

OBTENCIÓN DE ECUACIONES DE COSTO DE MOTORES Y REFRIGERADORES DE ABSORCIÓN CON BASE EN UNA REVISIÓN DE TECNOLOGÍAS ACTUALES

Macushoy Peinado X.A^{1*}, Ambriz-Díaz Víctor M.², Chacón Blanco Raul², Chávez Oscar², Y. Rosas Israel²

¹Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua

Maestría en Sistemas de Manufactura

Av. Tecnológico, 2909, C.P. 31310, Chihuahua, México.

Correspondencia*: sparkymacushoy5@gmail.com

²Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Av. Tecnológico, 2909, C.P. 31310, Chihuahua, México.

victor.ad@chihuahua.tecnm.mx; raul.cb@chihuahua.tecnm.mx; oscarl.cl@chihuahua.tecnm.mx;

israel.ry@chihuahua.tecnm.mx

RESUMEN

En este trabajo se desarrollan ecuaciones de costo para motores de combustión interna y refrigeradores de absorción, a partir de una revisión de catálogos de fabricantes y literatura científica reciente. La metodología se basa en una búsqueda exhaustiva de información sobre costos de inversión, tanto en fuentes científicas como en documentos comerciales. Una vez recopilados los datos, se aplican regresiones lineales mediante el método de mínimos cuadrados, con el objetivo de formular las ecuaciones de costo. Como resultado, se obtienen cuatro nuevas ecuaciones: dos correspondientes a motores y dos a refrigeradores. Para cada tecnología, se genera una ecuación a partir de datos científicos y otra a partir de información proporcionada por fabricantes. Estas nuevas ecuaciones permiten estimar los costos de inversión, sin necesidad de realizar cotizaciones detalladas, y ofrecen herramientas prácticas para la evaluación de proyectos que integren motores y sistemas de refrigeración por absorción.

Palabras clave: Revisión de tecnologías, motores de combustión interna, refrigeradores de absorción, ecuaciones de costo.

ABSTRACT

In this paper, cost equations for internal combustion engines and absorption refrigeration systems are developed based on a review of manufacturers' catalogs and recent scientific literature. The methodology is based on an exhaustive search for information on investment costs, both in scientific sources and in commercial documents. Once the data are collected, linear regressions using the least squares method are applied to formulate the cost equations. The result is four new equations: two corresponding to engines and two to refrigerators. For each technology, one equation is generated from scientific data and another from information provided by manufacturers. These new equations allow for estimating investment costs without the need for detailed quotations and offer practical tools for evaluating projects that integrate engines and absorption refrigeration systems.

Keywords: Technologies review, internal combustion engines, absorption refrigerators systems, cost equations.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los motores y los refrigeradores por absorción son de las tecnologías más utilizadas en los sistemas térmicos [1]. Sin embargo, el modelar los costos de estos sistemas aún sigue siendo un gran desafío. Comúnmente, el desarrollo de las ecuaciones de costo se basa en la recopilación de costos de tecnologías del mercado actual, considerando factores como costos unitarios, costos totales y potencia del equipo. Por ello, se emplean metodologías basadas en análisis tecno económicos [2]. En este aspecto las estrategias para modelar los costos de estas tecnologías es la utilización de análisis estadísticos y técnicas de regresión que permitan obtener las ecuaciones de los costos en función de datos y valores obtenidos, de la literatura de libre acceso y fichas técnicas proporcionadas por fabricantes [3]. Entre los desafíos a vencer se encuentra la recopilación de la información y la adecuada selección de la misma, debido a que la variabilidad de los costos del mercado puede introducir problemas en la precisión de los modelos planteados.

El contexto presentado anteriormente ha motivado a los autores de este trabajo a realizar una revisión de tecnologías actuales de motores de combustión interna y sistemas de refrigeración por absorción con el objetivo de obtener ecuaciones que permitan predecir el costo de estas tecnologías a diferentes capacidades nominales a las encontradas en el mercado actual. Por lo anterior, el aporte de esta investigación radica en la relevancia que pueden tener estas ecuaciones al ser utilizadas en modelos que predigan el desempeño termo-económico de estas tecnologías cuando se integran en sistemas industriales reales. Adicionalmente, con esta investigación se espera contribuir al desarrollo de herramientas que faciliten el diseño y selección de sistemas eficientes y económicamente viables.

2. DESCRIPCIÓN TEÓRICA DE LAS TECNOLOGÍAS

2.1 Motores de combustión interna

Los motores térmicos son herramientas diseñadas para convertir la energía térmica en trabajo mecánico mediante procesos de combustión o de intercambio de calor [4]. Los motores de combustión interna utilizan un combustible, el cual se quema dentro de la cámara de combustión para generar gases a alta presión que accionan un pistón, tal como denota el principio de operación del ciclo Otto o el ciclo Diésel, Fig. 1. El motor de combustión interna opera mediante un ciclo de cuatro fases; admisión de la mezcla aire-combustible, compresión, combustión con expansión de gases que generan trabajo, y escape de los gases.

