



Modelos de regresión y diseño de línea base para indicadores energéticos en una empresa siderúrgica

Regression models and baseline design for energy indicators in a steel company

Carlos Torres Navarro¹; Nelson Malta Callegari²; Hugo Jara Olave¹

¹Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.

²Universidade Norte do Paraná. Ponta Grossa, Brasil.

*Autor de correspondencia: ctorres@ubiobio.cl

Recibido: 9 de septiembre de 2020

Aprobado: 28 de enero de 2021

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional 

RESUMEN/ ABSTRACT

El objetivo de esta investigación fue encontrar modelos de regresión para cuatro indicadores de desempeño energético en una empresa siderúrgica de Chile y proponer una línea base para cada uno de ellos. El enfoque metodológico consideró la utilización de la técnica de diseño experimental especificado por el usuario del software Statgraphics, utilización del análisis de varianza y obtención de ecuaciones de regresión. Los resultados permiten obtener ecuaciones de regresión para los indicadores energéticos e identificación de variables estadísticamente significativas en cada modelo, además, propuestas de líneas base para apoyar el control y seguimiento. Las conclusiones indican que las ecuaciones de regresión presentan una correlación aceptable, superiores al 77%. La utilización del análisis de varianzas es una técnica efectiva para identificar variables significativas para los indicadores de desempeño energético y que las líneas base proporcionan una ayuda para monitorear los indicadores de desempeño energéticos en una empresa siderúrgica con mayor certeza.

Palabras clave: indicadores de desempeño energético, empresa siderúrgica, línea base, regresión lineal.

The objective of this research was to find regression models for four energy performance indicators for a steel company in Chile and propose a baseline for each of them. The methodological approach considered the use of the experimental design technique specified by the user of Statgraphics software, use of variance analysis and obtaining regression equations. The results allow obtaining regression equations for the energy indicators and identification of statistically significant variables in each model, in addition, proposals for baselines to support control and monitoring. The conclusions indicate that the regression equations have an acceptable correlation, greater than 77%. The use of the analysis of variances is an effective technique to identify significant variables for the indicators of energy performance and that the baselines provide an aid to monitor the energy performance indicators in a steel company with greater certainty.

Keywords: base line, energy performance indicators, linear regression, steel company.

INTRODUCCIÓN

El consumo de energía es un tema de relevancia en el ámbito industrial porque este aumenta la productividad industrial y generalmente tiene un peso relevante en los costos operacionales de las empresas. El consumo energético también es relevante en la industria del acero porque sus altos hornos son una fuente de alto consumo energético presentando un desafío para administrar con mayor eficiencia los recursos energéticos que implica la producción de acero [1].

Cómo citar este artículo:

Carlos Torres Navarro, *et al.* Modelos de regresión y diseño de línea base para indicadores energéticos en una empresa siderúrgica. 2021, vol. 42, n. 1, enero/abril. ISSN:1815-5901.

Sitio de la revista: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>

Este hecho induce a las empresas, y en particular a la Compañía Siderúrgica de Huachipato, de Chile, conocer y monitorear de manera más eficaz la evolución de sus índices de desempeño energético (IDE) de modo de mejorar su productividad y reducir las emisiones de CO₂. El origen de esta investigación nace ante la necesidad de reducir la incertidumbre en los resultados que se obtienen de los indicadores energéticos de una planta de productos de acero, además, que en su Departamento de Medio Ambiente y Energía no se dispone de un mecanismo eficaz para establecer una línea base confiable en sus principales indicadores energéticos. La disponibilidad de una línea base también es una exigencia para las empresas que deciden implementar la norma ISO 50001, como es el caso de la empresa bajo análisis [2, 3].

En relación con la implementación de la norma ISO 50001, en Aimee et al. (2017) se indica que una gestión energética basada en la implementación de esta norma, al año 2030, se lograría un ahorro del 50% en el consumo global de energía en los sectores industrial y servicios junto a una disminución de 6500 millones de toneladas métricas de emisiones de CO₂[4].

En Jovanovic et al (2016) se concluye que la adopción de estándares, como ISO 50001, contribuye a aumentar la eficiencia energética en al menos de un 20% en diferentes industrias manufactureras y que, de manera similar, los programas de gestión de energía pueden facilitar una reducción de los costos de energía de hasta un 20% [5]. En esta misma línea, en Pelsler et al. (2018) se afirma que en plantas sudafricanas se ha logrado reducir en un 25% los costos energéticos al implementar ISO 50001, y en Yücel y Halis (2016) se reconoce el aporte de esta norma energética porque ofrece una guía para que las empresas puedan medir su desempeño energético con más precisión [6, 7].

