

Application of Crystal Ball in Preventive Maintenance Management and its influence on the productivity of a cardboard company

Aplicación del Crystal Ball en la Gestión del Mantenimiento Preventivo y su influencia en la productividad en una empresa fabricante de cartón

Rosario del Pilar López -Padilla, Maestra¹, Elmer Benites- Alfaro, Doctor², Lino Rolando Rodriguez- Alegre, Maestro³, Jaime Gutierrez- Ascón, Ingeniero⁴, Johan Hearly Iturrizaga- Romero, Ingeniero⁵, Juan Carlos Martínez- Loayza, Ingeniero⁶

¹Universidad César Vallejo, Perú; rlopezp@ucv.edu.pe, ebenitesa@ucv.edu.pe, johaniturrizaga14@gmail.com, jefmartinez06@gmail.com,

²Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Perú; jgutierrez@unjfsc.edu.pe, lrodriguez@unjfsc.edu.pe,

Resumen: El trabajo realizado buscó determinar como el modelamiento de simulación de la gestión de mantenimiento preventivo influye en la productividad en una empresa de fabricación de cartón. La investigación es aplicada, diseño no experimental y enfoque cuantitativo. La muestra fue la producción de bandejas para huevo durante 26 días. La técnica empleada fue el análisis documental y los instrumentos, las fichas de registro de mantenimiento y productividad. El empleo del software Crystal Ball, para la simulación en los cálculos del mantenimiento preventivo permitió verificar el aumento de la productividad a un 61.84%, de igual forma la eficiencia y la eficacia al 73.85% y 83.53% respectivamente. En conclusión, se demuestra que de realizarse la gestión de mantenimiento preventivo mejorará la productividad en la empresa.

Palabras clave-- Simulación, Productividad, Mantenimiento Preventivo.

Abstract—The work carried out seek to determine how simulation modeling preventive maintenance management influences productivity in a carton board company. The research is applied, non experimental, design and quantitative approach, the sample considered the production of egg trays during 26 days. The technique was the documentary analysis and the instruments the register of the preventive maintenance and productivity data recorded. The used of the Crystal Ball software for simulation in preventive maintenance calculations allow us to see that, if it is applied, productivity can increase to 61.84%, as well as efficiency and effectiveness at 73.85% and 83.53% respectively. In conclusion, it has been demonstrated that preventive maintenance management will improve productivity in the organizations.

Key words: Simulation, Productivity, Preventive Maintenance.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.691>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

I. INTRODUCCIÓN

Diversos modelos informáticos son utilizados para el pronóstico y análisis de riesgos en una variedad de aplicaciones que involucran la toma de decisiones. El análisis de sensibilidad ayuda a comprender las limitaciones de los resultados que ofrecen estos modelos.[1] Siendo el análisis de la incertidumbre una medida acerca de la "bondad" en el rendimiento del modelo, el incorporar herramientas analíticas contribuye desde una perspectiva práctica, en la forma de realizar estos análisis. Estas asignan distribuciones en torno a los diversos parámetros, así como cambios aleatorios simultáneos en las diversas variables asociadas con el sistema permitiendo evaluar su efecto neto. El análisis de sensibilidad ayuda a comprender la importancia de las variables utilizadas en el cálculo del riesgo. Por otro lado, el análisis de sensibilidad ayuda a comprender la importancia de las variables utilizadas y sus cambios posibilitan evaluar el riesgo. El análisis de sensibilidad se realiza cambiando un parámetro y determinando la correlación con el cambio en los resultados. El análisis de sensibilidad es una herramienta que indica la calidad de un modelo o la calidad de una inferencia basada en un modelo. [2].

Existen en el mercado diferentes programas informáticos para determinar la incertidumbre y la sensibilidad de las variables pronosticadas por un modelo. [3]. El Crystal Ball® es un programa de pronóstico y análisis de riesgos con orientación gráfica, que utiliza la técnica de Monte-Carlo para calcular la incertidumbre y la sensibilidad.[4]. Su aplicación es

diversa, contribuye a la optimización de los recursos escasos, maximizar la rentabilidad o pronosticar la efectividad del desempeño entre otros y al ser una suite de aplicaciones en hojas de cálculo posibilita realizar simulaciones y predicciones permitiendo una visión de aquellos factores críticos que puedan afectar el riesgo del análisis y tomar decisiones para lograr los objetivos propuestos.[5].

