, así como, las adecuaciones a éstas que pueden realizarse con ayuda de las recomendaciones que se tienen en los criterios del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento [1].



Figura 11. Mapa de 19 subsectores propuestos en la zona de estudios.

De modo que, de consigna inicial para la elección de las válvulas, no se disminuirá más del 65% del diferencial de presión existente entre la presión entrante y saliente en el sitio donde se instalarán, como se muestra en la figura 12. Las ubicaciones de las Válvulas Reductoras de Presión, así como los diámetros de las tuberías sobre las cuales se instalarán en cada una de ellas.



Figura 12. Localización de las VRP, Mapa de sectores propuestos.

RESULTADOS

Sé realizó la segunda simulación, arrojando resultados de acuerdo a la evolución temporal de 24 horas con la sectorización para el control de presiones, para una mejor eficiencia en el suministro horario, así también se analizan los nuevos resultados del suministro en las entradas, conociendo sus valores temporales nuevamente con respecto al día como se muestra en las figuras 13, 14 y 15.

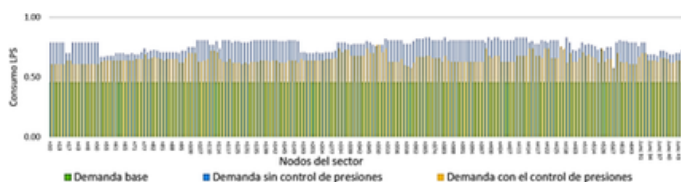


Figura 13. Comparativa de la demanda base con el sistema sectorizado en el tanque GM-11. en modo dinámico.

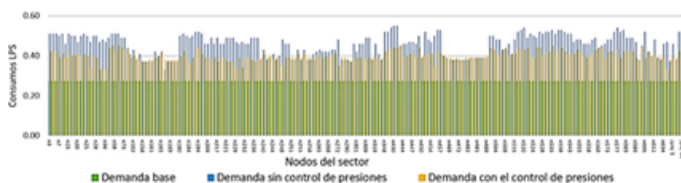


Figura 14. Comparativa de la demanda base con el sistema sectorizado en el tanque Candelaria No. 3. en modo dinámico.

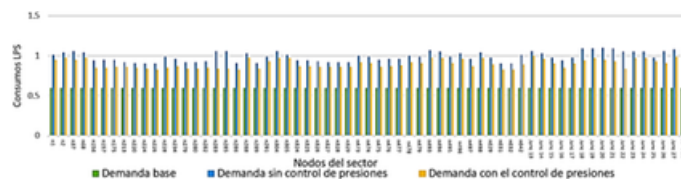


Figura 15. Comparativa de la demanda base con el sistema sectorizado en el tanque GM-10. en modo dinámico.

Con los resultados obtenidos se muestra claramente que el suministro antes de la sectorización se comporta de igual manera en las tres entradas, pero no distribuyen el mismo volumen de agua inyectado, ver figura 16.

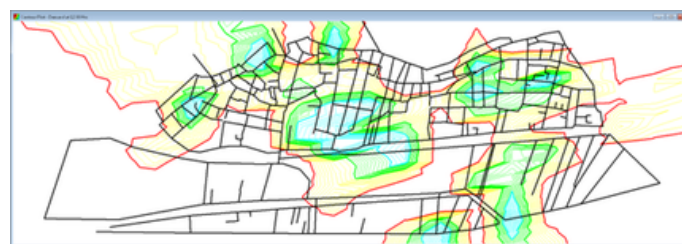


Figura 16. Demanda base antes de la sectorización en el sistema.

La evolución de la red sin el porcentaje de fugas, así como, la comparación de las presiones en toda la estructura, como se muestra en la figura 17, calificando el sistema eficiente, ahorrando un 15% en el diseño de las fugas, distribuyendo el caudal mínimo de 0.10 (LPS) en las zonas deficientes.