El propósito de un sistema de gestión de la energía es facilitar a las organizaciones para que puedan establecer los sistemas y procesos necesarios de modo de mejorar el rendimiento energético, incluyendo la eficiencia energética, su uso y su consumo [8]. En este sentido, la norma ISO 50001 es un sistema de gestión de energía que ha ido aumentando su aplicación en empresas en forma sostenida a partir del año 2011, por ejemplo, en el año 2011 se registraron 461 empresa certificadas en esta norma, y en el año 2018, esa cifra aumentó a 46.770 [9]. En AChEE (2014) se plantea la relevancia de considerar la eficiencia energética en la etapa de diseño en los proyectos de inversión, explicando que “El beneficio económico de realizar un diseño energético en etapas iniciales de un proyecto puede ser hasta tres veces mayor al que se puede obtener cuando esto se realiza en la etapa de operación del proyecto”[10].

Los indicadores, en general, permiten mejorar el proceso de toma de decisiones en cualquier organización, y de modo particular los indicadores de desempeño energético permiten conocer resultados energéticos facilitando actividades de seguimiento, monitoreo y control en procesos, en áreas o equipos industriales para facilitar su comparación con sus respectivas líneas base[11, 12].

Según se indica en Carretero y García (2012) una característica que deberían reunir los indicadores de desempeño energético (IDE) es que éstos no solo se relacionan con variables de producción, sino que también con otras variables, tales como: tipo de energía (eléctrica, térmica, renovable, etc.), tonelada de producto final, producción de subproductos intermedios, por fases de procesos, instalaciones, equipos y/o por número de empleados [13].

En Miño et al. (2018) se resalta la necesidad de disponer de información de consumos de energía a nivel de áreas de trabajo y de máquinas permitiendo obtener información con un mayor grado de detalle [14].

En Quental, Neves y Vivalta (2015) se indica que “la industria siderúrgica es uno de los sectores donde se consume mayor cantidad de energía, siendo responsable por la generación de productos resultantes de procesos con un alto valor energético agregado”. Además, en la norma ISO 50001 se exige que las empresas deban establecer, entre otros, una línea base de energía y la necesidad de identificar indicadores de desempeño energéticos adecuados para realizar un seguimiento y medición eficaz [2, 15].

La línea base es un punto de referencia necesario para monitorear los resultados de los índices energéticos que haya definido una organización y tienen como objetivo identificar las eficiencias en los consumos, su diseño debe considerar variables que expliquen eficazmente el comportamiento de un indicador energético relevante. En este contexto, la utilización de modelos de regresión es habitual como medio para representar líneas base de indicadores energéticos con fines de administración [16, 17].

Siguiendo en la misma línea, en Serna (2010) se afirma que “la administración energética empresarial es una buena estrategia para lograr controlar los consumos energéticos que se requieren para un determinado proceso, disminuir pérdidas técnicas en el sistema de distribución de energía eléctrica, obtener una mayor eficiencia en sistemas térmicos como calderas y quemadores, disminuir pérdidas en la fuerza motriz y en la iluminación, alcanzar diseños eficientes en sistemas de bombeos, etc.”[18].

Un indicador estadístico usualmente recurrido para determinar la calidad de un modelo de regresión el coeficiente de determinación (r^2) el cual debe ser igual o superior a 0,75. Una buena correlación en una comprobación estadística que indica que el resultado de un modelo se fundamenta en variables que evidencian una causalidad aceptable [19]. En Gutiérrez y De la Vara (2008) se afirma que el ajuste de un modelo es “mejor” entre más cerca esté r^2 de 1.0. En particular, r^2 mide la proporción de la variabilidad en los datos que es explicada por el modelo de regresión. En general, para fines de predicción este autor recomienda un coeficiente de determinación ajustado de al menos 0.7 [20].

Entre la amplia variedad de modelos de regresión que presenta la literatura estadística los modelos bi-variados son útiles porque permiten visualizar y comparar en forma gráfica resultados de indicadores con sus respectivas líneas base. Por otra parte, los modelos multivariados permiten construir expresiones matemáticas que incluyen una mayor cantidad de variables independientes siendo posible distinguir, a través de los análisis de varianza, aquellas variables o factores que efectivamente demuestran mayor significancia y poder reconocer eventuales interacciones significativas entre variables que no es posible reconocerlas cuando se utilizan solo modelos bi-variados.

En el ámbito de la gestión energética, autores como Castrillon, González y Quispe (2013) y Crespo et al. (2018) utilizan análisis de regresión simple para diseñar una línea base energética para los indicadores de consumo de energía total y desempeño global de la empresa, sin embargo, al asociarse únicamente con una variable producción, la bondad de ajuste de los datos resulta ser deficiente en base a la interpretación de sus coeficientes de determinación [21, 22].

