

Modelo estadístico para la predicción de fallas en equipos de bombeo de las estaciones de abasto de agua pertenecientes a la OSDE AyS

Statistical model for the prediction of failures in pumping equipment of the water supply stations belonging to the OSDE AyS

Sergio Abel Rodríguez Sigarreta^{1,*}

¹Facultad de Ingeniería Industrial. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE). Calle 114 entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.

*Correspondencia: sergioaro@ind.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Resumen

El presente trabajo se llevó a cabo en el Grupo Empresarial de Agua y Saneamiento. Del mismo fueron estudiadas 23 estaciones de abasto de agua, con el fin de evaluar el estado actual del sistema en general y proponer una herramienta predictiva para la toma de decisiones en cuanto a la planificación, organización, ejecución y control del proceso de mantenimiento. El problema de la investigación radica en cómo contribuir a la evaluación de variables de Gestión de Mantenimiento para la mejora del nivel de integración del sistema de dirección del Grupo Empresarial de Agua y Saneamiento. El objetivo general del trabajo es obtener un modelo matemático a partir del análisis estadístico de datos para pronosticar teniendo en cuenta variables de mantenimiento, posibles escenarios en cuanto a las afectaciones, con el objetivo de contribuir a mejorar el nivel de integración de los sistemas de dirección en la OSDE AyS. Para llevar a cabo este trabajo se utilizaron herramientas como entrevistas, cuestionarios, regresión lineal múltiple, software Minitab versión 17. Los resultados de la aplicación de herramientas arrojan de forma general que de las empresas analizadas el 20% de ellas son la causa de más del 50% del total de las afectaciones, siendo las EAA más afectadas; Camagüey, Artemisa, Granma, Pinar del Río y Mayabeque como las que más afectaciones en cuanto a equipos rotos y quemados.

Palabras clave: Gestión de Mantenimiento, modelo matemático, análisis estadístico, nivel de integración, sistemas de dirección

Abstract

The present work was carried out in the Managerial Group of Water and Reparation. Of the same one 23 Stations of Supply of Water were studied, with the purpose of to evaluate the current state of the system in general and to propose a tool predictive for the taking of decisions as for the planning, organization, execution and control of the maintenance process. The problem of the investigation resides in how to contribute to the evaluation of variables of Administration of Maintenance for the improvement of the Level of Integration of the System of Address of the Managerial Group of Water and Reparation. The general objective of the work is to obtain a mathematical model starting from the statistical analysis of

data to predict keeping in mind maintenance variables, possible scenarios as for the affectations, with the objective of contributing to improve the level of integration of the address systems in the OSDE AyS. To carry out this work tools they were used like: you interview, questionnaires, multiple, main lineal regression, software Minitab version 17. The results of the application of tools hurtle in a general way that of the analyzed companies the 20% of them is the cause of more than 50% of the total of the affectations, being the affected EAA; Camagüey, Artemisa, Granma, Pinegrove of the River and Mayabeque like those that more affectations as for broken and burnt teams, on the other hand: Matanzas and The alone Tunas for concept of teams burned by what you arrives to the analysis that these two last they have the highest index of burnt teams.

Keywords: Administration of Maintenance, mathematical model, statistical analysis, integration level, address systems

1. Introducción

El mantenimiento tiene como función principal aprovechar el óptimo y adecuado funcionamiento de los equipos, sistemas o procesos, con el fin de mantener al máximo las capacidades y/o funciones que se desarrollan en la industria. El desarrollo prolongado de la capacidad industrial de los países conllevó a cambiar la visión que se tenía hasta el momento de lo que se conocía como mantenimiento industrial. Las antiguas técnicas basadas en observaciones periódicas y en las experiencias de los procesos, equipos, fue cambiada por los análisis de información, estrategias y planes de mantenimiento que utilizan nuevos esquemas operativos, procedimientos que hoy se conocen como gestión de activos. Estas nuevas estrategias buscan asegurar los recursos para mantener la disponibilidad de los equipos, la funcionalidad sin ocasionar paradas imprevistas y la efectividad en las acciones que se necesitan para lograr recuperar las unidades falladas. En general los análisis y las estrategias de mantenimiento se han encargado de observar variables controladas para la ejecución de tareas específicas e individuales [1, 2].

Desde el inicio de la vida humana las herramientas fabricadas por el hombre se han conservado mediante acciones concebidas a tal fin, lo que pudiera considerarse un concepto elemental del mantenimiento. Deming define el mantenimiento como el conjunto de medidas de carácter técnico-organizativo, que pueden ser o no elaboradas previamente, que tiene como propósito sostener la funcionalidad de los equipos y garantizar un estado óptimo de las máquinas a través del tiempo. [3]

En la mayoría de los sectores industriales, el desarrollo de los programas de mantenimiento sobre la actividad en la que se aplica resulta esencial y es uno de los elementos más importantes para tener una competitividad dentro del sector, lo que significa que el mero hecho de que se produzca una avería no solo recae en la reparación, sino que constituye un sistema de gestión de recursos, una organización que previene y predice las averías, garantizando la disponibilidad, fiabilidad y utilización de las instalaciones, dentro de los criterios de seguridad, calidad y competitividad. [4]

Las continuas afectaciones que se producen en las obras y equipamiento de la infraestructura de agua y saneamiento en Cuba se mantienen entre el 8 y el 12% de la población servida afectada por causas imputables al mantenimiento, entre las que destacan una pobre gestión logística y mala planificación de los recursos para el mantenimiento, ejecución deficiente de las tareas de mantenimiento y falta de chequeo de las mismas, no se intenciona el mejoramiento de la planificación, lo que afecta la garantía y extensión del ciclo de vida de los activos. Para contribuir a la solución del problema, se plantea como objetivo obtener un modelo matemático a partir del análisis estadístico de datos para pronosticar,

teniendo en cuenta variables de mantenimiento, posibles escenarios en cuanto a las afectaciones, con el objetivo de contribuir a mejorar el nivel de integración de los sistemas de dirección en la OSDE AyS.