La evaluación de la confiabilidad es una actividad crucial para garantizar el funcionamiento de diversos sistemas y el resultado de esta incluye cuantificar las métricas relacionadas con la confiabilidad, disponibilidad, el mantenimiento y la seguridad. El desarrollo de metodologías asistidas por computadora apoyan la evaluación de la confiabilidad y contribuyen a automatizar y reducir los esfuerzos que implica este proceso.[6]

El análisis del árbol de fallas y los diagramas de bloques de confiabilidad son empleados para el modelado estocástico y la evaluación de la confiabilidad.[6]

En la industria manufacturera se exige un alto desempeño de las máquinas para evitar pérdidas económicas, en esa medida se requiere que el equipamiento no presenten fallos imprevistos en su funcionamiento ya que pueden acarrear consecuencias inestimables. Esto significa que los riesgos potenciales que contribuyen al fallo de equipos industriales tienen que ser identificados y reducidos o en lo posible eliminados. En este sentido, el departamento responsable cuenta con el mantenimiento y su gestión como una herramienta que se enfoca esencialmente en asegurar el funcionamiento, en términos de efectividad, confiabilidad y disponibilidad de los equipos de uso industrial.[7].

Una manufactura con óptimos estándares de calidad está apuntalada por la alta confiabilidad de sus equipos y sistemas, es aquí donde la Ingeniería de mantenimiento tiene la responsabilidad de planear el control y mejoramiento continuo de su equipamiento crítico mediante algún enfoque, como Six Sigma. Este se nutre de numerosas herramientas estadísticas destacando, entre ellas, a las cartas de control estadístico de procesos. Si bien sus primeras aplicaciones fueron en producción, otros diseños surgieron para adaptarse a nuevas necesidades como el monitoreo de los equipos y sistemas en el hábitat fabril. El tiempo entre fallas suele ajustarse a un modelo Exponencial o Weibull. Las cartas t y t ajustada, con límites probabilísticos de control, son alternativas aptas para monitorear el tiempo medio entre fallas. [8]

La eficacia general del equipo (OEE) es un indicador utilizado en la gestión y mejora continua de los sistemas de producción, y es útil en la identificación de pérdidas, reduciendo así los costos de producción. Al analizar los resultados de este indicador, el gerente de operaciones debe tomar decisiones para eliminar o reducir las pérdidas en el proceso, la implementación de acciones para mejorar el índice de calidad OEE proporcionar información importante que permite al gerente de operaciones diagnosticar y minimizar la ocurrencia de fallas y pérdidas, que a menudo está oculta y es

desconocida para los involucrados en el sistema de producción. [9].

La importancia y la necesidad de la gestión de los equipos han dado lugar al desarrollo de diferentes métodos de gestión de los equipos. Los métodos se desarrollaron para satisfacer las necesidades de la época. La bibliografía destaca cinco métodos de mantenimiento diferentes que se desarrollaron en un momento determinado.[10]

El mantenimiento involucra acciones técnicas y administrativas, incluyendo las operaciones de supervisión y control, destinadas a mantener (mantenimiento preventivo) o restablecer (mantenimiento correctivo) el equipamiento, en un estado determinado o condiciones de fiabilidad (disponibilidad, fiabilidad, mantenibilidad y seguridad) que le permitan realizar una función requerida. [11]

Respecto a las tareas relacionadas con rutinas de mantenimiento preventivo, es necesario precisar que para administrar con efectividad el mismo se requiere de un proceso en el cual las actividades relacionadas con la identificación, planeación, programación y la ejecución del trabajo se combinen correctamente, usando indicadores pertinentes que verifiquen el desempeño previsto.[12]

La productividad en las industrias y el que estas mantengan un alto nivel de rendimiento requieren de una planificación y programación precisas y, el éxito o fracaso en las estimaciones efectuadas dependerán de factores como disponer de un sistema de mantenimiento adecuado; en esa medida, independientemente de las prácticas de planificación y programación convencionales de mantenimiento preventivo, la aplicación de modelos dinámicos empleando simulación toman como referencia parámetros asociados a políticas de mantenimiento tanto fijas o cambiantes, y evalúan el impacto de estos parámetros en los resultados que muestra éstos sistemas dinámicos. [11].

El caso estudio presenta el modelamiento estadístico del comportamiento de la productividad utilizando el Crystal Ball para analizar la gestión de mantenimiento en una empresa que fabrica cartón corrugado. De esta forma se ha simulado un proceso industrial evaluando el tratamiento de la Gestión del mantenimiento preventivo y su impacto en la mejorar de la productividad de la organización en términos de eficiencia y eficacia.