En Cañizares et al. (2014) se discute la eficacia de utilizar solo el enfoque bivariado para encontrar relaciones satisfactorias entre consumo de energía y producción, debido a que efectivamente los consumos pueden estar influenciados por otras variables o factores, tales como: la disposición de un transformador que pudiese estar sobredimensionado, la existencia de un insuficiente aislamiento en tuberías de oxígeno, la inexistencia de controladores en diferentes líneas de producción o la influencia en el consumo energético debido a factores administrativos [23].

De modo que la naturaleza de esta investigación es de tipo correlacional con enfoque cuantitativo y, el objeto de investigación, es proponer una metodología para generar una línea base para un grupo de indicadores energéticos en una planta siderúrgica para apoyar el proceso de toma de decisiones en su Departamento de Medio Ambiente y Energía.

El objetivo principal de esta investigación es encontrar modelos de regresión que contengan variables estadísticamente significativas para cuatro indicadores de desempeño energético y proponer una línea base para cada uno de ellos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de campo se realizó en una industria elaboradora de productos de acero ubicada en la Región del Bio-Bío, Chile (Compañía Siderúrgica de Huachipato). Los datos fueron recopilados en el Departamento de Medio Ambiente y Energía y, en su Departamento de Estudios. La muestra consideró los datos disponibles en la base de datos de la empresa considerando un dato diario durante tres meses consecutivos en periodo de verano. La revisión bibliográfica incluyó la revisión de bases de datos con acceso *online*, tales como *Scielo* y *Dialnet*, además, de libros de análisis de regresión y la norma ISO 50001.

Se definieron cuatro indicadores energéticos relevantes asociados a tres procesos productivos en la empresa y, además, un índice global de procesos. Los indicadores fueron los siguientes:

- 1) Consumo Bombas de Agua [kWh/km³ de agua bombeada]
- 2) Compresión en Planta de Oxígeno [kWh/Toneladas de oxígeno producido]
- 3) Tasa de Combustible en Altos Hornos [kg combustible/Toneladas de Arrabio producido]
- 4) Índice Global de Procesos [Gcal/Toneladas de acero líquido]

Para estos indicadores se identificaron, en primer lugar, las variables independientes que indicaban ser las variables más apropiadas para explicar su efecto en cada variable de respuesta, y en segundo lugar, se realizaron análisis de varianza y análisis de bondad de ajuste a través del indicador el r^2 ajustado porque es más efectivo que el índice de determinación r^2 debido a que el r^2 ajustado penaliza la inclusión de variables explicativas no significativas en el modelo de regresión [24].

El análisis de los datos se hizo utilizando el software Statgraphics V.18 © y la opción de diseño de cribado denominada *diseño especificado por el usuario* dada la facilidad que ofrece esta técnica de diseño experimental para obtener informes tabulares y gráficos.

Específicamente esta técnica permite realizar análisis estadísticos de datos históricos de variables relevantes de procesos de producción generando tablas de análisis de varianza, gráficos de Pareto estandarizados, gráficos de efectos principales y de interacciones, entre otros, para facilitar el análisis e interpretación de resultados.

RESULTADOS

En las tablas de la 1 a la 4, se presentan los resultados del análisis de varianza para los indicadores de desempeño energético: Consumo Bombas de Agua (IDE BOMBAS), Compresión en Planta de Oxígeno (IDE OXIGENO), Tasa de Combustible en Altos Hornos (IDE COMBUSTIBLE) e Índice Global de Procesos (IDE GLOBAL). Además, en cada caso se presentan las ecuaciones de regresión e índices de regresión ajustado respectivos (r^2 ajustado).

Las tablas de análisis de varianza son métodos propios de los diseños experimentales, permiten saber si realmente existe una relación de dependencia entre las variables objeto de estudio y permiten conocer la significancia estadística de los factores involucrados en cada índice de desempeño energético.

Tabla 1: Análisis de varianza para IDE BOMBAS

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Estación	8726,99	1	8726,99	30,93	<0,0001
B:Caudal	2988,25	1	2988,25	10,59	0,0034
C:Agua	11165,30	1	11165,30	39,57	< 0,0001
Error total	6771,71	24	282,15		
Total (corr.)	33611,90	27			

Nota: Estación: (+1) indica verano, (-1) indica invierno; Caudal: Caudal medio mensual de agua; Agua: Total agua bombeada.

El modelo ajustado, se indica en la ecuación (1), y su r^2 ajustado fue 77.3%.

$$IDEBOMBAS = 400,885 + 21,2431 \cdot Estacion - 0,031052 \cdot Caudal - 0,0543559 \cdot Agua \quad (1)$$

Tabla 2: Análisis de varianza para IDE OXIGENO

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:GOXP2	2098,89	1	2098,89	8,03	0,0106
B:PotenciaP2	1304,34	1	1304,34	4,99	0,0377
C:GOXP3	19727,80	1	19727,80	75,46	< 0,0001
Error total	4967,26	19	261,44		
Total (corr.)	37368,70	22			

Nota: GOXP2: Producción Oxígeno Gas en Planta 2; GOXP3: Producción Oxígeno Gas en Planta 3; Potencia P2: Porcentaje de Operación de la Planta 2.