2. Materiales y Métodos

Se partió de identificar estadísticamente las Estaciones de Abasto de Agua con mayores afectaciones para ello se tomaron los datos históricos de los últimos tres años o sea los comprendidos entre 2019 a 2021. También se identifican tres variables que serán utilizadas para futuros diagnósticos (Inventario, Equipos rotos y Equipos quemados).

El autor parte del análisis del comportamiento del total de equipos que se encuentran en inventario, dentro del intervalo de tiempo estudiado (Figuras 1-3).

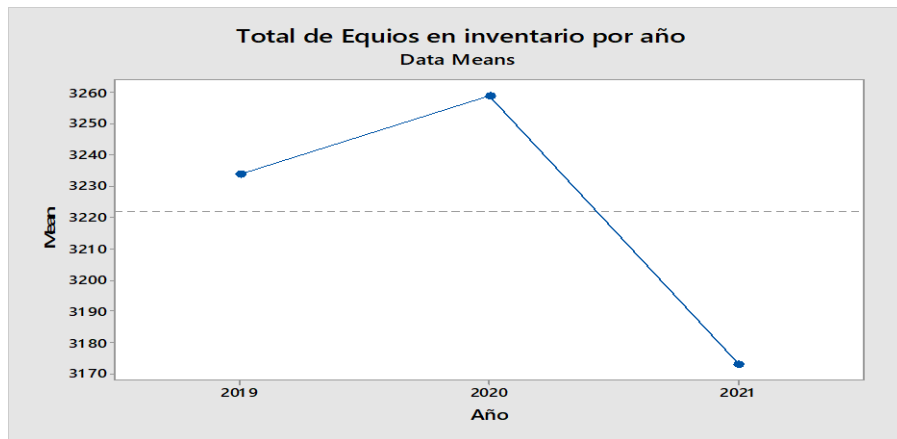


Fig.1 Total de Equipos en Inventario

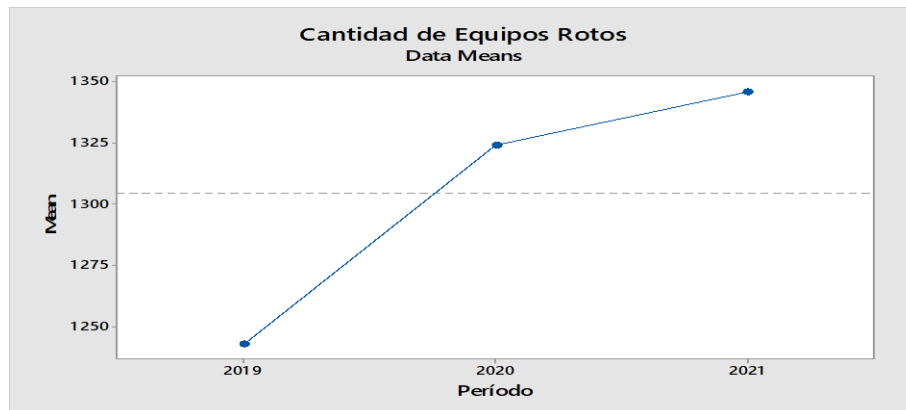


Fig.2 Cantidad de Equipos Rotos

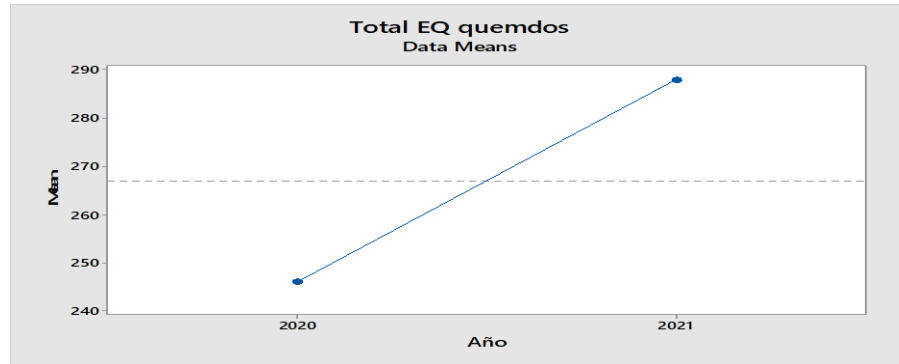


Fig.3 Total de Equipos Quemados

Como se puede apreciar entre los años 2019 y 2020 el total de equipos en inventario tiende a aumentar y entre el 2020 y el 2021 disminuye este nivel de manera brusca por lo que se puede afirmar que existe al menos un factor que está causando este efecto. Por lo que es necesario realizar un análisis de distintas variables para determinar si existe o no relación entre ellas y así poder identificar causas que provocan esta disminución de los activos en inventario, se tienen en cuenta para este análisis la cantidad total de equipos rotos y la cantidad de equipos quemados en este período, mostrándose el comportamiento de las mismas en las Figuras 1 y 2 respectivamente. En la Figura 3 se muestra el comportamiento de la cantidad total de equipos quemados en los últimos dos años. Primeramente, se evalúa el comportamiento de las estaciones de abasto de agua con respecto a las variables antes mencionadas, con el objetivo de identificar las EAA con principales problemas.

