Modelo de regresión para la estimación de consumo de combustible. Caso de estudio: Lavandería de prendas de vestir

Regression model for estimating fuel consumption. Case Study: Clothing Laundry

Eduardo Vargas Cano

<https://doi.org/10.54139/riiant.v8i31.594>

Palabras clave: regresión lineal, consumo de combustible, estimación de costos

Key words: linear regression, fuel consumption, cost estimation

RESUMEN

La presente investigación muestra el uso de la regresión lineal múltiple para explicar el consumo diario en litros de combustible que se suministra a una caldera durante el proceso de lavado, secado y planchado de prendas de vestir fabricadas en tela tipo Denim. Para ello, se usaron los registros de producción de 113 días correspondiente a un semestre continuo de trabajo. Se encontró que el consumo de combustible del equipo generador de vapor se puede modelar a partir de dos variables de producción: cantidad de prendas lavadas (y secadas) y las horas de funcionamiento de la caldera. El modelo, significativo al 1%, tiene un coeficiente de determinación ajustado de 99,28% indicando que por cada prenda lavada y por cada hora de funcionamiento de la caldera se consumen 0,03007 y 22,77615 litros de gasoil, respectivamente. Además, se usó un modelo de regresión sin constante, ya que en términos prácticos la constante no tiene interpretación alguna en la situación de estudio. Conocer el comportamiento de esta variable, permitiría a los planificadores tanto de producción como de finanzas establecer estrategias para garantizar el suministro de este material indirecto al proceso una vez determinado el Plan de Producción general de la empresa y los Programas de Producción para cada uno de los centros de trabajo.

ABSTRACT

This research shows the use of multiple linear regression to explain the daily consumption in liters of fuel that is supplied to a boiler during the process of washing, drying and ironing clothing made of Denim type fabric. For this, production records of 113 days corresponding to a continuous semester of work were used. It was found that the fuel consumption of the steam generating equipment can be modeled from two production variables: number of clothes washed (and dried) and the hours of boiler operation. The model, significant at 1%, has an adjusted coefficient of determination of 99.28% indicating that for each garment washed and for each hour of boiler operation, 0.03007 and 22.77615 liters of diesel are consumed, respectively. Furthermore, a regression model without a constant was used, since in practical terms the constant has no interpretation in the study situation. Knowing the behavior of this variable would allow both production and finance planners to establish strategies to guarantee the supply of this indirect material to the process once the company's general Production Plan and the Production Programs for each of the processes have been determined. work centers.

INTRODUCCIÓN

La sociedad humana se ha desarrollado basándose fundamentalmente en el aprovechamiento de las fuentes energéticas primarias presente en la naturaleza. La dependencia con respecto al uso de combustibles fósiles ha generado dos tipos de preocupaciones: por un lado, los impactos ambientales asociados y, en especial, sus efectos en el cambio climático; por otro, la limitación de reservas y su futuro agotamiento. Las dos preocupaciones han dominado en diferentes momentos históricos generando iniciativas de reducción de emisiones para los países con mayor generación de dióxido de carbono (Guardela, 2020; Salaet y Roca, 2010). Por otra parte, el consumo de energía es un tema de relevancia en el ámbito industrial porque este aumenta la productividad y generalmente tiene un peso relevante en los costos operacionales de las empresas (Torres et al., 2021). Este hecho induce a las empresas a conocer y monitorear eficazmente la evolución de sus indicadores de consumo energético.

Las crisis económicas implican regularmente un cambio estructural en las economías, provocando dentro de las organizaciones, y específicamente en la empresa caso de estudio, iniciativas de mejoras para la reducción de costos, acentuando el esfuerzo en la reducción de los costos por consumo de combustible buscando mejorar la eficiencia de sus equipos consumidores. Para darle una solución satisfactoria a la situación, se recurre al uso de la modelación

matemática, para encontrar, dentro del proceso, variables de producción como cantidad de prendas procesadas en los centros de trabajo y/o el tiempo de uso de los equipos, que permitan explicar el consumo de combustible tipo diesels (también conocido como gasóleo o gasoil) para luego poder modelarlo y controlarlo. Conocer la estructura de costos permite inclusive ajustar los precios de venta y ser más competitivos en el mercado sin desmejorar la rentabilidad del negocio. Por ello, la modelización matemática es entonces una herramienta clave dentro del proceso de resolución de problemas contextualizados en la que se elabora un modelo matemático para describir el fenómeno real estudiado (Aymerich & Albarracín, 2022), así pues, los modelos de estimación se transforman en sistemas que representan relaciones causales y su diseño requiere de la toma de decisiones relativa a los métodos de estimación, es decir, al orden, a la secuencia y al procedimiento.