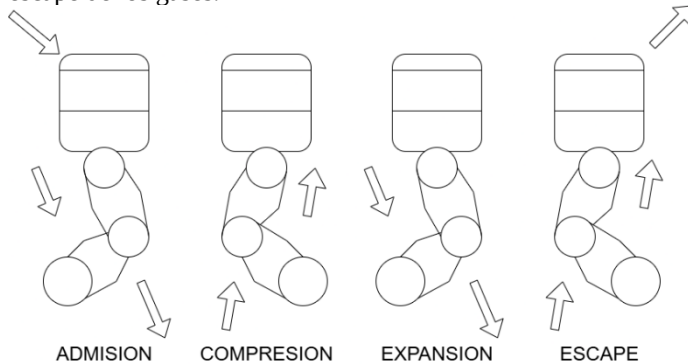


Fig. 1. Ejemplo de funcionamiento de un motor por combustión interna (Ciclo Otto).

La eficiencia de estos motores está influenciada por varios factores, como pueden ser la relación de compresión, el tipo de combustible y las pérdidas térmicas del proceso. Entre los combustibles más comunes se encuentran el diésel, el gas natural, la gasolina y el biogás. El gas natural es uno de los más utilizados actualmente debido a su bajo contenido de carbono, disponibilidad y facilidad de manejo en sistemas automatizados.

En cuanto a las pérdidas térmicas del proceso, la energía generada por un motor no es completamente útil. Normalmente de un 30% a un 45% de la energía del combustible se convierte en electricidad o trabajo útil, mientras que el resto se libera como calor en diferentes maneras hacia los alrededores: alrededor del 30% se libera en los gases de escape, de un 20% a 25% en el sistema de enfriamiento del bloque del motor y entre un 5 a 10% se libera al ambiente como pérdidas por radiación y fricción mecánica.

2.2 Refrigeradores de absorción

Un refrigerador por absorción es un sistema de enfriamiento que utiliza una fuente de calor para generar frío mediante un ciclo termodinámico con un par absorbente-refrigerante. Su funcionamiento se basa en la absorción de un gas refrigerante en un líquido absorbente. Normalmente, los pares de trabajo más utilizados a nivel industrial son el amoníaco-agua y el de bromuro de litio-agua [5]. En cuanto a la estructura

termodinámica, el proceso de enfriamiento se logra en un ciclo que incluye componentes como lo son un generador, un condensador, un evaporador y un absorbedor, como se muestra en la Fig. 2.

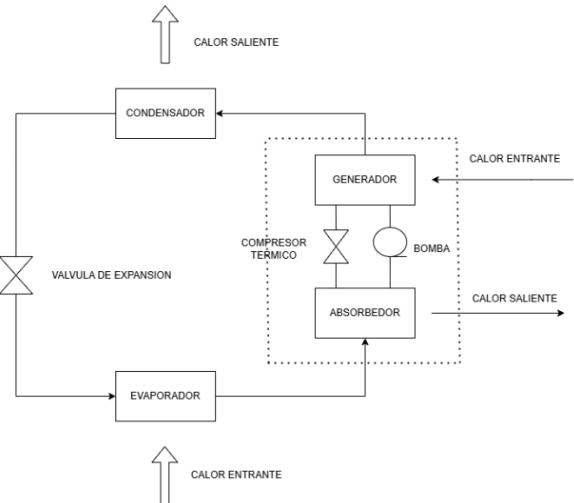


Fig. 2. Diseño común de un refrigerador simple efecto.

Por otra parte, la eficiencia de un sistema de refrigeración por absorción está determinada por la relación entre la cantidad de calor suministrada y la capacidad de enfriamiento generada, lo que los hace ideales para aplicaciones industriales. Sin embargo, su eficiencia y capacidad de enfriamiento también están directamente relacionadas con el tipo de refrigerador. Los refrigeradores por absorción se clasifican según el número de efectos; los más comunes son los de simple, doble y triple efecto. Sin embargo, el más utilizado en aplicaciones prácticas, por su simplicidad de diseño y menor número de componentes, es el sistema de simple efecto [6]. Por otra parte, las configuraciones de doble efecto pueden mejorar la eficiencia al incorporar dos generadores en serie o haciendo uso de otro sistema auxiliar, lo que permite mayores coeficientes de operación (COP). Finalmente, las configuraciones de triple efecto, maximizan la eficiencia en aplicaciones industriales donde se dispone de altas temperaturas.