El modelo ajustado, se indica en la ecuación (2), y su r^2 ajustado fue 84,6 %.

$$IDEOXIXENO = 762,6780 - 0,0242 \cdot GOXP2 + 380,6760 \cdot PotenciaP2 - 0,0539 \cdot GOXP3 \quad (2)$$

Tabla 3: Análisis de varianza para IDE COMBUSTIBLE

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:ARRABIO	30,9206	1	30,9206	4,42	0,0490
C:CUARZO	29,6248	1	29,6248	4,24	0,0535
F:RazonCoquecillo	8,87861	1	8,87861	1,27	0,2737
G:RazonAlquitran	2,42931	1	2,42931	0,35	0,5624
AF	4,18909	1	4,18909	0,60	0,4483
AG	12,3885	1	12,3885	1,77	0,1988
CF	7,78964	1	7,78964	1,11	0,3043
CG	1,42396	1	1,42396	0,20	0,6568
FG	12,8221	1	12,8221	1,83	0,1915
Error total	132,788	19	6,98887		
Total (corr.)	895,473	34			

Nota: ARRABIO: Producción de arrabio; CUARZO: Carga de cuarzo en alto Horno; Razon Coquecillo: Cociente entre cargas de coquecillo y coque; Razón Alquitrán: Cociente entre cargas de alquitrán y coque; AF, AG: Interacciones entre Arrabio y razones de coquecillo y alquitrán; CF y CG: Interacciones entre Cuarzo y razones de coquecillo y alquitrán; FG: Interacción entre coquecillo y alquitrán.

El modelo ajustado, se indica en la ecuación (3), y su r^2 ajustado fue 73.5 %.

$$\begin{aligned}
 IDECOMBUSTIBLE = & 1051,82 - 0,0139 \cdot ARRABIO + 0,0875 \cdot CALIZA + 0,0697 \cdot CUARZO \\
 & - 0,0149 \cdot SumaMineral - 0,0073 \cdot SumaPellet + 1281,64 \cdot RazonCoquecillo \\
 & - 6264,21 \cdot RazonAlquitran + 0,0221 \cdot ARRABIO \cdot RazonCoquecillo + \\
 & 0,2232 \cdot ARRABIO \cdot RazonAlquitran - 2,763 \cdot CUARZO \cdot RazonCOquecillo \\
 & - 9,54881 \cdot CUARZO \cdot RazonAlquitran - 17995,8 \cdot RazonCoquecillo \cdot RazonAlquitran
 \end{aligned} \tag{3}$$

Tabla 4: Análisis de varianza parapara IDE GLOBAL

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Acero	3,57	1	3,57	239,78	< 0,0001
B:Carbon	0,32	1	0,32	21,64	< 0,0001
C:ArrabioAH1	1,09	1	1,09	73,66	< 0,0001
D:ArrabioAH2	1,30	1	1,30	87,31	< 0,0001
E:Oxigeno	0,25	1	0,25	16,62	0,0002
F:Palanquillas	0,15	1	0,15	10,04	0,0027
Error total	0,70	47	0,01		
Total (corr.)	13,62	53			

Nota: Descripción de variables; Acero: Producción de acero líquido; Carbón: Consumo de carbón; Arrabio AH1/AH2: Producción de arrabio en Alto Horno 1 y 2 respectivamente; Oxígeno: Producción Total de Oxígeno; Palanquillas: Carga de Palanquillas en Laminadores.

El modelo ajustado, se indica en la ecuación (4), y su r^2 ajustado fue 94,2 %.

$$\begin{aligned}
 IDEGLOBAL = & 7,21308 - 0,0001 \cdot Acero + 0,0001 \cdot Carbon + 0,0001 \cdot ArrabioAH1 \\
 & + 0,0001 \cdot ArrabioAH2 + 0,0001 \cdot Oxigeno + 0,0001 \cdot Palanquillas
 \end{aligned} \tag{4}$$

En las **figuras 1** (a, b, c y d), se presentan los resultados en forma comparativa de los cuatro Índices de Desempeño Energéticos cotejando los valores observados y estimados en un periodo de 24 meses. Similar método de comparación se utiliza en Lindberg (2015) donde también se utilizan indicadores de desempeño energético para mejorar la eficiencia de una caldera industrial [25].

