

Propuesta de mantenimiento de un sistema de suministro de aire por el Método de los Elementos Finitos

Analysis by the Finite Element Method and maintenance proposal for an air supply system

Jesús Manuel Viera Callar jviera@ecg.minem.cu ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0009-0001-3178-1984>

Rosendo Jahaziel Rosabal Hernández rrosabal@mecanica.ismm.edu.cu ⁽²⁾

<https://orcid.org/0009-0005-7663-5947>

Uberlandi Torrell Quinta utorrel@ismm.edu.cu ⁽²⁾

<https://orcid.org/0009-0000-8939-4170>

⁽¹⁾ Empresa Niquelífera Ernesto Che Guevara, Moa, Cuba

⁽²⁾ Universidad de Moa, Moa, Cuba

Resumen: En este trabajo se propone un sistema de mantenimiento predictivo para un tanque de almacenamiento de un sistema de suministro de aire por el método de elementos finitos. Para ello se determinaron las condiciones de resistencia o las tensiones en el tanque como parte de una comprobación del diseño, a fin de verificar si resistiría la presión a la cual estaría sometido, donde, para una presión de 4 bares el factor de seguridad es de 2,4, lo que demuestra que no habrá roturas en el mismo. Según estos resultados, al sistema en su conjunto se le propone un mantenimiento predictivo. La propuesta presenta una duración de 20 000 horas-máquinas con 12 revisiones, 4 reparaciones pequeñas, 1 reparación mediana y 1 reparación general, con un tiempo entre reparaciones medianas de 10 000 horas-máquinas, el periodo entre reparaciones pequeñas de 3 333,33 horas-máquinas y el período entre intervenciones de 1 111,11 horas-máquinas.

Palabras claves: almacenamiento de aire, gestión de mantenimiento, métodos numéricos

Abstract: In this work, the analysis by the Finite Element Method of the storage tank of the air supply system is carried out. The conditions of resistance or stresses in the tank are determined as part of a design check, in order to verify if it would withstand the pressure to which it would be subjected, where, for a pressure of 4 bars, the safety factor is 2.4, which shows that there will be no breaks in it. Given all these results, the system as a whole is proposed a predictive maintenance. The proposal presents a duration of 20 000 machine-hours with 12 revisions, 4 small repairs, 1 medium repair and 1 general repair. With a time between medium repairs of ($trm = 10\ 000$) machine-hours, the period between small repairs ($tr = 3\ 333.33$) machine-hours and the period between interventions ($to = 1\ 111.11$) machine-hours.

Keywords: air storage, maintenance management, numerical methods

Introducción

El mantenimiento predictivo se define como la revisión de máquinas y equipos para su buen funcionamiento, evitando fallos futuros (Arroyo & Obando, 2022). Tiene un carácter sistemático, se realiza en tiempos y rutinas programadas que monitorean el estado del equipo con la intención de mantener su funcionamiento y disminuir el desgaste (Alvarez, Lozano & Bravo, 2022; Nunes, Santos & Rocha, 2023). Comprende todas las actividades para la conservación y cuidado (Pillado Castillo & de la Riva, 2022; Crespo, Arias & Zhigüe, 2024), permite asegurar la calidad del producto y minimizar las paradas no planificadas (Tiddens, Braaksma & Tinga, 2020; Lee *et al.*, 2020; Hernández-Montero, Anías-Calderón & Ruiz-Barrios, 2023).

El método de elementos finitos es muy útil para el diseño y mantenimiento predictivo de sistemas y equipos mecánicos (Ramírez *et al.*, 2022; Orejuela-Mendoza *et al.*, 2024; Simbaña *et al.*, 2024; Simbaña *et al.*, 2025) ya que permite aumentar la confiabilidad, eficiencia y perdurabilidad de los equipos. Autores como Nacimento & Cardoso (2024), Medina *et al.* (2024) y Pineda (2025) han demostrado la conveniencia del método para la predicción de futuras fallas lo que permite anticipar y revertir desgastes y averías.