Para realizar este análisis se tomaron las EAA siguientes: Pinar del Río, Artemisa, Mariel, Mayabeque, A. Habana, Matanza, Varadero, Cienfuegos, Villa Clara, Cayo Santa María, Sancti Spiritus, Ciego de Ávila, Cayo Coco, Camagüey, Las Tunas, Holguín, Agua Santiago, Agua Turquino, Guantánamo, Isla de la Juventud, Cayo Largo del Sur.

En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos haciendo uso del software Minitab, se muestra el comportamiento de las EAA en cuanto a la frecuencia de falla de los equipos en un gráfico de barras y luego se muestra a partir del diagrama de Pareto la incidencia de estas roturas con respecto al total, brindándonos información de las EAA con mayores problemas durante el periodo analizado.

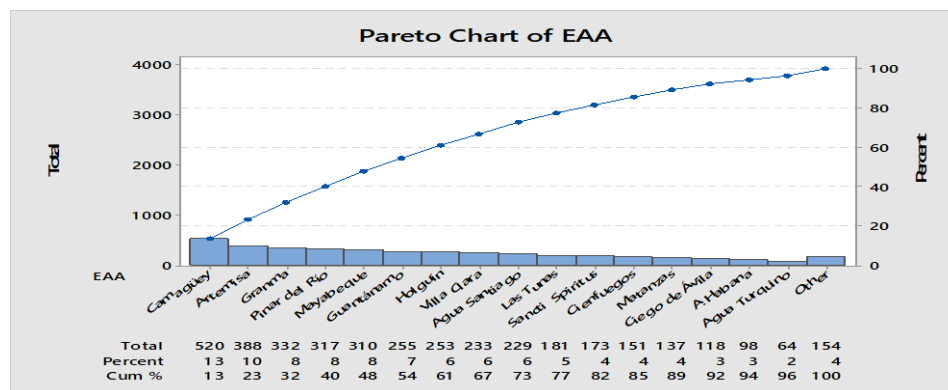


Fig.4 Diagrama de Pareto de las afectaciones por EAA

Del análisis anterior se puede determinar las estaciones que representan el mayor porcentaje de las afectaciones en el periodo, siendo estas Camagüey, Artemisa, Granma, Pinar del Río y Mayabeque. Teniendo el resultado de las EAA con mayor frecuencia de equipos rotos es necesario determinar las que más equipos quema ya que esto representa un factor que provoca grandes afectaciones ya que los equipos rotos pueden devolverse al sistema después de una intervención correctiva pero los equipos quemados quedan fuera del sistema por tiempo indefinido causando grandes afectaciones, para este análisis se seleccionan los datos de los últimos dos años. En la Figura 5 se muestra el diagrama causa-efecto que relaciona las causas que provocan la rotura de los equipos.



Fig.5 Diagrama Causa-Efecto

En la Figura 6 se relaciona la cantidad de equipos quemados por EAA en el periodo estudiado.

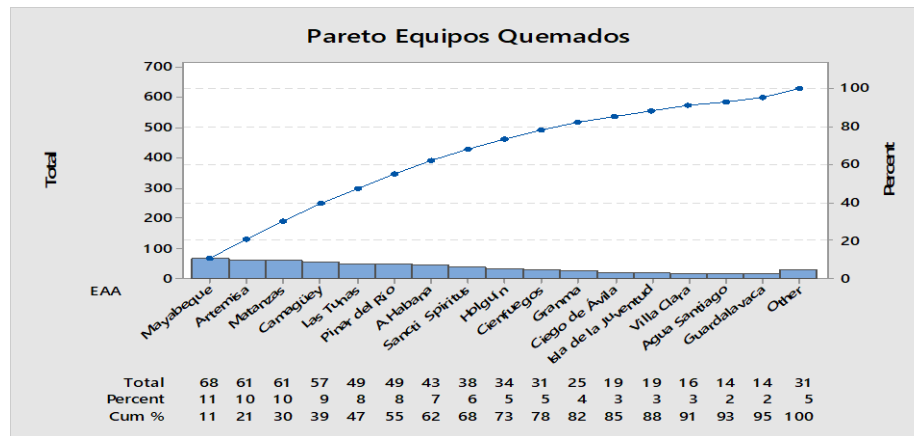


Fig.6 Diagrama de Pareto de Equipos Quemados por EAA

Los resultados del análisis se recogen en la siguiente tabla donde se puede apreciar las EAA más críticas en cuanto a equipos quemados son: Mayabeque, Artemisa, Matanzas, Camagüey, Las Tunas, Pinar del Río. Por lo que se puede concluir que las estaciones críticas por equipos rotos y quemados son: Mayabeque, Artemisa, Camagüey y Pinar del Río, por otra parte, las estaciones de Matanzas y Las Tunas no son las más críticas en cuanto equipos rotos, sin embargo, se encuentran entre las que mayor porcentaje de equipos quemados tienen, por lo que es necesario determinar el índice de equipos quemados (IEQ) por EAA para poder identificar las estaciones con mayor (IEQ) este indicador da una idea del peso de este tipo de falla en cuanto al total de equipos rotos, el análisis se muestra a continuación:

Se define (IEQ) como:

$$IEQ_{EAA} = \frac{Tot\ Eq\ Quemados_{EAA}}{Tot\ Eq\ rotos_{EAA}}$$

Con los resultados obtenidos el autor hace un diagrama de Pareto para su análisis, los resultados se muestran a continuación:

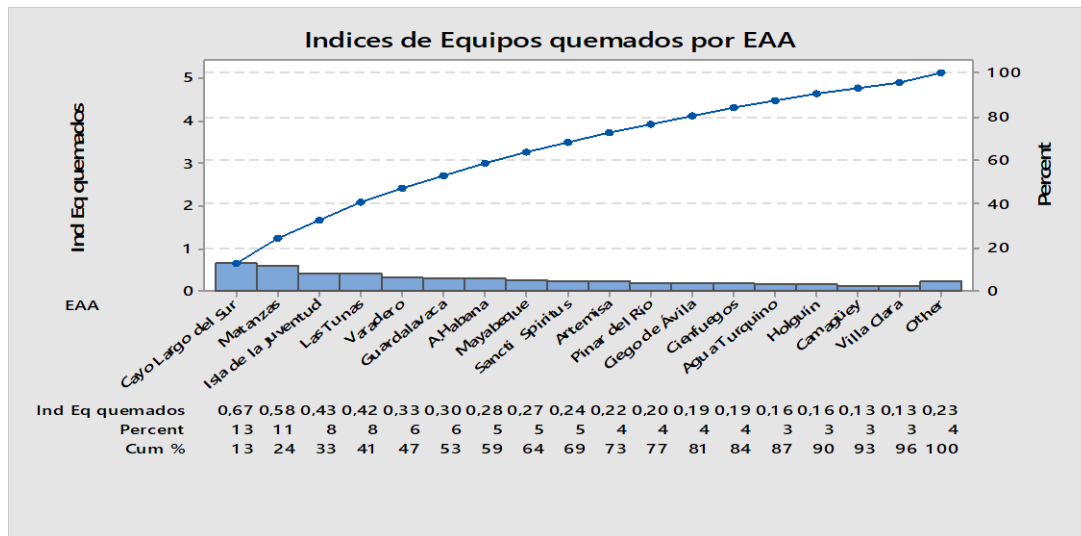


Fig.7 Diagrama de Pareto de Índice de Equipos Quemados

Este análisis lleva al autor a la conclusión de que las EAA con mayores índices de Fallas por concepto de equipos quemados son: Cayo Largo del Sur, Matanzas, Isla de la juventud y Las Tunas, este indicador también se puede interpretar como la tasa de riesgo que existe de que un equipo se queme en las distintas EAA, por lo que nos brinda una importantísima información ya que se puede identificar claramente las estaciones con mayor tasa de riesgo para luego dirigir determinadas acciones con el propósito de identificar causas y condiciones que provocan esto y así poder disminuir este indicador.

Análisis de Correlación y Regresión Lineal

A continuación, se realiza el análisis de las variables que intervienen en el proceso para determinar el grado de correlación entre ellas y la ecuación de regresión que las describe, para ello el autor hace uso de las herramientas estadísticas de Correlación y Regresión lineal múltiple.

Como se define anteriormente las variables son:

- Nivel de Inventario (X2); Equipos Rotos (X1); Equipos Quemados (Y)

En las siguientes figuras se muestra el diagrama de dispersión de las variables independientes con respecto a la dependiente:

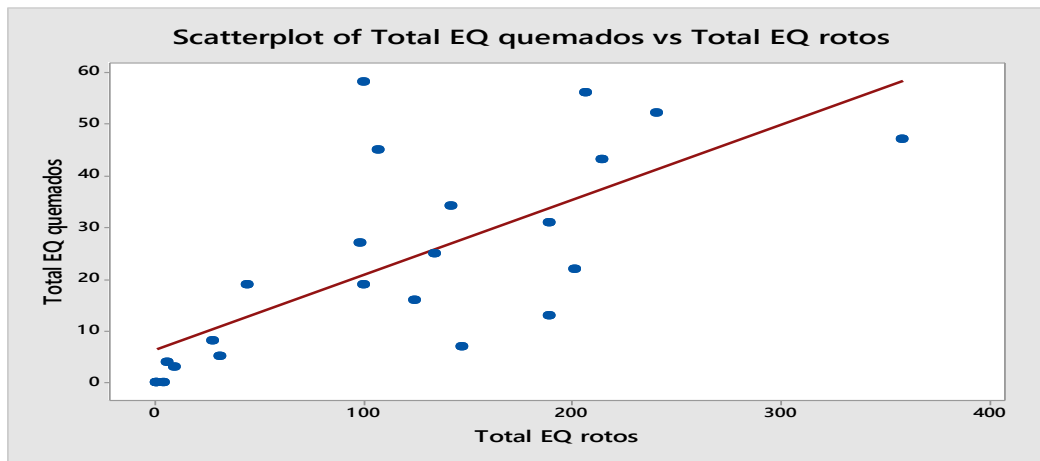


Fig.8 Diagrama de Dispersión de Equipos Rotos vs. Quemados

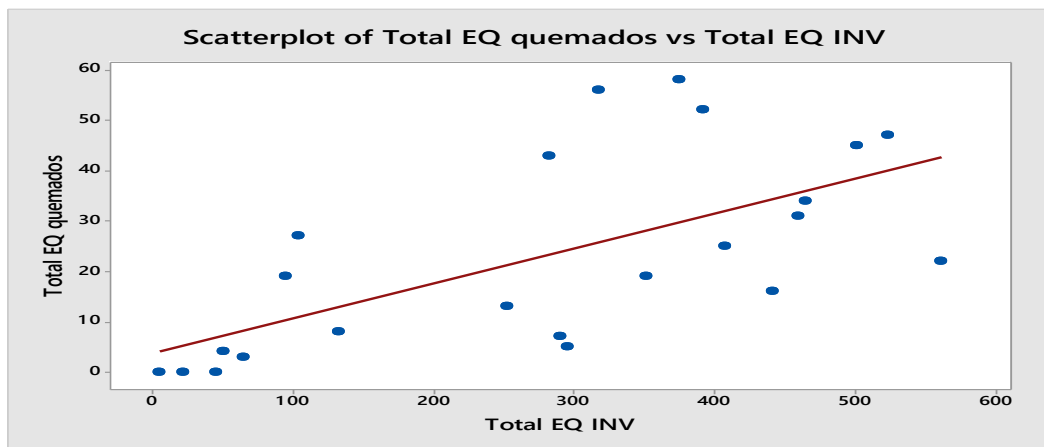


Fig.9 Diagrama de Dispersión de Equipos Quemados vs. Equipos en Inventario

Se necesita estimar la cantidad de equipos quemados por lo que esta será la variable dependiente y en nivel de inventario y los equipos rotos la independiente, la matriz de correlación que relaciona estas variables se muestra a continuación:

Correlación: Total EQ quemados; Total EQ rotos; Total EQ INV

	Total EQ quemado	Total EQ rotos
Total EQ rotos	0,711 0,000	
Total EQ INV	0,645 0,001	0,752 0,000

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Análisis de multicolinealidad

El coeficiente de correlación (r) entre la variable X_1 (Equipos rotos) y X_2 (Nivel de Inventario) es de 0.752 y al tener un coeficiente de 0.645 y 0.711, X_1 y X_2 respectivamente con respecto a Y podemos identificar una alta multicolinealidad entre X_1 y X_2 .

Con este resultado se puede eliminar la variable menos correlacionada con la variable dependiente que en este caso es X_2 , de igual forma en el siguiente epígrafe se demuestra.

Selección de las variables que entran en el modelo

Como se puede observar de todas las variables independientes la que más fuertemente está relacionada con Equipos quemados es Equipos rotos (X_1) con un coeficiente de correlación modular, $r = 0,711$.

Para saber si esta variable entra dentro de la ecuación de regresión hacemos la dódima de la pendiente:

Dódima de la pendiente

Hipótesis:

$H_0: B_1 = 0$ en $E(Y/X) = B_0 + B_1X$ (X no hace un aporte significativo en la ecuación, no entra)

$H_1: B_1 \neq 0$ en $E(Y/X) = B_0 + B_1X$ (X hace un aporte significativo en la ecuación, entra)

Rechazo H_0 si $P_{\text{valor}} < \alpha$

Como el P_{valor} es $0,000 < \alpha = 0,05$ rechazo H_0 y concluyo que **X_1** hace un aporte significativo en la ecuación y entra en la misma por lo que hasta este paso, la ecuación de regresión sería:

Total EQ quemados = $6,38 + 0,1451$ Total EQ rotos

Ahora determinaremos si la variable **X_2** entra en la ecuación estando ya la variable **X_1** dentro; para ello realizaremos la dódima parcial de F .

Dódima parcial de F

Hipótesis:

$H_0: B_2 = 0 / B_1 \neq 0$ en $E(Y/X_1; X_2) = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2$ (X_2 no entra)

$H_0: B_2 \neq 0 / B_1 \neq 0$ en $E(Y/X_1; X_2) = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2$ (X_2 entra)

Rechazo H_0 si $P_{\text{valor}} < \alpha$

Como el P_{valor} es 0,286 y no es $< \alpha = 0,05$ por lo que no se puede rechazar H_0 por lo que se concluye que **X_2** no entra en dicha ecuación, quedando esta como estaba en el paso anterior:

Total EQ quemados = $6,38 + 0,1451$ Total EQ rotos (1)

Interpretación del coeficiente de regresión b1 de dicha ecuación:

b1= 0,1451: por cada equipo que se rompe se incrementa en 0,14 los equipos quemados, o sea que cada 7 equipos que se rompen, se quema al menos un equipo.

Para hacer uso de esta ecuación se deben tener en cuenta los valores máximos y mínimos de los datos de la variable Equipos rotos, es decir el valor a sustituir en esta variable debe encontrarse en el rango de 0 a 358.