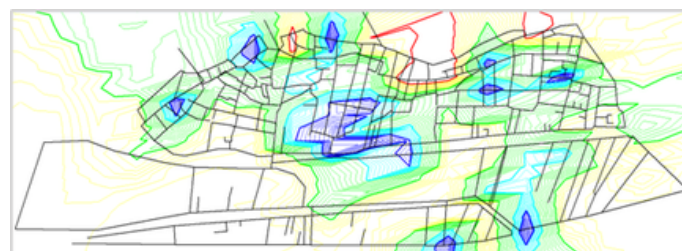


Figura 17. Suministro mínimo 0.10 LPS.

Las adecuaciones a ésta, en el día son de 3,806.89 (m³) y el gasto medio diario de 44.06 LPS, como puede verse en la tabla 3, donde aparecen los volúmenes recuperados y analizados antes de la sectorización 26,972.35 (m³) por día y después de la sectorización 23,165.57 (m³) por día dándonos un beneficio del 15 % en la eficiencia en la red de distribución ver la tabla 4.

Tabla 3. Volumen en LPS del sistema antes de la sectorización.

CONCEPTO	GASTO LPS	PORCENTAJE
Consumo	18.731	60%
Fugas	12.487	40%
DEMANDA	31.218	100%

Tabla 4. Volumen en LPS del sistema después de la sectorización.

CONCEPTO	GASTO LPS	PORCENTAJE
Consumo	18.731	70%
Fugas	8.081	30%
DEMANDA	26.812	100%

3.1 EFICIENCIA EN EL SISTEMA

El resultado de la calibración de la red de distribución ya sectorizada, y simulando los valores obtenidos para obtener las nuevas demandas el cual se comparan tanto con el control de presiones y sin el control de presiones como se muestran en las siguientes figuras, 18, 19 Y 20.

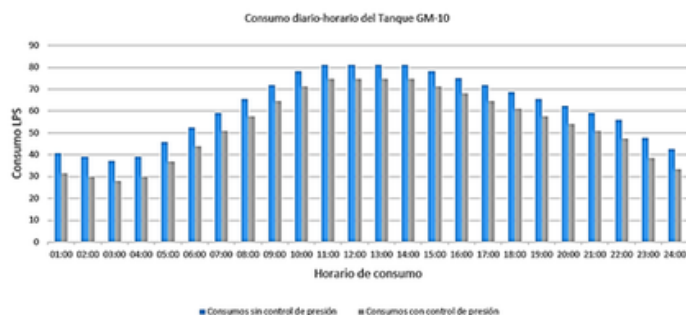


Figura 18. Comparación de consumos Diario-horario para el tanque GM-10.

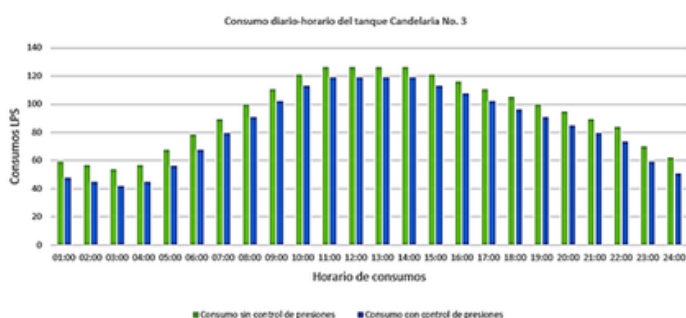


Figura 19. Comparación de consumos Diario-horario para el tanque Candelaria No. 3

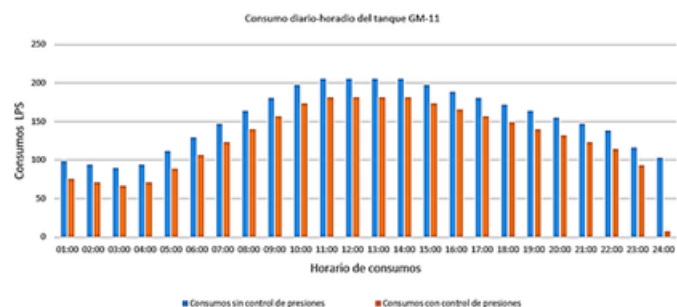


Figura 20. Comparación de consumos Diario-horario para el tanque GM-11

El caudal recuperado en el día es de 3,806.89 (m³) y el gasto medio diario es de 44.06 LPS, como puede verse en la tabla 5, donde aparecen los volúmenes recuperados y analizados antes y después de las simulaciones.