3. Metodología

El punto de partida es la selección de tecnologías (motores y refrigeradores por absorción). Se continúa con la búsqueda y recopilación de datos en bases científicas y de fabricantes. La información se concentra y se aplican regresiones lineales para obtener ecuaciones de costo. Finalmente, se discuten los resultados Fig. 3.

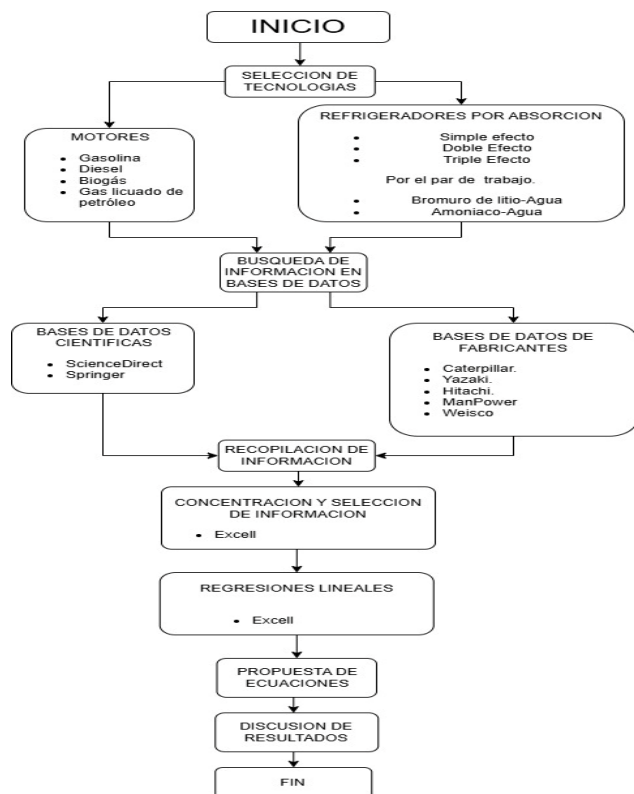


Fig. 3. Diagrama de la metodología de revisión.

3.1 Capacidades y fabricantes de las tecnologías

En el mercado actual existen una amplia variedad de motores térmicos y diversos sistemas de refrigeración por absorción, cuya capacidad es difiere dependiendo del uso final, ya sea residencial, comercial o industrial. Para motores de combustión interna se suelen tener capacidades desde 50 kW hasta más de 10 MW [7], comúnmente algunas marcas destacan sobre otras, estas suelen ser Caterpillar, Wärtsilä, y Jenbacher, las cuales tienen en sus catálogos diversas configuraciones de motores, donde se destaca el uso de combustibles como el gas natural y el diésel por tener buenas prestaciones energéticas, económicas y rendimientos termodinámicos adecuados [8]. Estos fabricantes buscan mejorar la tecnología de forma que priorizan la eficiencia energética y la reducción de emisiones, adaptándose a normativas ambientales cada vez más estrictas.

Por el otro lado, las capacidades en el mercado actual de los refrigeradores de absorción oscilan entre 10 kW y 1.5 MW. Sus aplicaciones varían desde edificios comerciales hasta procesos industriales, al igual que los motores [9]. Entre los fabricantes destacados se encuentran Yazaki, Thermax y Broad, quienes ofrecen sistemas capaces de operar con distintas fuentes térmicas, como podrían ser vapor, agua caliente, gases de combustión e incluso energía solar [10]. Actualmente, las

tecnologías comerciales en refrigeradores buscan buenas relaciones de refrigerante-absorbente, así como reducir el tamaño, costo y complejidad de los equipos [11].

3.2 Costos de tecnologías actuales

El análisis de costos de tecnologías actuales para motores térmicos y refrigeradores de absorción muestra una variabilidad significativa, que se debe a factores como el país, el tipo de combustible, los materiales de fabricación, el tamaño del equipo y los servicios postventa incluidos. En general, el costo específico de inversión para motores térmicos varía entre 300 y 2,000 USD/kW para sistemas de mediana y gran escala. Este costo incluye el equipo principal, sistema de control, sistemas auxiliares y costos de instalación. Las tecnologías más recientes, como los motores de alta eficiencia con control de emisiones, tienden a estar en un rango superior, incluso llegando algunos a 3,000 USD/kW.

Para los refrigeradores de absorción, los costos oscilan comúnmente entre 50 y 2000 USD/kW, dependiendo del tipo de ciclo, como podría ser simple efecto o de doble efecto, la fuente de energía térmica utilizada, y la complejidad del sistema. En particular, los sistemas de doble efecto presentan una mayor eficiencia, pero también un mayor costo de inversión [12]. La elección entre un sistema de simple o doble efecto suele depender del nivel de temperatura disponible en la fuente térmica y del retorno económico esperado [13].