En la **figura 2**, se presentan los gráficos de los efectos principales asociados a cada uno de los cuatro indicadores de desempeño energético, de modo de examinar las diferencias entre las medias de nivel de cada factor (eje de abscisa) y su influencia sobre cada IDE. Cuando la línea es horizontal (paralela al eje de abscisa), entonces no hay efecto principal. En este caso, cada nivel del factor (alto o bajo) afecta la respuesta de la misma manera y la media de respuesta es la misma para todos los niveles de los factores. Por el contrario, cuando la línea no es horizontal, entonces hay un efecto principal. En esta situación, los diferentes niveles del factor afectan la respuesta de manera diferente. Mientras más inclinada sea la pendiente de la línea, mayor será la magnitud del efecto principal [26].

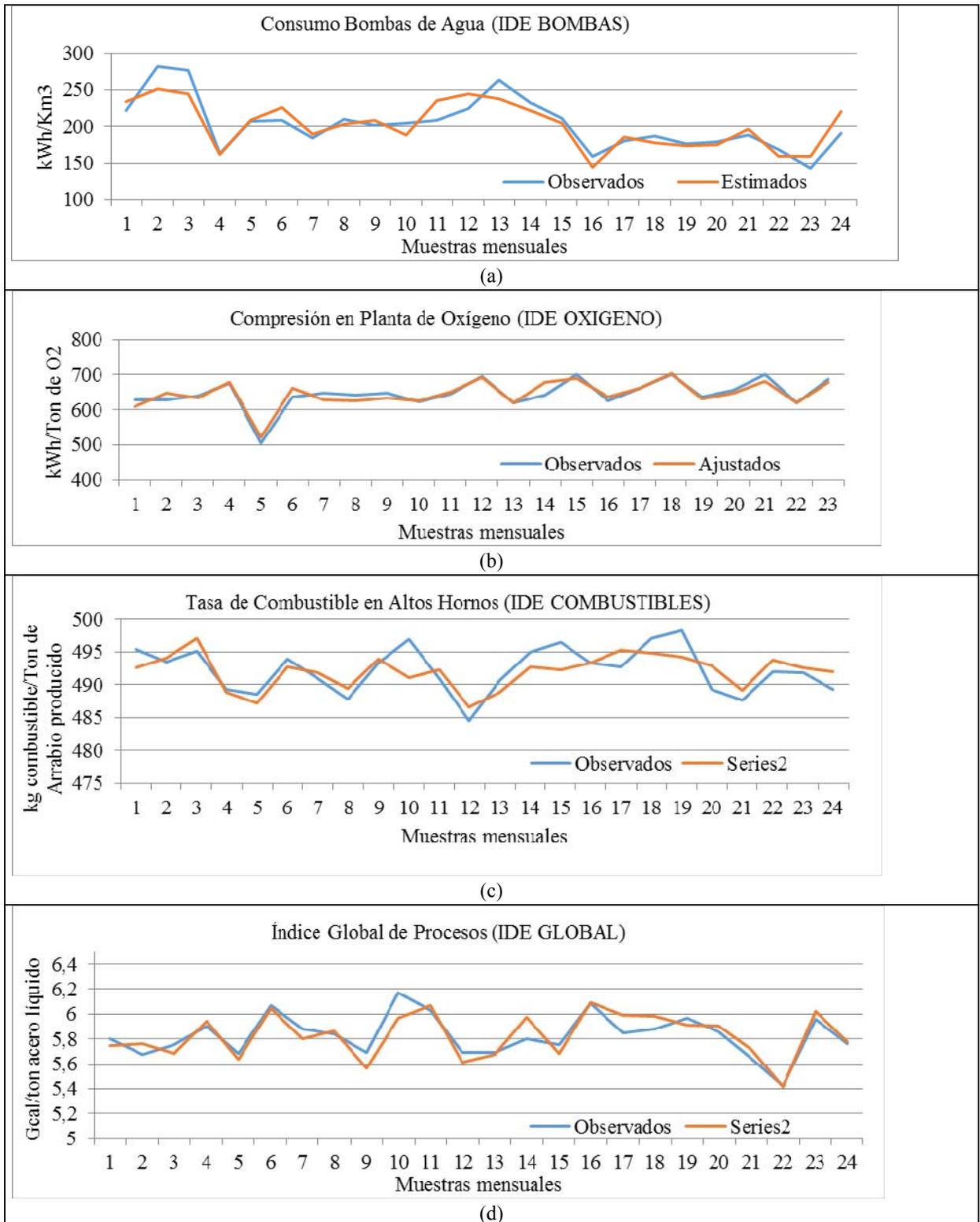


Fig.1. Comparación entre valores observados y estimados para índices bajo estudio.