Si se toma en cuenta la distribución en la hora de mayor demanda 12:00 hrs, Se puede apreciar como el 75% de las tuberías presentan un caudal inferior a los 2 (LPS) y un 65% con un caudal inferior de 1 (LPS) como se muestra en la figura 21.

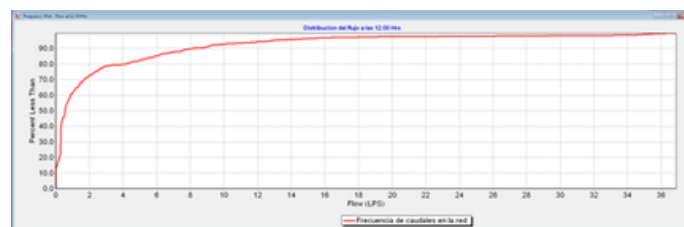


Figura 21. Porcentaje de caudales en las tuberías del sistema a las 12:00 hrs.

Al analizar los caudales en las horas de mínimo consumo se aprecia que el 83% de las tuberías no transportan caudales con más de 2 (LPS), mientras que el 75% registra caudales por arriba de los 1 (LPS), como se muestra en la figura 22.

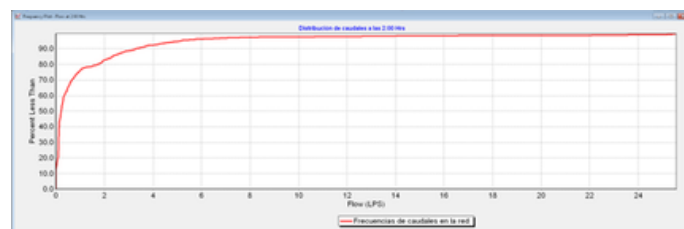


Figura 22. Porcentaje de caudales en las tuberías del sistema a las 2:00 hrs.

Se observa como la velocidad de circulación del agua es inferior a 2 m/s en la mayoría de las conducciones. De hecho, la curva de distribución indica que prácticamente el 93% de las tuberías de la red tienen velocidades inferiores a 2 m/s en hora del día medio, como se muestra en la figura 23.



Figura 23. Velocidades en las tuberías del sistema a las 12:00 hrs.

No obstante, existen tuberías aisladas con velocidades relativamente altas en las que la pérdida de carga es considerable.

En cuanto a las velocidades, a la hora de mínimo consumo se tiene lo siguiente, el 97 % de todas las tuberías no alcanzan velocidades con un máximo de 1 m/s, con lo cual es evidente que en general las pérdidas de carga en el sistema no son demasiado altas por parte de estos valores de velocidad, ver figura 24.

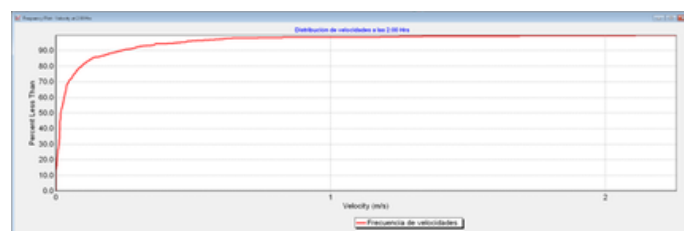


Figura 24. Velocidades en las tuberías del sistema a las 2:00 hrs.



Los valores de las velocidades en las diferentes tuberías, al igual que ocurría con los caudales no presentan una gran variación.

Al analizar el diagnóstico del funcionamiento de la red, lo más importante es el nivel de presiones. En este caso, va a estar ligado a las cotas del terreno. En la figura 25 se corresponde con el mapa de presiones de la red de distribución a la hora de mínimo consumo.