En este caso de estudio, el objetivo es estimar parámetros de un modelo que explica el consumo diario en litros de combustible (diésel, también conocido como gasóleo o gasoil) que se suministra a una caldera tipo paquete, monobloque, de tubos de humo, durante el lavado, secado y planchado de prendas de vestir fabricadas en tela tipo Denim.

Para encontrar un modelo que explique el consumo de litros de combustible, luego de realizar un análisis exploratorio de los datos, se hizo uso de la Regresión Lineal

Múltiple ya que se visualizó que las variables explicativas se asociaban de forma lineal con el consumo diario de combustible, y, según Astorga (2014), es la Regresión Lineal es ampliamente usada en la ingeniería ya que sirve para analizar el comportamiento de las variables de entrada (o regresoras) y salida (o respuesta) estableciendo predicciones y estimaciones. Este modelo se ajusta entonces a lo que se quiere lograr: la estimación de parámetros, que en parte, permitan a la Planificación tanto de Producción como Financiera, estimar consumos y costo de material. Además, en el ámbito de la gestión energética, se ha utilizado el análisis de regresión para modelar desde indicadores de eficiencia como variables de consumo, tales son los casos presentados en los estudios realizados por Torres et al. (2021), Pico et al. (2019), Valencia et al. (2019),

Crespo et al. (2018). En otras áreas de la ingeniería y la producción es común observar estudios que se fundamentan en el análisis de regresión, tales como los realizados por Rodríguez et al. (2023), Palominos-Rizzo et al. (2022), Naranjo et al. (2021), Morantes et al. (2019), Puente et al. (2015), y, Lago (2007), entre otros.

Tomando en cuenta que se quiere un modelo simple, sencillo, de fácil interpretación, y de uso posterior para tareas de planificación y estimación de costos, no se plantea el uso de modelos jerárquicos. Pico et al. (2019) realiza un estudio similar para estimar los parámetros energéticos de desempeño, indicando en el mismo una metodología para estimar éstos por técnicas de regresión, identificando la unidad de estudio, el proceso, las variables de decisión, el modelo, y por último las estimaciones.

METODOLOGÍA

Este estudio se llevó a cabo en una Lavandería Industrial de prendas de vestir en tela tipo Denim, la cual usa una Caldera para generar el vapor que a través de tuberías llega hasta los equipos de lavado, secado y planchado. El combustible que usa la Caldera es del tipo Gasoil. El proceso de producción está conformado por tres centros de trabajo de volumen bajo, donde se ejecutan las tareas de Lavado y Secado, Manualidades y Sandblasting, y Planchado. Los centros de trabajo que hacen uso indirecto del combustible (gasoil) son los que tienen por objeto el lavado/secado de la prenda y el planchado,

ya que para ambas tareas es necesario usar el vapor generado por la Caldera. La duración del estudio fue de 6 meses, donde se pudo analizar la data de 113 días de producción.

Para estimar el consumo de combustible, en litros, se planteó el modelo lineal:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (1)$$

Donde:

y : Consumo diario de combustible, en litros.

x_1 : Cantidad de prendas lavadas, en un día.

x_2 : Cantidad de prendas planchadas, en un día.

x_3 : Horas de funcionamiento de la caldera/ día.

Dado que para el punto $(x_1, x_2, x_3) = (0, 0, 0)$, y más específicamente $x_3 = 0$, no se tendría

consumo de combustible, el modelo planteado queda de la siguiente manera:

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (2)$$

Usando herramientas de cálculo, se determinaron modelos de regresión múltiple utilizando los siguientes métodos: Introducir (ENTER, procedimiento para la selección de variables en el que todas las variables se introducen en un solo paso.), Escalonado (STEPWISE, que realiza la selección de las variables al agregar o eliminar predictores del modelo existente con base en la prueba F), Eliminar (REMOVE, procedimiento para la selección de variables en el que las variables se eliminan en un solo paso), Hacia atrás (BACKWARD, la eliminación hacia atrás comienza con el modelo que contiene todos los términos y luego elimina los términos, uno a la vez, utilizando el mismo método que el procedimiento escalonado. Ninguna variable se puede volver a ingresar en el modelo) y Hacia adelante (FORWARD, la selección hacia adelante agrega variables al modelo utilizando el mismo método que el procedimiento escalonado. Una vez agregada, una variable nunca se elimina),