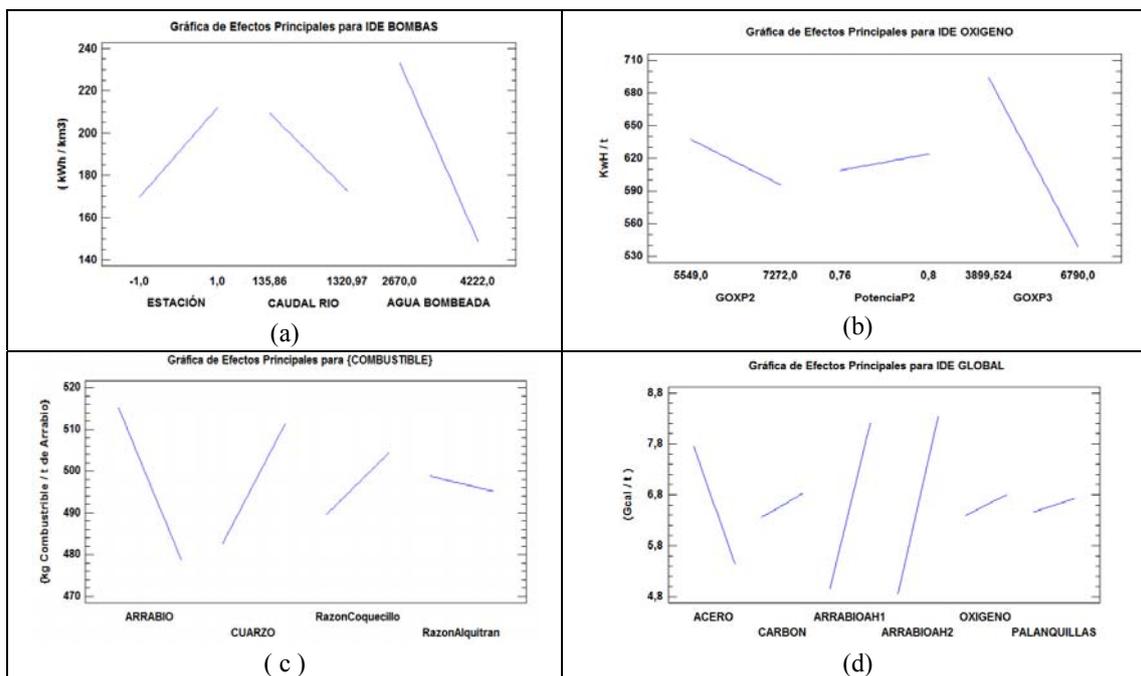


Fig. 2. Gráficos de efectos principales para cuatro IDE

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los principales resultados consisten en la obtención de ecuaciones de regresión para estimar índices de desempeño energético en una empresa siderúrgica, una metodología para representar líneas base para cuatro indicadores energéticos y una metodología para identificar factores productivos significativos respecto de cada indicador energético (valor-P inferior a $\alpha = 0,05$).

Para el caso del indicador Consumo Bombas de Agua (IDE BOMBAS), se determinó que la época de verano, el caudal del río Bío-Bío y el agua bombeada son los factores que más influyen en el rendimiento de este indicador.

Para el indicador Compresión en Planta de Oxígeno (IDE OXIGENO), la potencia de la Planta 2 y las producciones de oxígeno de dos de sus plantas son los únicos factores que afectaría el rendimiento del indicador.

Para el caso del indicador Tasa de combustible en Altos Hornos (TASA COMBUSTIBLE), los factores relacionados con la producción de Arrabio, consumo de cuarzo, razón entre coquecillo y alquitrán son los factores que resultan ser estadísticamente significativos, y que los eventuales efectos de interacción entre los factores anteriores no presentaron una significancia estadística significativa.

En forma análoga, los factores significativos sobre el índice Global de procesos (IDE GLOBAL) son: producción de acero, carbón, arrabio en altos horno N° 1 y 2, producción de oxígeno y palanquillas.

Por otra parte, se considera que los cuatro modelos ajustados son aceptables debido a que sus índices de determinación (r^2) están entre 77,3 y 94,2% lo que permite utilizar los modelos de regresión ajustados de manera confiable, y además, conocer de manera más objetiva, a través de los gráficos de efectos principales, el real comportamiento de los valores promedios de los factores y su influencia sobre cada uno de los resultados de los cuatro indicadores de desempeño energético. Este hecho ofrece la posibilidad de mejorar el proceso de toma de decisiones sobre gestión energética en el Departamento de Medio Ambiente y Energía al disponer de nueva información que permite hacer inferencias estadísticas fundamentadas en beneficio de la productividad de la empresa.

En relación con el aporte de los gráficos de línea, donde se comparan valores observados y estimados para los cuatro indicadores energético, se puede observar que las variaciones al utilizar los modelos de regresión arrojan variaciones iguales o inferiores a 0,5%, en circunstancia que la variación actual exhibida en planta siderúrgica fluctúa entre -5,9% y +6,7% (tabla 5), logrando con ello disponer de una metodología para monitorear una línea base de IDE de manera más confiable y con menor incertidumbre. Sin embargo, en Lindberg *et al.* (2015) se lograron variaciones menores a 0,5% (entre 0,31 y 0,35%) [25].