Cálculo de Residuo e Incremento

Durante los años estudiados (2020-2021) se tuvo un total de 2670 equipos rotos y 534 equipos quemados, por lo que tenemos los resultados de Y (equipos quemados) en función de los equipos rotos, con estos datos históricos comprobaremos la magnitud del residuo o sea el error de dicha ecuación. Para ello debemos evaluar en la ecuación (1), sustituyendo X= 2670.

$$\text{Total EQ quemados} = 6,38 + 0,1451 \text{ Total EQ rotos} = 394$$

La ecuación de error se puede expresar de la siguiente manera:

$$e = Y_{\text{real}} - Y_{\text{estimada para } x} = 534 - 394 = 140$$

Se tiene un error de 140 equipos por lo que hay que ajustar la ecuación para ello se calcula el incremento medio (INCM), o sea la variación media del error durante los años analizados multiplicado por la cantidad de años evaluados.

Para el cálculo del incremento medio se define la ecuación: $INCM = \frac{e_{x-1} + e_x}{\Sigma x} \times \text{Años}$ (3)

$$\text{Cálculo: } e_{2020} = 246 - 198 = 48 ; \quad e_{2021} = 288 - 202 = 86$$

Por tanto, el INCM será de 134, ya que la media del error es de 67 multiplicado por 2 años.

Al pronosticar la cantidad de equipos quemados a partir de la ecuación (1) tenemos un resultado de 394 equipos y realmente se tuvo 534 equipos quemados en estos dos años. Por lo que se ajustó la ecuación (1) quedando de la siguiente forma:

$$\text{Eq quem} = (6,38 + 0,1451 \times \text{Eq rotos}) + 67 \times 2 \quad (1.1)$$

De esta manera se obtiene un pronóstico de un valor de 528 equipos quemados con un error de 6 equipos con respecto al real, por lo que se ajusta bastante bien.

A partir de la Ec (1.1) se puede estimar teniendo en cuenta la cantidad de equipos rotos que se tienen al cierre de un año, la cantidad de equipos quemados, esto sería muy útil para la toma de futuras decisiones en cuanto a la gestión del mantenimiento ya que en torno a este nivel estimado se pudiera gestionar el nivel de recursos necesarios para enfrentar este cambio.

3. Resultados y Discusión

Propuesta de una herramienta predictiva que permita gestionar el mantenimiento a partir del análisis de datos estadísticos

A continuación, se pretende plasmar una secuencia lógica de análisis, que permita a partir del análisis estadístico de datos pronosticar el estado que se encontrará el sistema de estaciones de abasto de agua. Pero antes se debe analizar estadísticamente la relación que existe y la ecuación de regresión que describe el comportamiento de las variables, equipos rotos e inventario X1 y X2 respectivamente, ya que se parte del análisis del inventario existente que es un dato que se tiene y se puede proyectar el comportamiento de las demás variables a partir de este.

En este caso nos interesa predecir la cantidad de equipos rotos a partir de la cantidad que existen en inventario por lo que la variable equipos rotos sería la dependiente (Y) y la variable inventario sería la independiente (X), la ecuación de regresión que describe el comportamiento de Y en función de X se muestra en la siguiente figura:

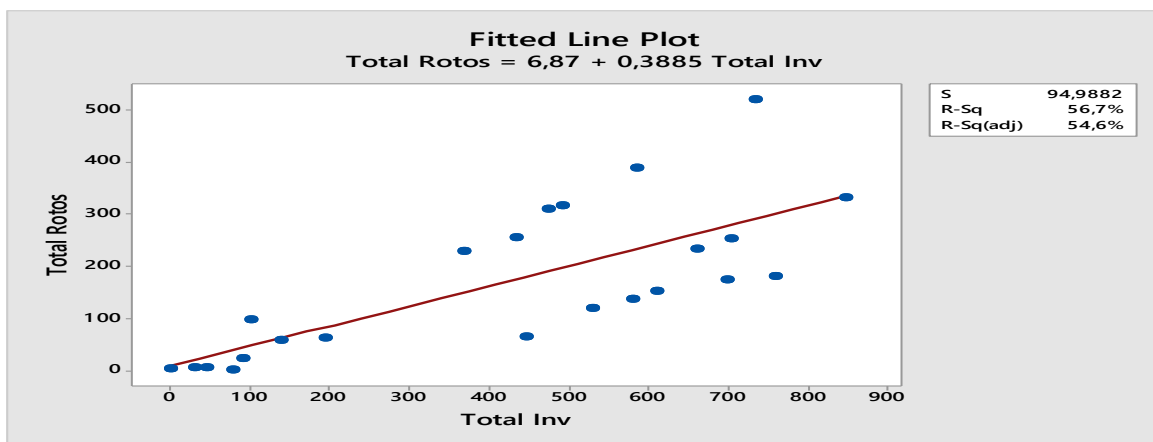


Fig.10 Ecuación de Correlación

Por tanto, se puede definir el proceder lógico para estimar la cantidad de equipos quemados durante el tiempo que se decida analizar.