RESULTADOS

Realizados los procedimientos para selección de variables, para modelos con regresión en el origen, en la Tabla 1 se muestra un resumen de las bondades de ajustes para los diferentes subconjuntos, entendiendo bondad de ajuste como el grado de acoplamiento que existe entre los

incluyendo un procedimiento resumen con la evaluación de los mejores subconjuntos. Con el propósito de obtener un modelo en específico, seleccionando aquel modelo con mayor Coeficiente de Determinación (R^2); seguido, se evaluó la significancia global y parcial, además de las pruebas de significancia de la regresión para determinar si estadísticamente hay una relación lineal entre el consumo diario de combustible y las variables regresoras x_1 , x_2 , x_3 . Este procedimiento suele considerarse como una prueba general o global de la adecuación del modelo. La hipótesis nula para este contraste corresponde a $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$, planteando como hipótesis alternativa el hecho de que al menos un β_j sea distinto de cero para $j = 1, 2, 3$. Luego, se hacen las pruebas sobre los coeficientes individuales de regresión (Mendenhall et al., 2023; Montgomery & Runger, 2020). Una vez estimados los parámetros del modelo, se realizaron las pruebas para verificar el cumplimiento de los supuestos asociados a los errores aleatorios, ya que éstos deben ser independientes y normalmente distribuidos con $E(\varepsilon_i) = 0$ y una varianza $\text{Var}(\varepsilon_i) = \sigma^2$.

datos originales y los valores teóricos que se obtienen de la regresión. Obviamente cuanto mejor sea el ajuste, más útil será la regresión a la pretensión de obtener los valores de la variable regresando a partir de la información sobre la variable regresora. Los cálculos fueron realizados con R, versión 4.2.2, (2022-10-31 ucrt).

Tabla 1. Regresión de los mejores subconjuntos: y vs. x_1, x_2, x_3

Vars	R ²	R ² (ajust)	R ² (pred.)	Cp de Mallows	S	X ₁	X ₂	X ₃
1	77.7	77.5	76.6	16.4	39.406			X
1	35.2	34.6	31.6	255.3	67.151	X		
2	80.2	79.9	78.8	4.1	37.247	X		X
2	78.8	78.4	77.3	12.2	38.582		X	X
3	80.6	80.1	78.8	4.0	37.068	X	X	X

En esta caso, el modelo con las variables x_1 y x_3 , y el modelo que incluye todas las variables, son los que tienen un menor valor de Cp de Mallows, lo que indica que estos modelos son relativamente precisos (tienen una varianza pequeña) para estimar los coeficientes de regresión verdaderos y pronosticar futuras respuestas.

El modelo con el menor Cp de Mallows, que considera las tres variables, tiene un R²ajustado de 99,28%; sin embargo, al realizar las pruebas de significancia al 1%, la variable x_2 es no significativa, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. ANOVA para el modelo de regresión considerando las tres variables

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	F ₀	Valor p
Regresión	3	22377719	7459240	5214.67	≈0.000
x_1	1	16576	16576	11.59	0.001
x_3	1	887669	887669	620.56	≈0.000
x_2	1	1860	1860	1.30	0.257
Error	110	157348	1430		
Total	113	22535067			

Dado este resultado, se excluye la variable x_2 del modelo, considerando solamente como variables regresoras a x_1 (cantidad de prendas lavadas, en un día) y x_3 (horas de funcionamiento, en un día), obteniendo que tanto el modelo en

general como sus variables regresoras resultan ser significativas, tal como se muestra en la Tabla 3, con un R²ajustado de 99,28%.

Tabla 3. ANOVA para el modelo de regresión considerando las variables x_1 y x_3

Fuente	gl	SC Ajust	MC Ajust.	F ₀	Valor p
Regresión	2	22375859	11187930	7800.28	≈0.000
x_1	1	21758	21758	15.17	≈0.000
x_3	1	1237366	1237366	862.70	≈0.000
Error	111	159207	1434		
Total	113	22535067			

Así, el modelo encontrado para modelar el consumo diario de combustible, en litros, sería:

$$y=0,03007x_1+22,77615x_3 \quad (3)$$

Donde:

y : Consumo diario de combustible, en litros.

x_1 : Cantidad de prendas lavadas, en un día.

x_3 : Horas de funcionamiento de la caldera/día.