3.3 Uso de regresiones lineales para obtención de ecuaciones de costo

Para obtener las ecuaciones de costo, se adapta el procedimiento implementado por Cao et al. [14]. Se aplican regresiones lineales mediante el método de mínimos cuadrados utilizando datos recopilados tanto de proveedores como de literatura científica y una herramienta de Excel. Este procedimiento estadístico es ampliamente utilizado en investigaciones previas debido a su simplicidad y efectividad para predecir costos en función de variables independientes, como la potencia nominal (kW) [15].

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Resultados de revisión de motores

La Tabla 1, presenta datos recopilados directamente de proveedores comerciales de motores de combustión interna. Se incluyen distintos modelos, combustibles, capacidades nominales y costos totales, lo que permite observar la diversidad de precios existentes en el mercado actual. Se puede apreciar que para las capacidades nominales presentadas (en el rango de 4.85 a 60 kW), que se tienen costos que varían desde 318.95 a 8,664 USD. Aunque se detectan desviaciones en los modelos más pequeños, la relación sigue una tendencia clara del comportamiento del mercado.

Tabla 1. Costos de motores de acuerdo con los fabricantes.

FABRICANTE	MODELO	COMBUSTIBLE	CAPACIDAD (kW)	COSTO (USD)
PowerCat	PCD195FE	Diésel	14.9	930.23
Mpower	2V78F-2	Gasolina	17.9	980.27
Mpower	C192FD	Diésel	12.68	874.92
Mpower	177bf-b	Gasolina	6.71	318.95
Nera	188FDE	Diésel	7	470.71
Nera	192FDE	Diésel	8	537.80
WCICHA	WP4B60E242	Diésel	60	8,664
GIMEX	GD170	Diésel	6.71	942.45
Weisco	22MOTOR-030FU	Diésel	7.2	1,191
Weisco	22MOTOR-022CH	Gasolina	6.7	445.66
Weisco	22MOTOR-021CH	Gasolina	4.85	223
Weisco	22MOTOR-023CH	Gasolina	9.69	482.36

La Tabla 2, compila costos sobre motores de combustión interna de diversas investigaciones. Se incluyen capacidades y costos totales reportados, lo cual proporciona un marco de comparación con respecto a los valores comerciales actuales. De acuerdo con estos hallazgos, los costos para capacidades nominales en el rango de 100 kW a 14,400 kW varían desde los 35,000 USD a 960,000 USD.

Tabla 2. Costos de motores de acuerdo con trabajos científicos.

REF.	AÑO	COMBUSTIBLE	CAPACIDAD (kW)	COSTO TOTAL USD
Haller et al. [16]	2017	Biogás	100	40,000
Salvador et al. [17]	2020	Gas natural	500	445,000
Mehdi et al. [18]	2015	Diésel	130	39,000
Lips et al. [19]	1981	Diésel	3000	960,000
Zedillo et al. [20]	2016	Diésel	500	283,200
Yaglı et al. [21]	2021	Biogás	1068	213,600
Amidpour et al. [22]	2016	Gas natural	200	198,434
Yu et al. [23]	2018	Gas natural	312	376,000

4.2 Resultados de revisión de refrigeradores por absorción

La Tabla 3, contiene datos de refrigeradores por absorción recopilados de varios fabricantes. Se presentan las capacidades, pares de trabajo, costos totales y modelos disponibles en el mercado actual. De acuerdo con los fabricantes de refrigeradores, el costo actual oscila entre 1,399 USD a 151,184 USD para capacidades nominales de 7.8 kW a 352 kW.

Tabla 3. Costos de refrigeradores por absorción de acuerdo con fabricantes.

FABRICANTE	MODELO	PAR DE TRABAJO	CAPACIDAD (kW)	COSTO TOTAL (USD)
Lanphan	DLSB -200-40	A	22.6	8,700
Taihe	Taihe6708	B	7.8	1,399
Bingshang	84186970	B	70	19,999
Hitachi	RCUA065AVSY	B	65	4,999
Yazaki	WFC SC5	B	17.6	36,751
Yazaki	WFC SC10	B	35.2	46,046
Yazaki	WFC SC20	B	70.3	59,070
Yazaki	WFC SC30	B	105	68,398
Yazaki	WFC SC50	B	175	96,404
Yazaki	WFC m100	B	352	151,184

Par de trabajo: A – Amoniaco-Agua; B – Bromuro de litio-Agua

La Tabla 4, resume información obtenida de estudios económicos relacionados con refrigeradores por absorción. La información recopilada indica costos de hasta 119,400 USD, y diversas capacidades de enfriamiento en el rango de 6 kW a 350 kW. Esto representa una tendencia coherente con los valores observados en el mercado comercial de la Tabla 3, pero generalmente más acotada.