Los sistemas de suministro de aire facilitan la distribución del aire en el espacio, utilizando diferentes diseños y materiales. Permiten crear ambientes favorables a través de la renovación del aire contribuyendo a la productividad y el bienestar humano, por lo que su eficiencia y desempeño son necesarios en diversos escenarios. En este trabajo se propone un sistema de mantenimiento predictivo a través del Método de Elementos

Finitos para un tanque de almacenamiento perteneciente a un sistema de suministro de aire.

Materiales y métodos

Se empleó el software SolidWorks 2020 (Montijo & Martínez, 2020; Mustapha, 2022) para modelar y simular los componentes del sistema de suministro de aire. Este software permite crear modelos 3D, realizar simulaciones y generar planos de fabricación. Según Torrell Quinta *et al.* (2024), para modelar con precisión las piezas, especialmente los elementos sometidos a presión, es crucial tomar medidas precisas.

Se realizaron simulaciones por el método de elementos finitos para determinar los parámetros óptimos de los elementos sometidos a presión. Estas simulaciones permiten evaluar el efecto de las tensiones, los desplazamientos y la seguridad. La metodología empleada para el proceso de simulación se ilustra en la Figura 1.

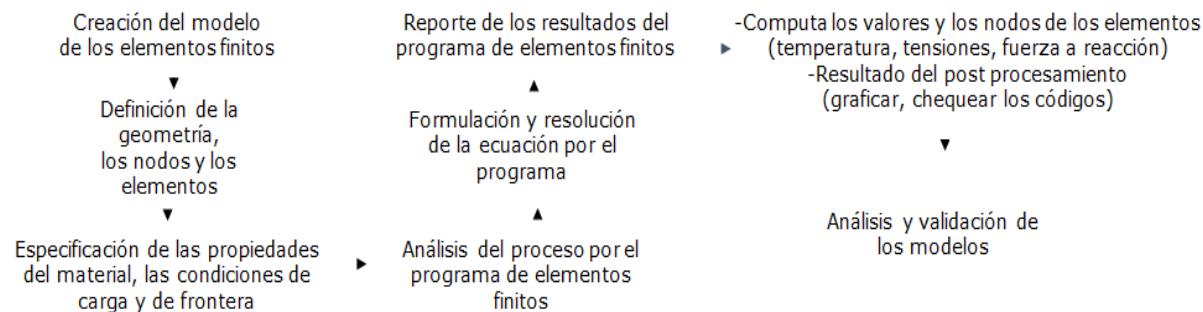


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de simulación.

Se utilizó el método de Von Mises para la realización de la simulación de tensión máxima, criterio de resistencia estática, aplicado a materiales dúctiles.

Modelado y simulación del tanque de almacenamiento

Verificación experimental

Con los resultados, se llevará a cabo un estudio al tanque de almacenamiento para verificar su diseño y capacidad para soportar las condiciones a las que estará expuesto. Este análisis abarcará varios aspectos, incluida la resistencia estructural del tanque, su capacidad de contención del fluido de manera segura y su respuesta ante cargas internas, como la presión. Se evaluará la resistencia del material empleado para verificar si resiste las presiones internas generadas por el fluido almacenado.

Mallado del modelo

En el proceso de simulación, tras haber definido los materiales y sus propiedades y generar la geometría, se construye la malla con el tipo de elemento elegido asociada a esa geometría. Para ello se debe especificar el tamaño medio del elemento, que podrá reducirse posteriormente. Se realizó un mallado fino de tipo elementos *Shell* de superficie y con elementos cuadráticos de alto nivel con un tamaño de 3,341 89 cm, y se estructuró con 11 464 nodos y 5 603 elementos (Figura 2).