Por los resultados obtenidos de la simulación con el Crystal Ball, tenemos que como consecuencia de la gestión del mantenimiento preventivo se demostró su influencia en la productividad, aumentando desde el 56.13% al 61.84%, con un nivel de certeza que supera el 95%. Asimismo se lograron incrementos en la eficiencia y la eficacia.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue de tipo aplicada y enfoque cuantitativo, con diseño no experimental. Las variables del estudio fueron Gestión de Mantenimiento preventivo, como

variable independiente, siendo sus dimensiones: Disponibilidad y Confiabilidad. La variable dependiente fue la Productividad siendo sus dimensiones la eficiencia y eficacia.

La hipótesis general propuesta fue: La gestión del mantenimiento preventivo mediante la simulación con Crystal Ball mejora la productividad en una empresa fabricante de cartón. El objetivo general propuesto fue: Determinar cómo la gestión de mantenimiento preventivo mediante la simulación con Crystal Ball mejora la productividad en una empresa fabricante de cartón.

Para el registro de la información se utilizaron como instrumentos las fichas de registro de mantenimiento preventivo y las fichas de registro de productividad. La información referida a las dimensiones de Gestión de Mantenimiento y Productividad, se procesaron mediante el software Crystal Ball®.

La población de estudio fue la producción de bandejas utilizada como envases para huevos como se observa en la Fig. 1. El criterio de inclusión fue la producción durante la jornada laboral semanal en un turno de 08 horas. Como criterio de exclusión la producción de los días domingos y feriados.



Fig. 1. Bandeja para huevo

El muestreo fue no probabilístico y se tomó como muestra la producción de bandejas durante 26 días. Con los resultados de la simulación se hizo la prueba de hipótesis correspondiente. Se hizo la comparación de medias Pre y Post Test, y mediante la Prueba de normalidad se determinó el estadígrafo a ser utilizado.

El Crystal Ball report, opera en el entorno excel como un complemento habilitado efectuando la selección de miles de números aleatorios de Monte Carlo, presentando los reportes de salida de la simulación. Como procedimiento dinámico de evaluación posibilita determinar la productividad post test, obtener un reporte visual del histograma y las estadísticas de la media, la moda, la desviación estándar y la Curtosis para explicar los resultados de la corrida.[4].

El computador simula el proceso industrial evaluando el tratamiento de la Gestión del mantenimiento preventivo y su impacto en la planta para mejorar la productividad en la producción de bandejas en la empresa. Para la modelación se delinean las operaciones propias de la productividad, se construye la hoja de cálculo en Excel, introduciéndose la data pre test y se obtiene el valor simulado de la productividad post test, como consecuencia de las interacciones que efectúa el programa. [4]. El proceso de simulación dinámica que se emplea en esta investigación, permite observar el Análisis de

Sensibilidad e identificar el cuello de botella que restringe la productividad.

III. RESULTADOS

A. Cálculos para la variable gestión de mantenimiento preventivo

En la tabla I, se detallan los resultados Pre test para la variable gestión de mantenimiento preventivo en función a los indicadores: la disponibilidad calculada a partir del tiempo medio entre fallas - MTBF y tiempo medio de reparación - MTTR.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (1)$$

La confiabilidad fue calculada a partir de la tasa de fallas:

$$\text{Tasa de fallas} = \frac{\text{Número de fallas}}{\text{Unidades examinadas}} \quad (2)$$

TABLA I
RESULTADOS DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Días	Gestión de mantenimiento preventivo	
	Disponibilidad	Confiabilidad
1	71.58%	66.67%
2	70.83%	66.67%
3	68.50%	60.00%
4	58.25%	50.00%
5	71.25%	66.67%
6	75.00%	66.67%
7	75.83%	66.67%
8	69.17%	75.00%
9	75.42%	66.67%
10	76.75%	66.67%
11	71.00%	60.00%
12	75.58%	50.00%
13	75.75%	66.67%
14	50.00%	50.00%
15	75.17%	66.67%
16	77.08%	66.67%
17	69.50%	60.00%
18	71.42%	66.67%
19	76.08%	66.67%
20	68.33%	50.00%
21	75.25%	50.00%
22	71.25%	60.00%
23	66.50%	60.00%
24	63.00%	60.00%
25	75.67%	66.67%
26	69.17%	60.00%

B. Cálculos para la variable productividad

En la tabla II, se detallan los resultados Pre test para la variable productividad en función a las dimensiones eficiencia

y eficacia cuyos indicadores se muestran en las ecuaciones (3) y (4) respectivamente. La productividad se calcula con la fórmula de la ecuación (5).