Tabla 4. Costos de refrigeradores por absorción de acuerdo con trabajos científicos.

REF.	AÑO	TIPO DE SISTEMA	PAR DE TRABAJO	CAPACIDAD (kW)	COSTO TOTAL USD
Abdullah et al. [24]	2016	Simple efecto	B	6	2,437
Arabkoohsar y Andresen [25]	2017	Simple efecto	B	350	98,100
Machado et al. [26]	2022	Doble efecto	B	174	14,286
Narayanan et al. [27]	2021	Simple efecto	B	8.9	3,607
Ehyaei et al. [28]	2020	Simple efecto	B	10	3,044
Suamir [29]	2014	Simple efecto	B	17.6	12,144
Jakob [30]	2015	Simple efecto	B	17.6	28,082
Camara et al. [31]	2023	Doble efecto	B	30.66	47,124
Martínez et al. [32]	2020	Simple efecto	B	35	45,616
Li et al. [33]	2021	Simple efecto	B	100	119,400
Bruckner et al. [34]	2014	Simple efecto	B	100	88,000

Par de trabajo: B – Bromuro de litio-Agua

4.3 Ecuaciones de costos

4.3.1 Motores de combustión interna

La Fig. 4, muestra la relación entre la capacidad nominal y el costo total de motores de combustión interna, a partir de datos proporcionados por fabricantes comerciales, con el objetivo de establecer una ecuación que permita predecir su costo. En dicha figura se compilan valores que abarcan capacidades desde 6.7

kW hasta 60 kW, con precios que oscilan entre 318 USD y 8,665 USD. Para mejorar la precisión de la estimación, se descartaron valores atípicos. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.914$ indica un ajuste satisfactorio del modelo lineal a los datos comerciales, proporcionando un nivel razonable de precisión en la predicción de precios.

$$y[\text{USD}] = 59.87 \cdot \dot{W}[\text{kW}] - 3.3875 \quad (1)$$

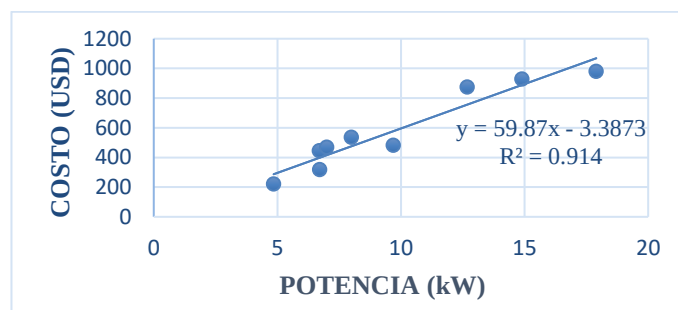


Fig. 4. Obtención de ecuación de costo de motores por fabricantes.

La Fig. 5, muestra la regresión lineal obtenida a partir de datos extraídos de literatura científica para motores de combustión interna. Al igual que con los proveedores, se relaciona la potencia con el costo total reportado en diferentes estudios. Esta ecuación refleja casos reales aplicados en distintos escenarios. Con un R^2 de 0.754, se observa que los costos tienden a seguir una relación proporcional respecto a la potencia instalada. Los casos documentados abarcan desde 100 kW hasta 14,400 kW.

$$y[\text{USD}] = 868.46 \cdot \dot{W}[\text{kW}] - 31736 \quad (2)$$

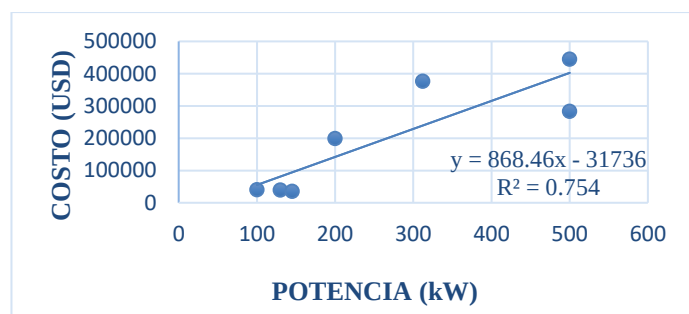


Fig. 5. Obtención de ecuación de costo de motores por casos de estudio.