La prueba para la significación de los coeficientes confirma la significancia de éstos tal como se muestra en el Tabla 4.

Tabla 4. Prueba para la significación de los coeficientes, de forma individual

Término	Coef.	EE coef.	T ₀	Valor p
x_1	0.03007	0.00772	3.89	≈0.000
x_3	22.776	0.775	29.37	≈0.000

En relación al cumplimiento del supuesto de Normalidad para los errores, se aplicaron las pruebas de Anderson-Darlin, Ryan Joiner, y Kolmogorov Smirnov, comprobando en cada una de ellas el ajuste a la Distribución Normal de los errores.

Tabla 5. Pruebas de bondad de ajuste a la Distribución Normal para los errores

Estadístico	Valor del Estadístico	Valor p
Anderson-Darling	0.591	0.120
Ryan Joiner	0.062	>0.150
Kolmogorov Smirnov	0.994	>0.100

Discusión

El objetivo es estimar los parámetros de un modelo, que resultó ser lineal, que explica el consumo diario en litros de combustible gasoil que se suministra a una caldera y así dar información a los planificadores tanto de producción como de finanzas para el establecimiento de estrategias que garanticen el suministro de este material indirecto al proceso de producción. El modelo encontrado en la Ecuación 3, indica, con los valores de sus parámetros, que por cada prenda lavada en un día de producción se consumen, en promedio, 0,03007 litros de gasoil; y,

además, por cada hora de funcionamiento de la caldera, se consumen, adicionalmente, 22,77615 litros de combustible.

Esta información resulta útil tanto para el área de Producción como para el área de Finanzas de la empresa, ya que para determinados niveles de producción fijados en un plan o programa, se puede estimar la cantidad de material requerido para el proceso y los niveles de inventario óptimos, con lo que se pueden diseñar la capacidad de almacenamiento y los planes de capacidad. Por otra parte, fijado el mismo plan de producción y los programas, con el costo unitario del combustible, se puede realizar la planificación financiera de la empresa y estimar los requerimientos de recursos y determinar las fuentes de financiamiento para la compra del material para producción.

El modelo encontrado ofrece además un R^2 ajustado de 99,28%, que indica que la variabilidad del consumo, en litros por día, de combustible queda explicada en un 99,28% por las variables "cantidad de prendas lavadas en un día" y "horas de funcionamiento de la caldera en un día".

CONCLUSIONES

El modelo encontrado para explicar el comportamiento de la variable "consumo diario de combustible, en litros" en términos de la cantidad de prendas lavadas y las horas de funcionamiento del equipo

generador de vapor, resulta ser útil tanto para la Planificación de Recursos Empresariales de la organización como para la Estimación de Costos basados en el Plan de Producción, y el Costeo para la determinación de los Costos de una Orden

de Producción y evaluación de éstos con relación al Precio de Venta del Servicio de Lavandería.

Es útil para las industrias de este tipo saber que pueden hacer estimación de consumo de combustible considerando solo las variables "cantidad de prendas lavadas" y "horas de funcionamiento de la caldera", y mejor aún tener conocimiento de los valores de sus coeficientes en el modelo. En este caso, conocer que $\beta_1=0,03007$ litros/(prenda lavada) implica poder estimar la cantidad total de litros de combustible a consumir en un Plan y Programa de Producción, así como cargar un costo indirecto de producción a una orden en función de la cantidad de prendas procesadas en el lavado.

El otro término del modelo, y no menos útil, está asociado con la cantidad de horas

que se tiene en funcionamiento la Caldera. El coeficiente de este término, en este caso $\beta_3=22,77615$ litros/hora da información sobre rendimiento y eficiencia del equipo, y permite inclusive comparar el equipo generador de vapor con equipos de la misma característica de la empresa o con otros equipos ubicados en empresas del mismo ramo.

Otro aspecto de interés, y que se logra cuantificar con el modelo, es la cantidad de litros promedio diario que se consumen en el proceso para determinados niveles de producción y operaciones, lo que permite a los planificadores tanto de operaciones como financieros garantizar el suministro de este material indirecto para el proceso de producción.