En este caso se debe definir el tiempo a analizar, y obtener los datos históricos del mismo con el objetivo de determinar las ecuaciones de regresión que describe el comportamiento del total de equipos rotos en función del nivel de inventario existente y se determina según los datos la ecuación de regresión que describe el comportamiento del total de equipos quemados en función de los equipos rotos, Al obtener estas ecuaciones se procede a evaluar a partir del total de inventario o nivel de inventario, al emplear estas ecuaciones de manera consecutiva se obtiene a la salida el total de equipos quemados. A continuación, se muestra de forma gráfica la secuencia empleada en este periodo, aclarar que para cada periodo a analizar los factores de cada ecuación cambian, por lo que lo primero es determinar las ecuaciones.

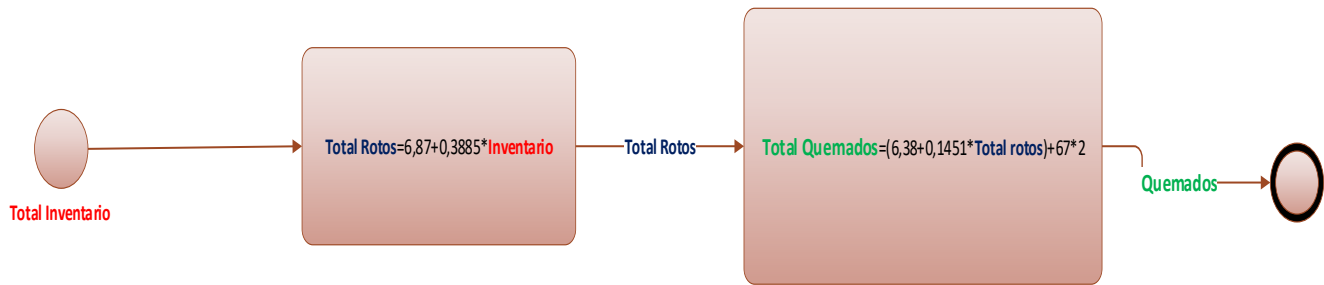


Fig.11 Procedimiento

Al cierre del año 2021 se tiene en inventario 3173 equipos, aplicando el modelo propuesto se pronostica un nivel de equipos quemados de 320 equipos, tendiendo a incrementarse con respecto a los años anteriores. El resultado obtenido permite tener un pronóstico que sirve para trazar políticas, tomar decisiones y tomar medidas en función de minimizar los efectos no deseados.

En la siguiente figura se puede observar el impacto de estas medidas en función de minimizar el efecto:

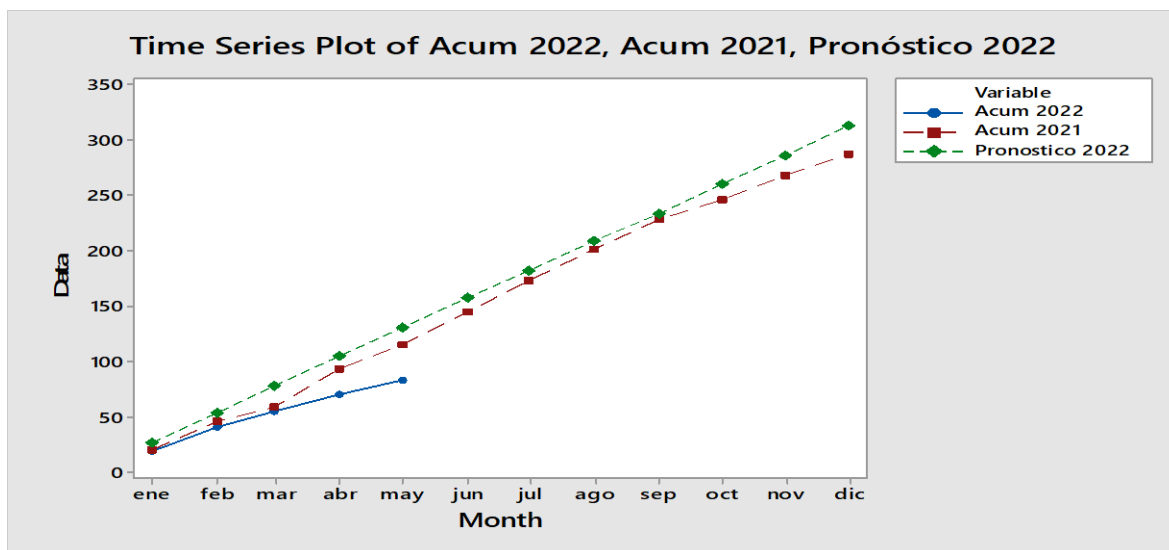


Fig.12 Acumulado de equipos Quemados

Anteriormente se puede observar el impacto de las medidas tomadas sobre la cantidad de equipos que fallan de este modo, lo que a su vez tiene un impacto económico – social.

En la siguiente figura se puede observar como los costos asociados con los equipos quemados en lo que va del 2022 tiende a disminuir con respecto a los costos del año anterior, probándose el impacto positivo de las medidas desde el punto de vista económico.