$$\text{Indice de eficiencia} = \text{Tiempo real} / \text{Tiempo programado} \quad (3)$$

$$\text{Indice de eficacia} = \text{Unidades producidas} / \text{Unidades programadas} \quad (4)$$

$$\text{Productividad} = \text{Eficiencia} * \text{Eficacia} \quad (5)$$

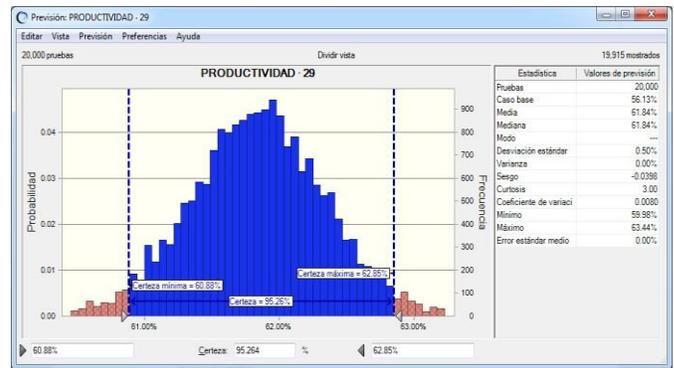


Fig. 2. Histograma de productividad

TABLA II
RESULTADOS DE LA PRODUCTIVIDAD PRE TEST

Dias	Productividad		
	Eficiencia	Eficacia	Productividad
1	73.85%	83.52%	61.68%
2	69.37%	78.46%	54.43%
3	69.29%	78.37%	54.31%
4	44.30%	50.10%	22.20%
5	73.65%	83.30%	61.34%
6	70.99%	80.30%	57.00%
7	74.05%	83.75%	62.02%
8	69.96%	79.12%	55.35%
9	71.90%	81.31%	58.46%
10	72.88%	82.43%	60.07%
11	71.60%	80.98%	57.98%
12	73.09%	82.67%	60.42%
13	72.77%	82.30%	59.89%
14	44.55%	50.39%	22.45%
15	71.63%	81.01%	58.02%
16	72.96%	82.52%	60.21%
17	70.20%	79.40%	55.74%
18	74.27%	84.00%	62.39%
19	74.47%	84.23%	62.73%
20	72.58%	82.09%	59.58%
21	73.94%	83.63%	61.84%
22	72.28%	81.75%	59.09%
23	70.21%	79.41%	55.75%
24	69.44%	78.53%	54.53%
25	72.77%	82.30%	59.89%
26	73.94%	83.63%	61.84%
	70.04%	79.21%	56.12%

C. Ingreso de datos de productividad pre test para el cálculo de la productividad post test

En la Fig. 2, después de 20,000 interacciones de simulación, la productividad estará entre el 60.88% al 62.85% con una certeza del 95,264%; y que las medias de la productividad pre y post mejoren desde 56.12% a 61,84%, respectivamente

D. Análisis de sensibilidad de productividad post test

El proceso de simulación dinámica nos permite realizar el análisis de sensibilidad. Este gráfico nos reporta las actividades o ítems de la hoja de cálculo del modelo de simulación, aporta los valores porcentuales de la variable más importante y de la más débil o la que aporta con mínima fuerza. En este caso el reporte del día 20 es el que mayor aporte presenta con un 5% . De esta manera, también estamos en condición de fortalecer el cuello de botella que restringe la productividad.

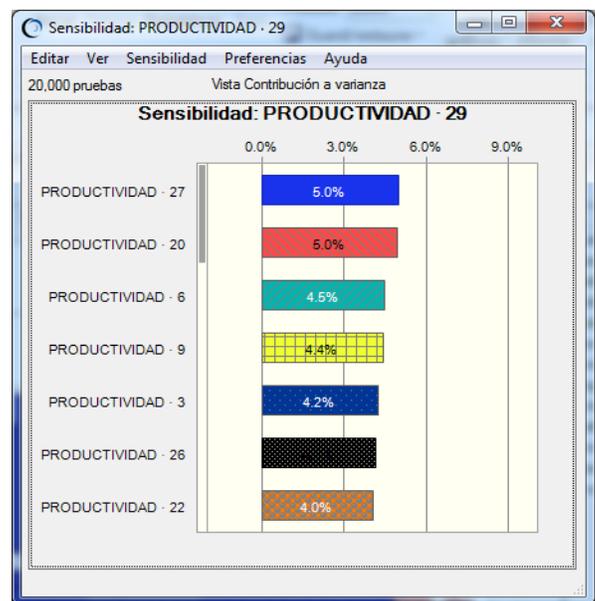


Fig. 3. Análisis de sensibilidad de la productividad

E. Comparativos de la productividad pre y post test

La tabla III adjunta recoge el comparativo de la productividad pre y la simulación de la misma para el pos test que ha sido estimada con el Crystal Ball.