4.3.2 Refrigeradores por efecto de absorción

La Fig. 6, muestra la relación entre la capacidad de enfriamiento y el costo total de refrigeradores por absorción, basada en información proporcionada por fabricantes comerciales. La

regresión obtenida permite estimar el costo de adquisición de sistemas con distintas capacidades de enfriamiento, a partir de una base de datos representativa del mercado actual. Los datos considerados abarcan capacidades entre 7.8 kW y 352 kW, con precios que van desde 1,399 USD hasta 151,000 USD. El modelo de ajuste presenta un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9953$, lo que indica un nivel de precisión muy alto en la estimación del costo.

$$y[\text{USD}] = 367.52 \cdot \dot{W}[\text{kW}] + 31704 \quad (3)$$

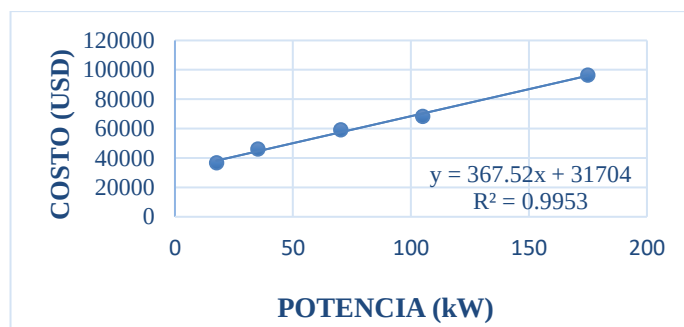


Fig. 6. Obtención de ecuación de costo de refrigeradores por fabricantes.

La Fig. 7, presenta los resultados de la regresión lineal aplicada a diversos casos de estudio sobre refrigeradores por absorción. En este análisis se establece una relación entre el costo total reportado y la capacidad del sistema, considerando equipos con capacidades que oscilan entre 6 kW y 100 kW. El modelo de regresión arroja un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9312$, lo que proporciona una base confiable para estimar los costos sin requerir contacto directo con los fabricantes.

$$y[\text{USD}] = 1068.4 \cdot \dot{W}[\text{kW}] - 98.809 \quad (4)$$

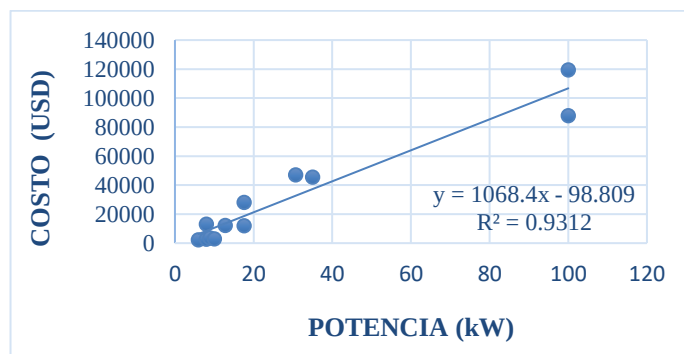


Fig. 7. Obtención de ecuación de costo de refrigeradores por absorción por casos de estudio.

4.4 Discusión complementaria

Los resultados muestran que las ecuaciones de costo presentan distintos niveles de ajuste según la fuente de información empleada. Por ejemplo, mientras que los refrigeradores basados en datos comerciales alcanzan un coeficiente de determinación muy alto ($R^2 = 0.9953$), los motores obtenidos de literatura científica presentan un valor menor ($R^2 = 0.754$). Esta diferencia refleja la variabilidad de los datos recopilados y la dispersión asociada a cada fuente. En este sentido, la confiabilidad de las ecuaciones debe considerarse en función de los rangos de potencia analizados, siendo más robustas cuando se aplican dentro de los límites observados en las bases de datos originales.

Asimismo, se identifican diferencias entre las ecuaciones obtenidas de información comercial y aquellas derivadas de estudios científicos. Estas divergencias responden a que los datos comerciales representan directamente el mercado disponible, mientras que los datos científicos suelen responder a estudios de caso con condiciones particulares. Por lo tanto, se recomienda que, en aplicaciones industriales o de diseño cercano al mercado, se utilicen preferentemente las ecuaciones basadas en catálogos de fabricantes, mientras que las derivadas de literatura científica pueden ser útiles como referencia en análisis exploratorios o comparativos.

Finalmente, es importante señalar que los costos recopilados provienen de distintos fabricantes y trabajos desarrollados en diferentes regiones y años. Aspectos como inflación, normativas locales, logística o disponibilidad tecnológica pueden influir en los valores obtenidos. Por esta razón, las ecuaciones propuestas deben considerarse como una referencia inicial, que puede requerir ajustes adicionales al aplicarse en contextos geográficos o temporales distintos a los aquí analizados.