REFERENCIAS

Astorga, J. (2014). Aplicación de modelos de regresión lineal para determinar las armónicas de tensión y corriente. *Ingeniería Energética*, 35(3), 234-241.
<https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/408/426>

Aymerich, À. & Albarracín, L. (2022). Modelización matemática en actividades estadísticas: Episodios clave para la generación de modelos. *Uniciencia*, 36 (1), 1-16.
<https://dx.doi.org/10.15359/ru.36-1.16>

Crespo, G., Monteagudo, J., Montesino, M., Cruz, I. & Cabrera, J. (2018). La Gestión Energética en la Fabricación de Piensos Balanceados en Cienfuegos. *Revista Científica de la Universidad de Cienfuegos*, 11(1), 249-256.

<https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1114>

Guardela, L. (2020). Evolución de la política de cambio climático en Colombia. *Vniversitas*, 69, 1-17.

<https://doi.org/10.11144/Javeriana.vj69.epcc>

Lago, C. (2007). Aplicación de la regresión lineal en el estudio del impacto del cambio de entrenador sobre el rendimiento en el fútbol. *Motricidad. Revista Europea del Movimiento Humano*, 19, 145-163.
<https://www.eurjhm.com/index.php/eurjhm/article/view/192/356>

Mendenhall, W.; Beaver, R. & Beaver, B. (2023). *Introducción a la probabilidad y estadística*, 15a. edition. Cengage Learning.

- Montgomery, D. & Runger, G. (2020). *Applied Statistics and Probability for Engineers, 7th edition*. Wiley.
- Morantes-Quintana, G.; Rincón-Polo, G. & Pérez-Santodomingo, N. (2019). Modelo de regresión lineal múltiple para estimar concentración de PM1. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35 (1), 179-194. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.01.13>
- Naranjo, L.; López, A.; Rincón, J.; González, L. (2021). Identificación de un modelo lineal adecuado para evaluar características predestete en ganado criollo colombiano Blanco Orejinegro. *Scientia Et Technica*, 26(1), 49-56. <https://doi.org/10.22517/23447214.24301>
- Palominos-Rizzo, T.; Villatoro-Sánchez, M.; Alvarado-Hernández, A.; Cortés-Granados, V.; Paguada-Pérez, D. (2022). Estimación de la humedad del suelo mediante regresiones lineales múltiples en Llano Brenes, Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 33(2), 47872. <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.47872>
- Pico, J.; Soria, J.; Gutierrez, E.; Arzola, J. (2019). Modelado por técnicas de regresión de los parámetros energéticos de desempeño para gasificadores tipo downdraft. *Ingeniería Energética*, 40(2), 138-147. <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/563>
- Puente, N.; Torres, L. & Sánchez, J. (2015). Modelado computacional usando regresión lineal y simbólica a B para determinar ópticamente el tamaño del poro de la piel. *Nova Scientia*, 7 (14), 218-235. <https://doi.org/10.21640/ns.v7i14.136>
- Rodríguez-López, Y., Sosa-Cueto, S., & García-Gallardo, AJ (2023). Metodología para la determinación del costo energético en trabajos de preparación de suelos. *Revista Ingeniería Agrícola*, 13 (3), 42-47. <https://www.redalyc.org/journal/5862/586275623007/html/>
- Salaet, S., & Roca, J. (2010). Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de CO₂: algunos posibles escenarios futuros de emisiones. *Revista Galega de Economía*, 19(1), 1-19. https://www.usc.es/econo/RGE/Vol19_1/castelan/art1c.pdf
- Torres, C.; Callegari, N.; Jara, H. (2021). Modelos de regresión y diseño de línea base para indicadores energéticos en una empresa siderúrgica. *Ingeniería Energética*, 42(1), e2801. <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/606>
- Valencia, O., Olivar, G., Redondo, J. (2019). Metodología para el Modelado de algunos Aspectos Asociados a la Sostenibilidad Empresarial y su Aplicación en una Empresa Manufacturera. *Información tecnológica*, 30(4), 103-126. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000400103>

Autor

Eduardo Vargas Cano. Ingeniero Industrial, Magister en Gerencia de la Construcción; Docente e Investigador, Universidad de Carabobo, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1293-1550>

Email: eevargas1@uc.edu.ve

Recibido: 20-07-2023

Aceptado: 26-12-2023