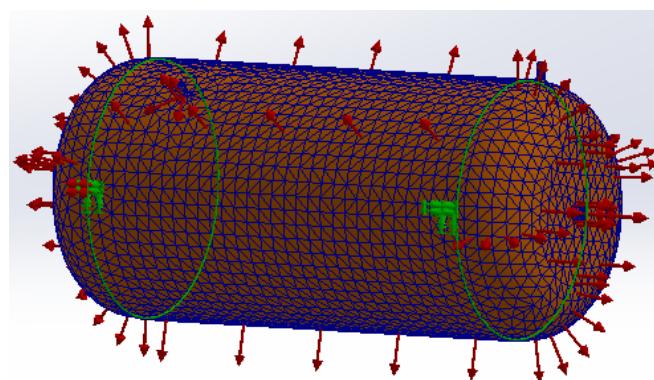


Figura 2. Mallado del modelo.

Condiciones de frontera

Definidas las cargas para el estudio de presión se limitan las restricciones, donde se debe suprimir el movimiento en las direcciones "X", "Y" y "Z", más no el giro, lo que se conoce como embridar la pieza a soldar (Figura 3).

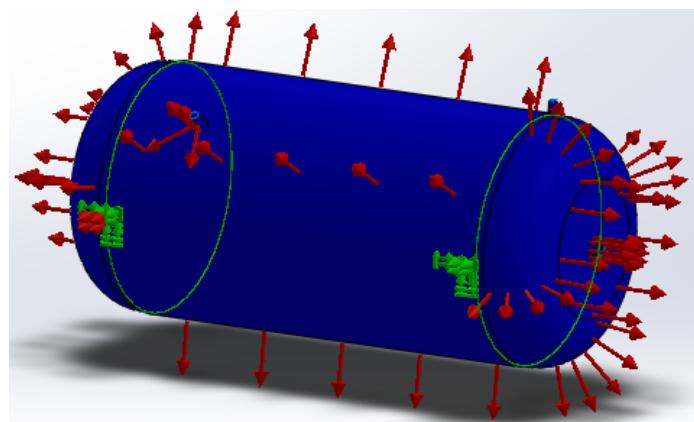


Figura 3. Condiciones de frontera para el sistema de suministro de aire comprimido.

Selección del tipo de mantenimiento

Smith (2016), da a conocer que para seleccionar el ciclo de mantenimiento se han presentado una serie de diferentes metodologías que analizan con distintas características, diferentes criterios que, aplicados a la máquina como un todo, permiten determinar qué sistema de mantenimiento es el más conveniente. Para esta selección se utilizará el criterio a nivel de máquina.

De acuerdo con lo expresado por Smith (2016), este criterio de máquina es uno de los métodos de análisis que se encarga de evaluar a un equipo o a una máquina como un todo, teniendo en cuenta una serie de aspectos que caracterizan a la misma, según una cadena de coeficientes que cuantifican cada uno de los aspectos a valorar, lo cual se realiza de la siguiente forma:

- C1: elevado costo de adquisición de la máquina,
- C2: alto costo por concepto de pérdidas de producción,
- C3: no existencia de duplicado de la máquina,
- C4: posibilidad de efectuar un diagnóstico de la máquina con la instrumentación disponible,
- C5: posibilidad de efectuar mediciones de control de parámetros globales tales como: niveles totales de vibración, temperatura y flujo,
- C6: elevado costo de mantenimiento de la máquina. Aquí se incluyen los gastos de materiales y de recursos humanos en un determinado período de tiempo,
- C7: elevadas pérdidas de vida útil debido al desarme. Se refiere a máquinas que por sus características técnicas constructivas sufren deterioro de su estado técnico debido al desarme,
- C8: graves consecuencias económicas de una rotura para la máquina. Considera que el deterioro de una de sus partes debido a un fallo haría muy costosa su reparación.

Los coeficientes que satisfacen la condición se establecen en 1, mientras que aquellos que no cumplen con la condición se fijan en 0 (Smith, 2016).