En el caso de la productividad post el rango inferior fue del 60.8% y el valor máximo obtenido fue 61.86%.

Asimismo se puede estimar la relación entre los datos

mediante el cálculo del R^2 . Los resultados obtenidos muestran una alta correlación, la misma que está en el orden de 0.9977, tanto para la eficiencia y eficacia pre test. Ver Fig. 4 y 5.

TABLA III
COMPARATIVOS DE LA PRODUCTIVIDAD PRE Y POST TEST

Días	Productividad	
	Pre	Post
1	61.84%	61.83%
2	54.42%	61.86%
3	54.30%	61.85%
4	22.20%	61.86%
5	61.35%	61.84%
6	57.00%	61.86%
7	62.02%	61.83%
8	55.35%	61.80%
9	58.46%	61.85%
10	60.08%	61.84%
11	57.98%	61.84%
12	60.42%	61.84%
13	59.90%	61.84%
14	22.45%	61.80%
15	58.03%	61.82%
16	60.21%	61.88%
17	55.74%	61.82%
18	62.39%	61.85%
19	62.73%	61.82%
20	59.58%	61.86%
21	61.84%	61.82%
22	59.09%	61.84%
23	55.75%	61.85%
24	54.53%	61.83%
25	59.89%	61.86%
26	61.84%	61.86%

F. Ingreso de datos de eficiencia pre test para el cálculo de la eficiencia post test

De igual manera se simulan los resultados de eficiencia, siendo el rango entre 72.65% y 75% con un nivel de certeza del 95.085%. Ver Fig. 6.

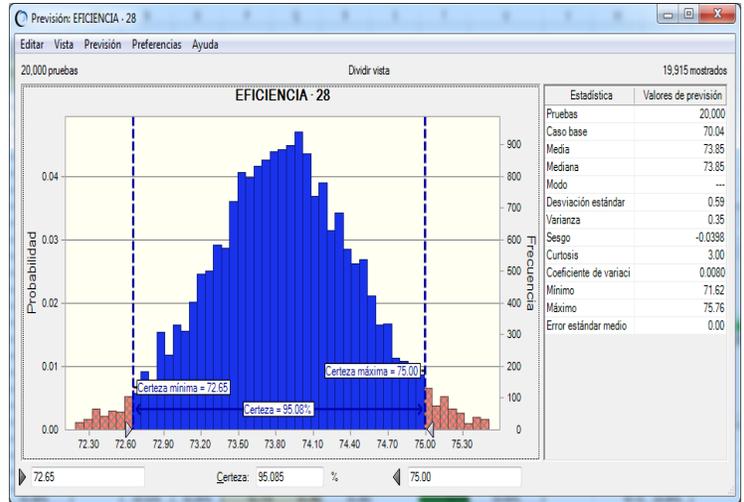


Fig. 6. Histograma de Eficiencia

G. Comparativo de la eficiencia pre y post test

La tabla IV adjunta recoge el comparativo de la eficiencia pre y post test la misma que ha sido estimada con el Crystal Ball.

En el caso de la post test la eficiencia que estimó el Crystal Ball, después de su interacción fue del 74%.