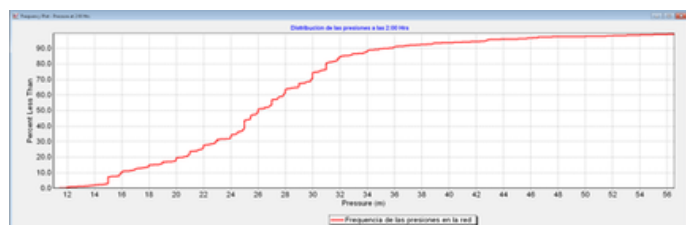


Figura 25. Variación de las presiones del sistema a las 2:00 hrs.

En general, los valores de presión en los nudos del modelo en hora de mayor consumo, se encuentran entre los 15 y 45 (m.c.a.), con lo que comprobamos la disparidad de presiones dependiendo de la zona de la red. El 50% de los nudos de consumo posee una presión de servicio en hora punta por debajo de los 26 (m.c.a.), encontrando un 10% de puntos con presiones inferiores a los 16 (m.c.a.), en horas de mínimo consumo.

A continuación, se muestran las presiones en los diferentes nudos de la red de distribución para las horas de máximo consumo la cual solo el 5% de las presiones está por debajo de los 15 (m.c.a.), como se muestra en la figura 26.

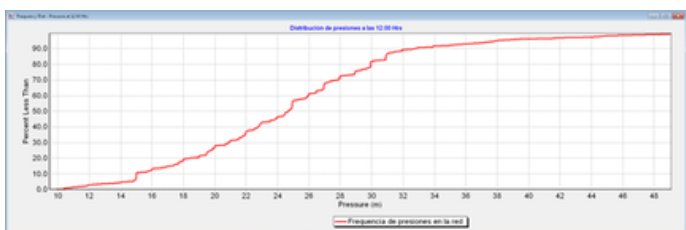


Figura 26. Variación de las presiones del sistema a las 12:00 hrs.

Como resultado de la propuesta de rehabilitación presentada, se concluye que existe una relación entre los altos niveles de presión que conlleva al aumento de fugas, en la red de distribución de agua potable, debido a diferentes factores, como las cotas que van de los 20 (m.c.a) a los 150 (m.c.a) o bien, la mala instalación de tuberías en las tomas clandestinas ocasionadas por los usuarios, que contempla el porcentaje de fuga analizado en el presente trabajo.

CONCLUSIONES

La red de distribución después de la sectorización ayudó a promover los análisis para la eficiencia de un sistema, ya que, en muchos sectores de Ciudad de México y no precisamente en el área de estudio, tienen el mismo problema. Así también, se hace énfasis a los objetivos que fueron alcanzados con un amplio factor de confiabilidad en el proceso del diagnóstico y resultados de la misma detectando las zonas de mayor presión.

El gasto medio-diario, así como el ahorro en el volumen de agua tuvieron una reducción en el consumo de las cuales fueron para los tanques.

- Tanque GM-10 una media de caudal inyectado en el día de 61.75 LPS - 53.77 (LPS) y un volumen total de 5,335.27 (m³) - 4,646.34 m³. (688.93 m³ 12.92 %)
- Tanque Candelaria No.3 una media de caudal inyectado en el día de 93.82 (LPS) - 84.24 (LPS) y un volumen total de 8,105.72 (m³) - 7,281.83 (m³). (823.89 m³ 10.16 %)
- Tanque GM-11 una media de caudal inyectado en el día de 153.94 (LPS) - 127.38 (LPS) y un volumen total de 13,300.13 (m³) - 11,006.06 (m³). (2,294.07 m³ 17.25 %)

Ahora bien, teniendo los resultados se deduce que:

- Las presiones no rebasan los 40 metros columna de agua (m.c.a.).
- Las zonas de presiones negativas ahora reciben la presión adecuada que van de los 15 a 35 (m.c.a.)
- Los consumos en la red son eficientes de acuerdo al recorrido del flujo.
- Las velocidades son las adecuadas que van del 1 a 2.5 (m/s).