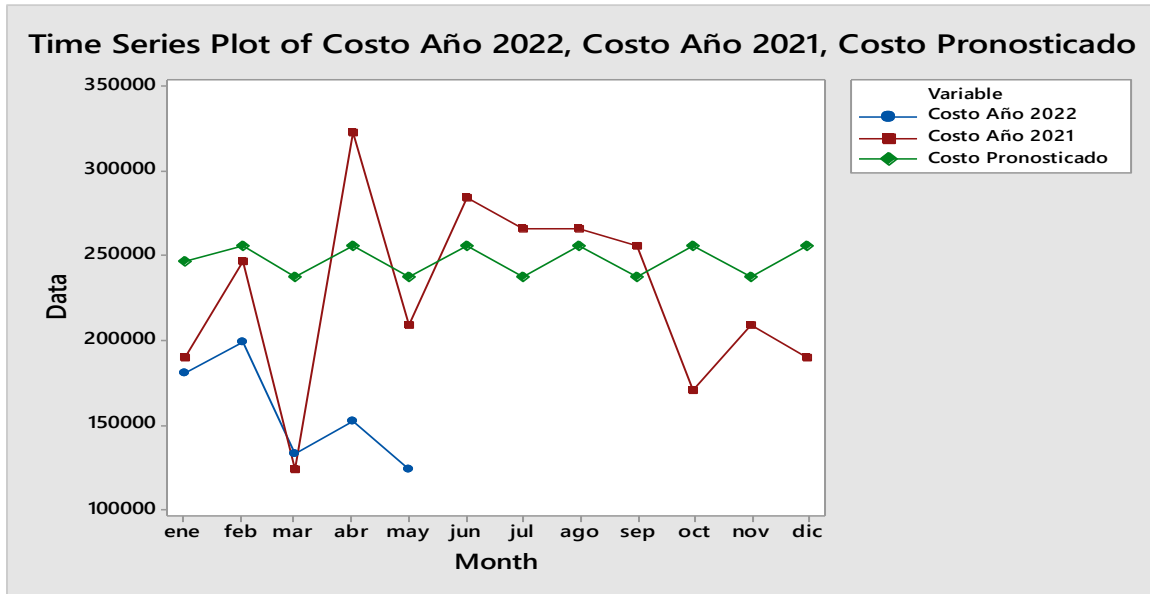


Fig.13 Análisis de costos

De igual forma se tiene un impacto social donde en la siguiente figura se puede observar que la población afectada disminuye en 293891 habitantes en lo que va de año.

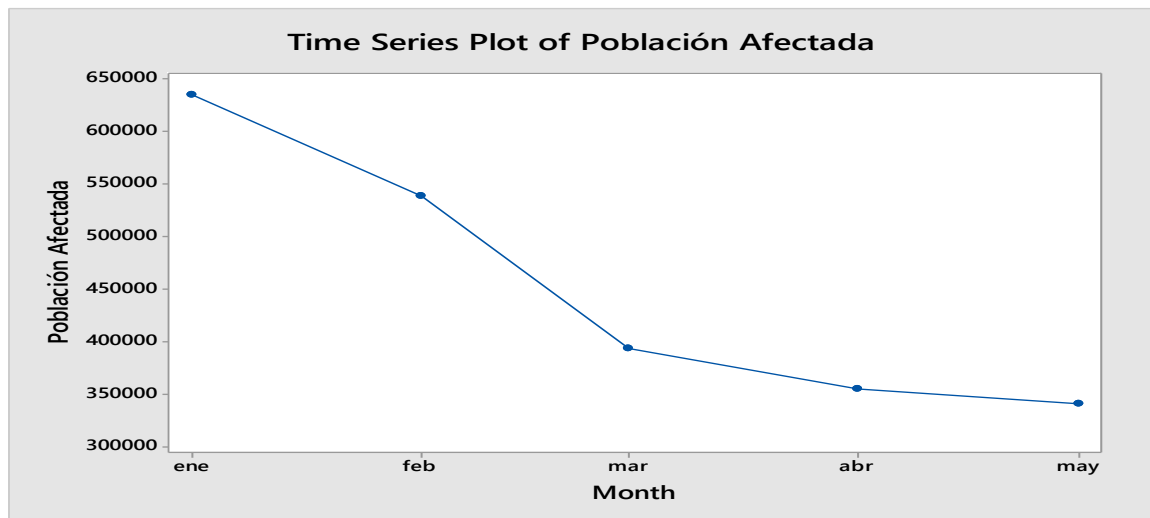


Fig.14 Población afectada

4. Conclusiones

El diseño del modelo estadístico para la predicción de fallas (Equipos Quemados) en equipos de bombeo permite que se proyecten posibles escenarios en cuanto a los niveles de fallas de esta naturaleza. Objetivamente este resultado puede ser usado en el taller para la gestión de partes y piezas para la reparación de estos equipos, también puede ser de utilidad para la alta dirección para trazar políticas, planes de mantenimiento como también para evaluar la situación existente. La herramienta propuesta posibilita que el analista pueda al estar culminando el año hacer una proyección para el año entrante y

así tener un pronóstico del comportamiento de esta forma puede proyectarse de manera estratégica y proactiva sobre los distintos escenarios.

Referencias

1. Castaño, A.F., *Desarrollo de un entorno programado para el análisis de confiabilidad con base en distribución Weibull biparamétrica*, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2011.
2. Blanco, E.E., *Distribuciones no tradicionales para medir confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD), que se ajustan a varias fases de la curva de Davies*. Medellín, Antioquía. Universidad EAFIT, 2014.
3. Rivera, E.M., *Sistema de Gestión del Mantenimiento Industrial*, 2011.
4. Deming, W.E., *El Mantenimiento y su evolución*, 1950.
5. *Gestión del Mantenimiento: Lean Maintenance y TPM*.