Tabla 5: Contraste de desviaciones de los IDE

Nº	Indicador de desempeño energético (IDE)	Variación situación actual	Variación según modelo
1	Impulsión en bombas de Agua	-5,9%	0,5%
2	Producción de Oxígeno	6,7%	0,1%
3	Tasa de combustible en Altos Hornos	1,2%	<0,1%
4	Global de Procesos	3,7%	<0,1%

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de esta investigación, son las siguientes:

- La utilización de la opción diseño definido por el usuario disponible en el software Statgraphics V.18 © y que permite trabajar directamente con los datos muestrales es efectiva permitiendo obtener cuatro ecuaciones de regresión múltiple con índices de determinación superiores a 77%.
- La utilización del análisis de varianza permitió conocer los factores que son estadísticamente significativos en el resultado de cuatro indicadores de desempeño energético generando información adicional con respaldo estadístico que permitiría mejorar el proceso de toma de decisiones en una planta siderúrgica.
- Los modelos de regresión obtenidos para los cuatro indicadores de desempeño energético permitirían reducir en el futuro la variación de los resultados de indicadores energéticos al disponer de una línea base que permitiría comparar resultados observados y estimados con mayor facilidad.
- La obtención de gráficos de efectos principales en el contexto de cada uno de los cuatro indicadores energéticos permite conocer con mayor claridad la influencia que cada factor tiene sobre el resultado de un indicador energético.

REFERENCIAS

- [1] GRIFFIN, P. y Hammond, G. “Industrial energy use and carbon emissions reduction in the iron and steel sector: A UK perspective”. *Applied Energy*. 2019, vol. 249, n.1, p. 109-125. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919308098>
- [2] ISO. Energy management systems. Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization. ISO 50001:2018. Génova, Suiza. 2018a. [Consultado el 16 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:50001:ed-2:v1:en>
- [3] KANNEGANTI, H. *et al.* “Specification of energy assessment methodologies to satisfy ISO 50001”. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2017, vol. 23, p. 121–135. ISSN 2213-1388. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2017.09.003>
- [4] MK Aimee. *et al.* “Predicting the quantifiable impacts of ISO 50001 on climate change. Mitigation”. *Energy Policy*. 2017, vol 107, p. 278–288. ISSN 0301-4215. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421517302744?via%3Dihub>
- [5] B. Jovanovi. y Filipovi, J. “ISO 50001 standard-based energy management maturity model e proposal and validation in industry”. *Journal of Cleaner Production*. 2016, vol. 112, p. 2744-2755. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.023>
- [6] PELSNER, W. *et al.* “Results and prospects of applying an ISO 50001 based reporting system on a cement plant”. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol 198, p 642-653. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.071>
- [7] YÜCEL, M. y Hali, M. “ISO 50001 based integrated energy management system and organization performance”. *Journal of Advances in Technology and Engineering Research*, 2016. vol 2, n.2, p. 59-65. ISSN: 2414-4592. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.20474/jater-2.2.5>
- [8] DÍAZ, J. M. “Sistema de Gestión de la Energía en una Planta de Ácido Sulfúrico”. Trabajo de fin de grado. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2017. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: http://oa.upm.es/47830/1/TFG_JOSE_MARIA_DIAZ_VELAZQUEZ.pdf
- [9] ISO. Certification & Conformity. The ISO survey. 2018b. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://isotc.iso.org/livelink/livelink?func=ll&objId=18808772&objAction=browse&viewType=1>
- [10] AChEE. Guía Metodológica de Eficiencia Energética en Proyectos de Inversión . Agencia Chilena de Eficiencia Energética, 2014. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <http://old.acee.cl/sites/default/files/noticias/documentos/Gu%C3%ADa%20Metodol%C3%B3gica%20de%20Eficiencia%20Energ%C3%A9tica%20en%20Proyectos%20de%20Inversi%C3%B3n.PDF>