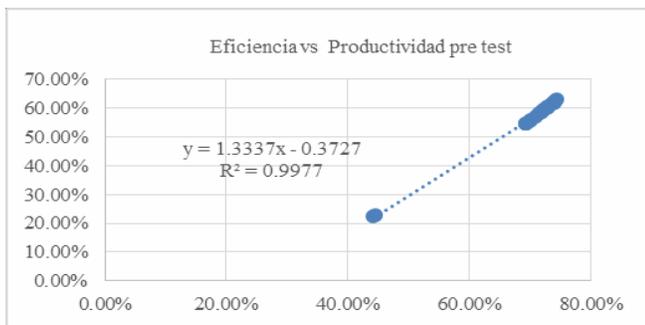


Fig.4. Estimación del valor R^2 para la eficiencia

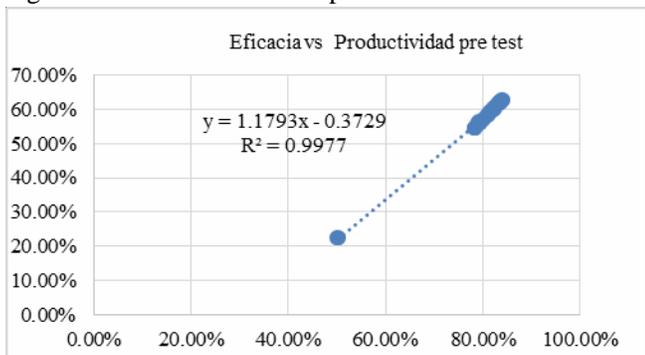


Fig.5. Estimación del valor R^2 para la eficiencia

TABLA IV
COMPARATIVOS DE LA EFICIENCIA PRE Y POST TEST

Dias	Eficiencia	
	Pre	Post
1	73.85%	74%
2	69.37%	74%
3	69.29%	74%
4	44.30%	74%
5	73.65%	74%
6	70.99%	74%
7	74.05%	74%
8	69.96%	74%
9	71.90%	74%
10	72.88%	74%
11	71.60%	74%
12	73.09%	74%
13	72.77%	74%
14	44.55%	74%
15	71.63%	74%
16	72.96%	74%
17	70.20%	74%
18	74.27%	74%
19	74.47%	74%
20	72.58%	74%
21	73.94%	74%
22	72.28%	74%
23	70.21%	74%
24	69.44%	74%
25	72.77%	74%
26	73.94%	74%

Asimismo se puede estimar la relación entre los datos mediante el cálculo del R^2 . Los resultados obtenidos muestran una alta correlación para la eficiencia y productividad post test, la misma que está en el orden de 0.9775. Ver Fig. 7

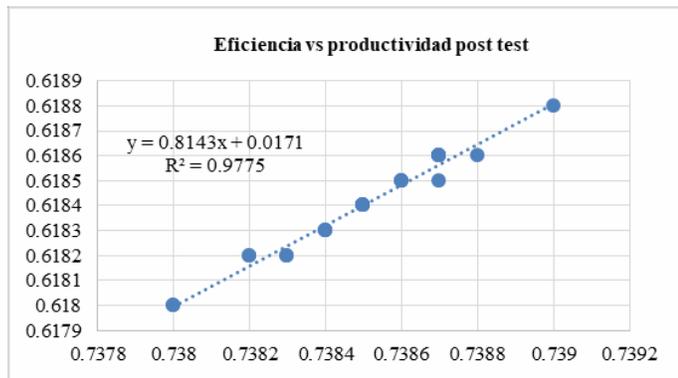


Fig.7. Estimación del valor R^2 para la eficiencia

G. Ingreso de datos de eficacia pre test para el cálculo de la eficacia post test

De igual manera se simulan los resultados de eficacia, siendo el rango entre 82.23% y 84.91% con un nivel de certeza del 95.338%. Ver Fig. 8.

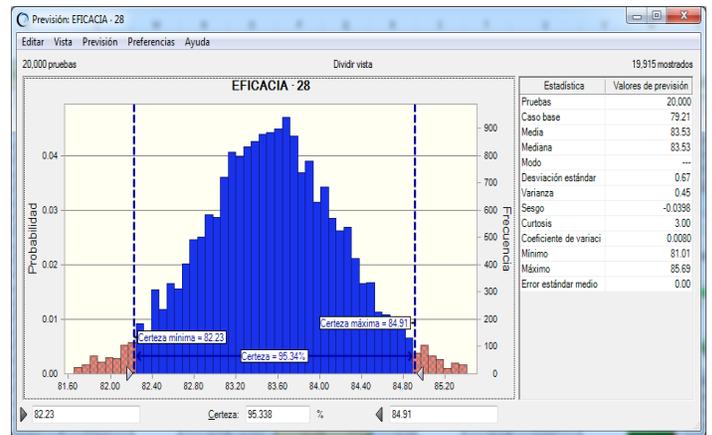


Fig. 8. Histograma de la Eficacia

H. Comparativo de la eficacia pre y post test

La tabla V adjunta recoge el comparativo de la eficacia pre y post test la misma que ha sido estimada con el Crystal Ball.

En el caso de la post test la eficacia que estimo el Crystal Ball, estuvo en el rango de un valor mínimo de 83.47% y un máximo de 83.56%.

TABLA V
COMPARATIVOS DE LA EFICACIA PRE Y POST TEST

Dias	Eficacia	
	Pre	Post
1	83.53%	83.52%
2	78.45%	83.56%
3	78.37%	83.54%
4	50.11%	83.56%
5	83.30%	83.53%
6	80.29%	83.56%
7	83.75%	83.52%
8	79.12%	83.47%
9	81.31%	83.54%
10	82.43%	83.53%
11	80.98%	83.53%
12	82.67%	83.53%
13	82.31%	83.53%
14	50.39%	83.48%
15	81.01%	83.50%
16	82.52%	83.58%
17	79.40%	83.50%
18	84.00%	83.55%
19	84.23%	83.51%
20	82.09%	83.56%
21	83.63%	83.51%
22	81.75%	83.54%
23	79.41%	83.54%
24	78.54%	83.52%
25	82.30%	83.56%
26	83.63%	83.55%

Asimismo se puede estimar la relación entre los datos mediante el cálculo del R^2 . Los resultados obtenidos muestran una alta correlación para la eficacia y productividad post test, la

misma que está en el orden de 0.9731. Ver Fig. 9.