Los sectores de la red se hicieron más entendibles, de como se presentó en un inicio, por lo que ahora con el nuevo diseño, cuenta con puntos claves en la zona para empezar, o bien, para proponer alternativas de solución a futuro. Comparando la evolución de la red sin el porcentaje de fugas, se implementó el modelo de calibración y se comprobó que la sectorización es adaptable para ambos problemas (red con fugas y sin fugas), puesto que estando la red en óptimas condiciones genera mayor presión el flujo en el recorrido de las tuberías.

El contenido final del presente trabajo de investigación, fueron una serie de graficas de cual nos hace más entendible el funcionamiento del sistema, así como el planteamiento del procedimiento numérico en el cual facilitó el diagnóstico de la red de distribución de agua potable en el área de estudio y hacer posible su rehabilitación en toda su estructura, optando por la formación de subsectores en la red. Algunos de los problemas en la elaboración de los trabajos se derivaron por la falta de los datos en el sistema, puesto que la red nunca ha contado con medidores, tampoco cuenta con un mantenimiento apropiado con las válvulas de seccionamiento, lo cual fueron ocasionando dudas a la hora de plantear las presiones máximas en zonas críticas de la red.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la comunidad de investigación del Instituto Politécnico Nacional (IPN), por el apoyo y las recomendaciones para culminar el presente tema de investigación, ya que, las facilidades en cuanto a los permisos y visitas a las instituciones pertinentes que contaban con la información, fueron las idóneas en todo el proceso de formación, en especial a la dependencia de Sistemas de agua de la ciudad de México (SACMEX Cuauhtec) representadas por el Ing. Mario Huerta, actual docente del IPN-ESIA-UZ del área de hidráulica, que nos brindó su apoyo en lo que respecta a la información requerida de la red.

REFERENCIAS

- [1] Sistema de Aguas de la Ciudad de México 2012.- "El gran reto del agua en la Ciudad de México". Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- [2] Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Comisión Nacional del Agua (2007). - "Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Agua Potable".
- [3] Grupo Multidisciplinario de Modelación de Fluidos 2005.- "EPANET 2, Manual del Usuario". Universidad Politécnica de Valencia. España.
- [4] SISTEMA DE AGUAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO (SACMEX) 2010, informe final del circuito 7, SACM, México.
- [5] José Antonio Gonzales Moreno, octubre de 2012. Introducción a las pruebas hidrostáticas.
- [6] Temario MADERO 2000 Delegación Gustavo A. Madero.
- [7] M. en I. Gerardo Toxky López Tesis 2012 LA SECTORIZACIÓN EN LA OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.
- [8] Peralta Moreno Jorge. REGULARIZACIÓN DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA ZONA NORTE DE CD. NETZAHUALCÓYOTL, EDO. MÉXICO. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- [9] Almandoz, J., Cabrera E., Arregui, F., Cabrera Jr. E. y Cobacho, R. (2005). "Leakage Assessment through Water Distribution Network Simulation". Journal of Water resources Planning and Management, 131(6), 458-466.
- [10] AWWA, American Water Works Association, (1990). Water audits and Leak Detection, M36. AWWA editorial, Denver, Colorado
- [11] Biehl, W. y Inman, J. (2010). "Energy optimization for water systems". Journal of AWWA. 102 (6), 50-55.
- [12] Boulos, P. y Bros, C. (2010). "Assessing the carbon footprint of water supply and distribution systems". Journal of AWWA. 102 (11), 47-54.