- [11] GUAYANLEMA, V. Fernández, L. y Arias, K. “Análisis de indicadores de desempeño energético en Ecuador”. Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe. 2017. vol. 1 n. 2. ISSN 2631-2522. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <http://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/27>
- [12] PRIAS, O. y Campos, J. C. “Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía”. Guía con base en la norma ISO 50001. 2013. Bogotá: Programa Estratégico Nacional Sistemas de Gestión Integral de la Energía. ISBN 978-958-761-597-5. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjaqrJ5OTuAhUlwlkKHSX1D0kQFjABegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fopen.unido.org%2Fapi%2Fdocuments%2F4676845%2Fdownload%2FGu%25C3%25ADa%2520Pr%25C3%25A1ctica%2520para%2520la%2520Implementaci%25C3%25B3n%2520de%2520un%2520Sistema%2520de%2520Gesti%25C3%25B3n%2520de%2520la%2520Energ%25C3%25ADa&usg=AOvVaw1uJkujsRrOZw-cVCYNMc1p>
- [13] MATERÁN, M. “Eficiencia energética en refinerías de petróleo”. Una mirada a los esfuerzos y acciones llevadas a cabo por la industria de la refinación a nivel internacional y regional. Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe. 2018. vol. 2 n. 2. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <http://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/49>
- [14] MIÑO, G. *et al.* “Diagnóstico energético de la empresa TEIMSA basado en la norma ISO 50001”. Revista Industrial Data. 2018, vol 21, n.1, p. 43-52. ISSN: 1560-9146. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81658059007>
- [15] QUENTAL, E., Neves, F. y Vivalta, G. “Impact assessment of intermediate processes of steelmaking in electricity cogeneration of steel mill companies”. Ingeniería Mecánica. 2015. vol 18. n. 3, p. 158-165. ISSN: 1815-5944, 158-165 [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225141593003>
- [16] CORREA, J. *et al.* “Diseño y aplicación de un procedimiento para la planificación energética según la NC-ISO 50001:2011”. Ingeniería Energética, 2014, vol. 35, n. 1, p. 38-47, enero/abril. ISSN 1815 – 5901 [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329129814005>
- [17] RUIZ, J., *et al.* “Hacia la eficiencia energética en una empresa manufacturera del sector electrónico: Una propuesta metodológica”. Produção em Foco. 2016. vol. 6, n. 1, p. 139-162. ISSN 2237-5163. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/299421285_Hacia_la_eficiencia_energetica_en_una_empresa_manufacturera_del_sector_electronico_Una_propuesta_metodologica
- [18] SERNA, C. A. “Gestión energética empresarial una metodología para la reducción de consumo de energía”. Producción + Limpia. 2010. vol 5, n.2, p. 107-126. ISSN-e 1909-0455, 107-126. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3875716>
- [19] PAT, L. *et al.* “Introducción a los Modelos de Regresión. Publisher: Plaza y Valdés”. 2013. p. 257, ISBN 607402644. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Lucio_Pat/publication/258048735_Introduccion_a_los_Modelos_de_Regresion/links/0deec526c79cdf13e8000000/Introduccion-a-los-Modelos-de-Regresion.pdf
- [20] FERRARES, M. y Fernández, M. “Diseño de Experimentos y Análisis de Varianza. España”. Ed. Andavira. 2015, p. 162. ISBN 9788484087984. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://www.tcmetrologia.com/blog/disenio-de-experimentos/>
- [21] VALENCIA-Rodríguez, Orlando, *et al.* “Metodología para el Modelado de algunos Aspectos Asociados a la Sostenibilidad Empresarial y su Aplicación en una Empresa Manufacturera”. Información tecnológica. 2019. vol 30, n. 4, p. 103-126. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000400103>
- [22] CRESPO, G. *et al.* “La Gestión Energética en la Fabricación de Piensos Balanceados en Cienfuegos”. Revista Científica de la Universidad de Cienfuegos, 2018. vol. 11, n. 1, p. 249-256. ISSN: 2218-3620. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202019000100249
- [23] CAÑIZARES, G. *et al.* “La gestión energética y su impacto en el sector industrial de la provincia de Villa Clara, Cuba”. Revista Tecnología Química. 2014, vol. 34, n. 1, p. 11-23. ISSN 2224-6185. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852014000100002
- [24] QUEZADA, N. “Estadística Para Ingenieros”. 2018. Ed. Macro Eirl. México. ISBN13 9786123045630. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://www.freelibros.me/ingenieria/estadistica-para-ingenieros-nel-quezada-lucio>

- [25] L. Zhu, C. *et al.* “Key performance indicators for manufacturing operations management in the process industry”. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). 2017, p. 969-973. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8290036>
- [26] TRINDADE, S. *et al.* "Surface and subsurface alterations induced by hard turning of AISI 52100 bearing steel". Journal of Engineering Science and Technology. 2018. vol 13, n. 9, p. 2765 – 2778. [Consultado el 7 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://doaj.org/article/d601f53a8acf41ecb07b13488a8cea22>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Carlos Torres Navarro: <https://orcid.org/0000-0002-6065-2006>

Diseño de la investigación, revisión de avances, análisis de resultados, revisión crítica de la organización del trabajo. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Nelson Malta Callegari: <https://orcid.org/0000-0003-4609-3794>

Verificación de modelos, revisión crítica de los avances del trabajo, apoyo en uso de software estadístico. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Hugo Jara Olave: <https://orcid.org/0000-0002-1381-6813>

Diseño inicial de la investigación, recopilación de datos de campo, entrevistas con personal involucrado, uso de software estadístico. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.