5. CONCLUSIONES

Las ecuaciones de costo obtenidas confirman que la potencia nominal describe con fiabilidad la inversión requerida para motores y refrigeradores en sistemas térmicos. Las ecuaciones obtenidas alcanzan coeficientes de determinación en el rango de 0.754 y 0.9953. Esta coherencia estadística permite estimar los costos de inversión de motores y refrigeradores de absorción en un rango confiable sin depender de cotizaciones formales, acortando la fase de prefactibilidad y despejando recursos para análisis técnicos más profundos. Además, la cobertura de capacidades desde equipos pequeños hasta escalas industriales hace que las ecuaciones sirvan tanto a proyectos piloto como a plantas de gran tamaño, facilitando la comparación de alternativas tecnológicas bajo restricciones de costo, espacio y eficiencia. En síntesis, el estudio transforma datos dispersos en una guía directa que respalda decisiones tempranas, sólidas y fundamentadas en la evaluación de proyectos.

6. REFERENCIAS

- [1] H. Pourpasha, Y. Mohammadfam, L. Khani, M. Mohammadpourfard, and S. Zeinali Heris, "Thermodynamic and thermoeconomic analyses of a new dual-loop organic Rankine – Generator absorber heat exchanger power and cooling cogeneration system," *Energy Convers Manag*, vol. 224, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113356.
- [2] J. I. Yoon, K. H. Choi, C. G. Moon, Y. J. Kim, and O. K. Kwon, "A study on the advanced performance of an absorption heater/chiller with a solution preheater using waste gas," *Appl Therm Eng*, vol. 23, no. 6, pp. 757–767, Apr. 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(03)00003-6.
- [3] F. Samimi, T. Marzoughi, and M. R. Rahimpour, "Energy and exergy analysis and optimization of biomass gasification process for hydrogen production (based on air, steam and air/steam gasifying agents)," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 58, pp. 33185–33197, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.131.
- [4] M. Sheykhi, M. Chahartaghi, M. M. Balakheli, S. M. Hashemian, S. M. Miri, and N. Rafiee, "Performance investigation of a combined heat and power system with internal and external combustion engines," *Energy Convers Manag*, vol. 185, pp. 291–303, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.01.116.
- [5] A. T. Rêgo, S. M. Hanriot, A. F. Oliveira, P. Brito, and T. F. U. Rêgo, "Automotive exhaust gas flow control for an ammonia-water absorption refrigeration system," *Appl Therm Eng*, vol. 64, no. 1–2, pp. 101–107, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.018.
- [6] Y. Gong, L. Yang, Z. Lu, L. Wang, and H. Li, "Thermodynamic performance assessment of ammonia/ionic liquid based half-effect absorption refrigeration cycle," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 25, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.100924.
- [7] A. D. Zare, R. K. Saray, S. Mirmasoumi, and K. Bahlouli, "Optimization strategies for mixing ratio of biogas and natural gas co-firing in a cogeneration of heat and power cycle," *Energy*, vol. 181, pp. 635–644, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.182.
- [8] Y. Hao *et al.*, "Chemical characterisation of PM 2.5 emitted from motor vehicles powered by diesel, gasoline, natural gas and methanol fuel," *Science of the Total Environment*, vol. 674, pp. 128–139, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.410.
- [9] A. Rodríguez-Toscano, C. Amaris, A. Sagastume-Gutiérrez, and M. Bourouis, "Technical, environmental, and economic evaluation of a solar/gas driven absorption chiller for shopping malls in the Caribbean region of Colombia," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 30, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.csite.2021.101743.
- [10] N. I. Ibrahim, F. A. Al-Sulaiman, and F. N. Ani, "A detailed parametric study of a solar driven double-effect absorption chiller under various solar radiation data," *J*