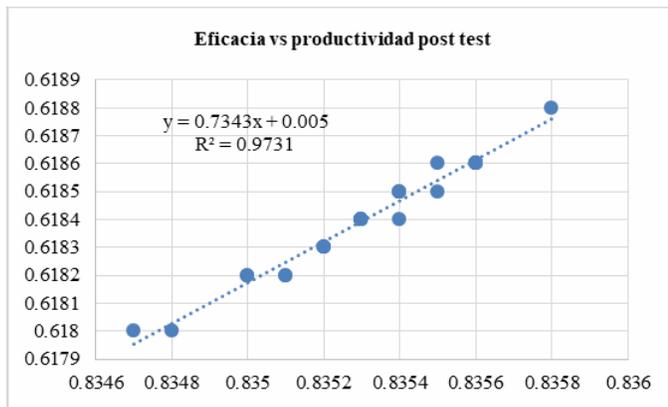


Fig. 9. Estimación del valor R^2 para la eficacia

IV. DISCUSIONES

Así como, se ha demostrado el incremento de la productividad el cual ha sido evidenciado mediante la aplicación del Crystal Ball, que se sustenta en el Método Montecarlo, concordante con la investigación de [13] quien, simuló la implementación de un modelo para evaluar el periodo óptimo de mantenimiento preventivo de un rodamiento de una bomba centrífuga. Se posibilitó evaluar el periodo óptimo de mantenimiento preventivo que minimice el costo del mismo por unidad de tiempo. Para ello un modelo estocástico híbrido que involucra la simulación de Montecarlo, demostró que el periodo óptimo de mantenimiento preventivo es significativamente menor al método tradicional.

El modelamiento de las actividades de mantenimiento preventivo empleando el Crystal Ball y la simulación Montecarlo nos permitirá mejorar la disponibilidad del equipamiento, pues al generarse diversos escenarios tendremos la posibilidad de generar programas de mantenimiento adecuados. Lo mencionado es respaldado por [14], debido a que el estudio de la productividad del equipamiento es de importancia, no solo por el costo de inversión que representa sino también por el costo operativo que significan las paradas del mismo. Las principales pérdidas que influyen en la productividad de los equipos se asocian al rendimiento, el aprovechamiento y su utilización. La planificación y ejecución del mantenimiento contribuye a la operatividad de los equipos aunque no puede garantizar la productividad y cobertura de los costos operativos.

El planeamiento de un programa de mantenimiento “smart” contribuye a incrementar la productividad, para ello es importante la identificación de equipamiento crítico y el desarrollo de la secuencia de actividades que posibiliten a la organización incrementar su productividad en términos de eficiencia y eficacia. Para ello la información de la productividad es importante para realizar esta identificación y

contribuirán a la elección de la herramienta de evaluación y sus resultados ayudaran a la toma de decisiones.[15]. Lo mencionado por el autor coincide con los resultados para los cálculos del modelamiento con el Crystal Ball, pues luego de la simulación los resultados muestran un aumento tanto en la eficiencia como en la eficacia que van del 73.85% al 83.53% respectivamente.

La probabilidad de fallas de un sistema tiene diferentes comportamientos, que van desde el periodo de vida del equipo, fallas decrecientes, constantes o crecientes, según el tipo del mismo. La distribución de Weibull se ajusta a los tiempos de falla cuando sus razones se aumentan o disminuyen en el tiempo. [16]. Del mismo modo los pronósticos y análisis de sensibilidad que se obtienen con el Crystal Ball y que incorpora en su modelamiento la simulación de Montecarlo, nos permite pronosticar el comportamiento de las dimensiones de la productividad con un nivel de certeza alto.

IV. CONCLUSION

En función a los resultados obtenidos de la simulación con el software, se desprende que de aplicarse la gestión del mantenimiento preventivo la eficiencia se ve influenciada y aumentó del 70.04% al 73.85%, tomando en consideración que los cálculos que proporciona el Crystal Ball, tienen un nivel de certeza que supera el 95%.

En función a los resultados obtenidos de la simulación con el software, se desprende que de aplicarse la gestión del mantenimiento preventivo la eficacia se ve influenciada y aumentó del 79.21% al 83.53%, tomando en consideración que los cálculos que proporciona el Crystal Ball, tienen un nivel de certeza que supera el 95.3%.