- [13] Cabrera, E., Pardo M. A. y Cobacho, R., 2011. "Agua, energía y eficiencia o el inaplazable reto de la sostenibilidad (I)". VII Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua "Ríos Ibéricos +10. Mirando al futuro tras 10 años de DMA". Talavera de la Reina 2011.
- [14] Cabrera, E., Pardo M. A., Cobacho, R. y Cabrera E. Jr., (2010). "Energy Audit of a water Distribution network". Journal of Water Resources Planning and Management ASCE, 136 (6), 669-677.
- [15] Guerequeta, A. y Vallecillo, A. (2004). Técnicas de Desarrollo de Algoritmos. 1ª edición. Capítulo 4 - páginas 10.
- [16] Lambert, A.O., Brown T.G., Takizawa M. y Weimer D. (1999). A Review of performance indicators for real losses from wáter supply systems. AQUA, Vol. 48 No 6.
- [17] Pardo, M.A., 2010. "Influencia de los costes del Agua y de la energía en la renovación de tuberías" Doctoral Thesis. Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/8426> (In Spanish).
- [18] Rossman, L.A. (2000). EPANET Version 2 Users Manual. US Environmental Protection Agency, Drinking Water Res. Div., Cincinnati.
- [19] Thornton, J. (2003). Managing Leakage by Managing Pressure. Water 21, October 2003.
- [20] Instituto de Ingeniería UNAM 2005.- Estudio de la problemática de las acciones de reducción de fugas en las redes de agua potable y propuesta para mejorar su eficiencia, Convenio de colaboración CNA-SGIHU,-GEP-001/2006, proyecto 5125, México.
- [21] Vaca Badillo, Isaac, 2004. - Investigación y Posgrado de la Ingeniería Hidráulica en México, Propuesta de Temas de Investigación e Indicadores, Tesis de grado, IPN Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, México.
- [22] Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) 2009. - Informe final de Sectorización, SACM, México.
- [23] Rossman, Lewis A. 2002. - EPANET 2 Manual de Usuario, Versión 2.0 vE, U.S. Environmental Protection Agency EPA-GMF, traducción del Grupo multidisciplinar de modelación de fluidos de la Universidad Politécnica de Valencia, USA.
- [24] Planeación, sistemas y control S.A. de C.V. 1996. - Trabajos de campo para la recopilación de información y encuestas para la cuantificación de caudales perdidos en las redes de agua potable del Distrito Federal. Departamento del Distrito Federal, Secretaría de Obras y Servicios, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, México.
- [25] Herrera, M. (2011a). Improving Water Networks Management by Efficient Division into Supply Clusters. PhD Thesis, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España.
- [26] Hastie, T., Tibshirani, R. and Friedman, J. (2009). Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction. New York: Springer-Verlag.
- [27] Handl, J., Knowles, J. and Kell, D. (2005). Computational Cluster Validation in Post-Genomic Data Analysis. Bioinformatics (21): 3201-3212.
- [28] Han, J. Kamber, M. y Pei, J. (2012). Data mining concepts and techniques. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [29] Han, J., Kamber, M. and Pei, J. (2006). Data Mining: Concepts and Techniques. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [30] Julian Thornton, Reinhard Sturm, George Kunkel, 2002. - P.E. Water Loss Control, Second Edition, Editorial Mc. Graw Hill. 2008.
- [31] Lambert, A.O., Fantozzi M. (2005). Recent advances in calculating Economic Intervention Frequency for active leakage control, and implications for calculation of economic leakage levels. Proceedings of IWA International Conference on Water Economics, Statistics and Finance, Cret, 2005.
- [32] Lambert, A.O. y Lalonde, A. (2005). "Using practical predictions of economic intervention frequency to calculate short-run economic leakage level, with or without pressure management." IWA Third International Conference on Water Loss Reduction. Leakage 2005. Halifax (Canada).
- [33] Thornton, J. & Lambert, A. (2005). Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships. Proceeding of IWA Specialised Conference 'Leakage 2005', Halifax, Nova Scotia, Canada.
- [34] Mateos De Vicente Manuel 2000. - Válvulas Reductoras de Presión, Clasificación, Descripción, Errores y Soluciones, Editorial BELLISCO, Colección Obras Hidráulicas. España.
- [35] J. Luis Alanís Legaspi 2015, Diseño de un sector de la red de distribución de agua potable del Distrito Federal. Proyecto 2 Trabajo de la especialidad en redes de agua potable. UNAM Universidad Nacional Autónoma de México.