- Clean Prod*, vol. 251, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119750.
- [11] K. L. Cézar *et al.*, "Development of a novel flow control system with arduino microcontroller embedded in double effect absorption chillers using the LiBr/H₂O pair," *International Journal of Refrigeration*, vol. 111, pp. 124–135, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.11.014.
- [12] W. Galiotto, S. Kr. Verma, and A. Z. Mendiburu, "Double effect and double stage absorption refrigeration cycle thermodynamic study," *International Journal of Thermofluids*, p. 101203, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.ijft.2025.101203.
- [13] L. Garousi Farshi and S. Asadi, "Ammonia lithium nitrate and ammonia sodium thiocyanate double effect absorption refrigeration systems: Thermodynamic analysis," *Appl Therm Eng*, vol. 138, pp. 374–385, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.079.
- [14] T. Cao, H. Lee, Y. Hwang, R. Radermacher, and H. H. Chun, "Performance investigation of engine waste heat powered absorption cycle cooling system for shipboard applications," *Appl Therm Eng*, vol. 90, pp. 820–830, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.07.070.
- [15] S. F. Mussati, S. S. Mansouri, K. V. Gernaey, T. Morosuk, and M. C. Mussati, "Model-based cost optimization of double-effect water-lithium bromide absorption refrigeration systems," *Processes*, vol. 7, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.3390/pr7010050.
- [16] J. Haller and T. Link, "Thermodynamic concept for an efficient zero-emission combustion of hydrogen and oxygen in stationary internal combustion engines with high power density," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 44, pp. 27374–27387, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.168.
- [17] N. Le Brun, M. Simpson, S. Acha, N. Shah, and C. N. Markides, "Techno-economic potential of low-temperature, jacket-water heat recovery from stationary internal combustion engines with organic Rankine cycles: A cross-sector food-retail study," *Appl Energy*, vol. 274, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115260.
- [18] M. Aliehyaei, F. Atabi, M. Khorshidvand, and M. A. Rosen, "Exergy, economic and environmental analysis for simple and combined heat and power IC engines," *Sustainability*, vol. 7, no. 4, pp. 4411–4424, 2015, doi: 10.3390/su7044411.
- [19] J. A. G. K. J. L. H.I.Lips, "Environmental assessment of combustion modification controls for stationary internal combustion engines," *EPA*, vol. 7, pp. 1–143, Jul. 1981.
- [20] D. Cedillos Alvarado, S. Acha, N. Shah, and C. N. Markides, "A Technology Selection and Operation (TSO) optimisation model for distributed energy systems: Mathematical formulation and case study," *Appl Energy*, vol. 180, pp. 491–503, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.08.013.
- [21] H. Yağlı, Y. Koç, Ö. Köse, A. Koç, and R. Yumrutaş, "Optimisation of simple and regenerative organic Rankine cycles using jacket water of an internal combustion engine fuelled with biogas produced from agricultural waste," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 155, pp. 17–31, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.psep.2021.08.035.
- [22] M. Salimi and M. Amidpour, "Modeling, simulation, parametric study and economic assessment of reciprocating internal combustion engine integrated with multi-effect desalination unit," *Energy Convers Manag*, vol. 138, pp. 299–311, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.01.080.
- [23] J. Zhang, S. Cao, L. Yu, and Y. Zhou, "Comparison of combined cooling, heating and power (CCHP) systems with different cooling modes based on energetic, environmental and economic criteria," *Energy Convers Manag*, vol. 160, pp. 60–73, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.01.019.
- [24] G. F. Abdullah, W. Saman, D. Whaley, and M. Belusko, "Optimization of Standalone Solar Heat Fired Absorption Chiller for Typical Australian Homes," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2016, pp. 692–701. doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.232.
- [25] A. Arabkoohsar and G. B. Andresen, "A smart combination of a solar assisted absorption chiller and a power productive gas expansion unit for cogeneration of power and cooling," *Renew Energy*, vol. 115, pp. 489–500, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.08.069.
- [26] D. O. Machado *et al.*, "Split-range control for improved operation of solar absorption cooling plants," *Renew Energy*, vol. 192, pp. 361–372, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.04.064.
- [27] R. Narayanan, G. K. Harilal, and S. Golder, "Feasibility study on the solar absorption cooling system for a residential complex in the Australian subtropical region," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 27, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101202.
- [28] M. A. Ehyaei, A. Ahmadi, M. El Haj Assad, and M. A. Rosen, "Investigation of an integrated system combining an Organic Rankine Cycle and absorption chiller driven by geothermal energy: Energy, exergy, and economic analyses and optimization," *J Clean Prod*, vol. 258, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120780.
- [29] I. N. Suamir, "Solar driven absorption chiller for medium temperature food refrigeration, a study for application in Indonesia," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014, pp. 167–172. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.493.167.
- [30] U. Jakob, "IEA Solar Heating and cooling program task 48," Berlin, Jun. 2015.

- [31] S. Camara, A. B. Sulin, and S. Coulibaly, "Design and performance study of a double-acting collector-assisted absorption cooling system in a hot region," *Cleaner Energy Systems*, vol. 7, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.cles.2023.100099.
- [32] P. J. Martínez, P. Martínez, V. M. Soto, L. A. Bujedo, and J. Rodríguez, "Design of a 35 kW solar cooling demonstration facility for a hotel in Spain," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 2, Jan. 2020, doi: 10.3390/app10020496.
- [33] Y. Z. , L. Y. , Z. S. Li H., "Economic optimisation of single-effect LiBr/H₂O absorption chillers driven by low-grade heat," *Appl Energy*, vol. 285, no. 116450, 2021.
- [34] L. S. , M. L. , R. M. , C. L. F. , L. E. , Brückner S., "Industrial waste-heat driven absorption chillers: potential, cost and barriers," *Appl Energy*, vol. 151, pp. 157–167, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.147.