En función a los resultados obtenidos de la simulación con el software, se desprende que de aplicarse la gestión del mantenimiento preventivo la productividad se ve influenciada y aumentó del 56.13% al 61.84%, tomando en consideración que los cálculos que proporciona el Crystal Ball, tienen un nivel de certeza que supera el 95%.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad César Vallejo por el soporte en el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] A. Bhat y A. Kumar, «Application of the Crystal Ball (R) software for uncertainty and sensitivity analyses for predicted concentration and risk levels», *Environmental Progress*, vol. 27, pp. 289-294, oct. 2008, doi: 10.1002/ep.10308.

- [2] A. Saltelli y P. Annoni, «Sensitivity Analysis», 2010. doi: 10.1007/978-3-642-04898-2_509.
- [3] E. Abu-taieh, A. Rahman, y A. El Sheikh, «Commercial simulation packages: A comparative study», *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, vol. 8, jul. 2007.
- [4] J. Mun, *Simulador de Riesgo - Manual de Usuario en Español*, Real Options Valuation Inc. California, 2014.
- [5] EPM Information Development Team, *Oracle® Crystal Ball, Fusion Edition*, 2011.^a ed. U.S.A: ENTERPRICE PERFORMANCE MANAGEMENT SYSTEM. [En línea]. Disponible en: https://docs.oracle.com/cd/E36352_01/epm.1112/cb_user.pdf
- [6] «SHyFTOO, an object-oriented Monte Carlo simulation library for the modeling of Stochastic Hybrid Fault Tree Automaton | Elsevier Enhanced Reader». <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0957417419308565?token=214D00A4BDB5B0BE136156624925750FFC6B988F0BBDE92FA6853AD1357A98D64643C6878408A51F8EF35342875BBB27&originRegion=us-east-1&originCreation=20220530102533> (accedido 30 de mayo de 2022).
- [7] M. V. Cuzco *et al.*, «Evaluación de la gestión del mantenimiento en hospitales del instituto ecuatoriano de seguridad social de la zona 3 del Ecuador», *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, n.º 22, pp. 59-71, dic. 2019, Accedido: 16 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1390-860X2019000200059&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [8] Q. Alicia Esther, «Desempeño de cartas de control estadístico con límites bilaterales de probabilidad para monitorear procesos Weibull en mantenimiento», *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 16, n.º 1, pp. 143-156, ene. 2015, doi: 10.1016/S1405-7743(15)72115-3.
- [9] D. D. Silveira y J. J. de O. Andrade, «Application of OEE for productivity analysis: a case study of a production line from the pulp and paper industry», *DYNA*, vol. 86, n.º 211, pp. 9-16, 2019, Accedido: 16 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/496/49663345001/>
- [10] I. Ahuja, J. Khamba, y R. Choudhary, *Improved Organizational Behavior Through Strategic Total Productive Maintenance Implementation*. 2006. doi: 10.1115/IMECE2006-15783.
- [11] R. Hamidane, H. Mouss, A. Bellarbi, y R. Mahdaoui, *Implementation of a Preventive Maintenance System Based on Augmented Reality*. 2018. doi: 10.1109/PAIS.2018.8598510.
- [12] A. H. Gómez, C. E. Toledo, J. M. L. Prado, y S. N. Morales, «Factores críticos de éxito para el despliegue del mantenimiento productivo total en plantas de la industria maquiladora para la exportación en Ciudad Juárez: una solución factorial», *Contaduría y Administración*, vol. 60, pp. 82-106, oct. 2015, doi: 10.1016/j.cya.2015.08.005.
- [13] D. D'Urso, A. Sinatra, L. Compagno, y F. Chiacchio, «Assessment of the optimal preventive maintenance period using stochastic hybrid modelling», *Procedia Computer Science*, vol. 200, pp. 1664-1673, ene. 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.01.367.
- [14] E. Guerra-López y A. M. de Oca-Risco, «Relación entre la productividad, el mantenimiento y el reemplazo del equipamiento minero en la gran minería», *Boletín de Ciencias de la Tierra*, n.º 45, pp. 14-21, 2019, Accedido: 30 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/1695/169559150002/html/>
- [15] M. Gopalakrishnan, A. Skoogh, A. Salonen, y M. Asp, «Machine criticality assessment for productivity improvement: Smart maintenance decision support», *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 68, n.º 5, pp. 858-878, ene. 2019, doi: 10.1108/IJPPM-03-2018-0091.
- [16] C. Vásquez, M. Luna, y R. Pérez, «Interrupciones del suministro eléctrico: Una revisión de su impacto y de las técnicas de mantenimiento preventivo», p. 10, 2012.