Determinación de los coeficientes

$$\text{Coeficiente de mantenimiento predictivo: } C_{\text{PRED}} = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_6}{4}$$

$$\text{Coeficiente de mantenimiento correctivo/preventivo: } C_{\text{CRR/PREV}} = \frac{C_{\text{PERDIDAS}} + C_{\text{FALLAS}}}{5}$$

Donde

$$C_{\text{PÉRDIDAS}} = C_1 + C_2 + C_6$$

$$C_{\text{FALLAS}} = C_7 + C_8$$

Al evaluar estos coeficientes y asignar valores a los parámetros correspondientes, se establecen criterios para la selección del sistema de mantenimiento más adecuado, considerando las características específicas del compresor y sus condiciones de operación. En la tabla 1 se muestran los criterios utilizados.

Tabla 1. Reglas para la selección del mantenimiento

Valor de los coeficientes	Sistema de mantenimiento
$C_{\text{CORR/ PREV}} = 0$	Correctivo
$C_{\text{PRED}} \leq 0,25$ $C_7=1$	Preventivo según índices de fiabilidad
$C_{\text{PRED}} > 0,5$ $C_4=4$ $C_5=1$	Preventivo con medición de parámetros y síntomas
$0,25 \leq C_{\text{PRED}} \leq 0,5$ $C_5 = 1$ $C_4=1$ y/o $C_5=1$	Predictivo
$C_{\text{PRED}} > 0,5$ $C_4=1$	

Después de haber evaluado los coeficientes que describen al compresor y seleccionado el sistema de mantenimiento más adecuado, es fundamental llevar a cabo la evaluación del ciclo de mantenimiento. En esta etapa se definen y planifican las actividades de preservación que se realizarán a lo largo de la vida útil del compresor.

Evaluación del ciclo de mantenimiento

La evaluación del ciclo de mantenimiento consiste en determinar la periodicidad, la duración y la complejidad de las tareas de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo que se llevarán a cabo en el compresor. Esto incluye la programación de inspecciones regulares, el reemplazo de piezas desgastadas, la limpieza de componentes, la calibración de equipos, entre otras actividades necesarias para mantener el dispositivo en condiciones óptimas de funcionamiento (González, 2005).

La estructura o los elementos de mantenimiento necesarios frecuentemente la brinda el fabricante. El especialista puede además auxiliarse de estructuras de equipos similares cuando no se posea información al respecto o de metodologías de cálculo.

Durante la evaluación del ciclo de mantenimiento se deben considerar factores como la disponibilidad de recursos humanos y materiales, los tiempos de inactividad aceptables, los costos asociados a las actividades, entre otros aspectos relevantes para asegurar la eficiencia y efectividad del proceso, y garantizar que las acciones de mantenimiento se

realicen de manera oportuna y eficaz, contribuyendo a maximizar la disponibilidad y confiabilidad del compresor, así como a minimizar los costos operativos y los riesgos de fallas inesperadas.

Después de confeccionarse el ciclo de mantenimiento es necesario determinar la duración del mismo, la cual equivale al tiempo que media entre dos reparaciones generales, es también el tiempo neto que debe funcionar el equipo entre dos reparaciones generales, descontando el tiempo que se invierte en reparaciones y revisiones, para determinar o elegir la duración del ciclo de mantenimiento. Se puede utilizar el tiempo entre reparaciones expuesta por González (2005).

Períodos del ciclo de reparación

Una vez definido la estructura del ciclo de mantenimiento y su duración se podrá conocer el tiempo entre dos servicios consecutivos y entre dos reparaciones. Para ello pueden utilizarse los siguientes criterios:

Período entre reparaciones medianas: se denomina al tiempo de trabajo del equipo entre dos reparaciones medianas consecutivas planificadas, expresado en horas máquina:

$$t_{rm} = \frac{T}{NM + 1}$$

Período entre reparaciones: tiempo de trabajo del equipo entre dos reparaciones pequeñas planificadas, expresado en horas máquina:

$$t_r = \frac{T}{NM + NP + 1}$$

Período entre intervenciones: tiempo de trabajo del equipo entre dos intervenciones; o sea, entre dos revisiones inmediatas o entre una reparación y una revisión:

$$t_o = \frac{T}{NM + NP + NR + 1}$$

Donde:

t_{rm} : período que transcurre entre dos reparaciones medianas, horas-máquina

t_r : período que transcurre entre dos reparaciones consecutivas, horas-máquina

t_o : período que transcurre entre dos servicios de mantenimiento, horas-máquina

T: duración del ciclo de reparación; horas-máquina

NR: cantidad de revisiones, adimensional

NP: cantidad de reparaciones pequeñas, adimensional

NM: cantidad de reparaciones medianas, adimensional

Ensamble de los conjuntos

La figura 4 muestra el sistema de suministro de aire luego de haber sido ensamblados todos los conjuntos. El tanque con el compresor se muestra ubicado en la parte superior con cuatro tornillos fijándolo al mismo. El motor será colocado donde exista las ranuras. En la parte inferior se ubica el compresor hermético.

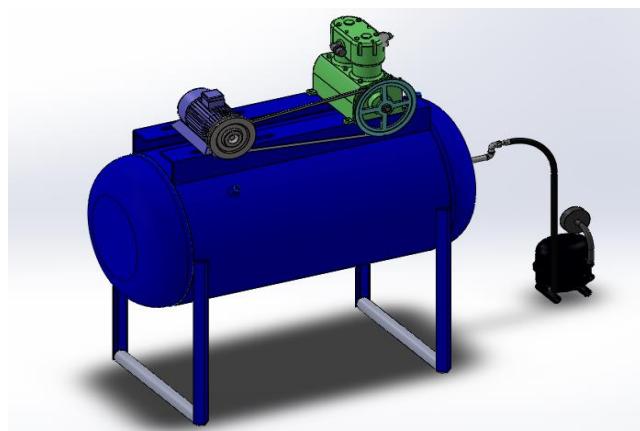


Figura 4. Ensamble del sistema de suministro de aire.

Análisis de tensiones

La figura 5 muestra las tensiones aplicadas en el tanque durante condiciones extremas. Se identificó que las tensiones alcanzan un valor mínimo de 0,021 MPa en las paredes, mientras que en los casquitos se alcanza el valor máximo de 78,414 MPa.

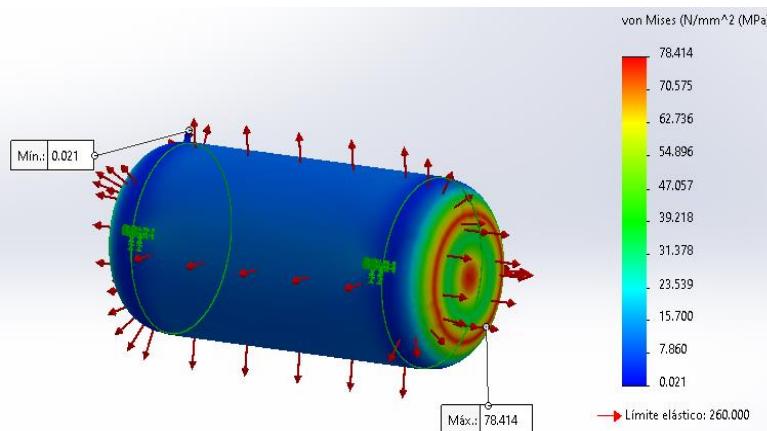


Figura 5. Tensión máxima del tanque de almacenamiento.

Análisis de los desplazamientos

De acuerdo con lo planteado por Torrell Quinta *et al.* (2024), el análisis de desplazamiento mediante el método de Von Mises, indica el estiramiento que posee el material al aplicarle o someterlo a una carga, lo que indica si puede ser cizallado o no en su funcionamiento, este valor máximo permitido debe ser menor a 1 mm. Todas las estructuras o componentes se deforman al ser cargadas, y el cambio de configuración geométrica hace que sus puntos experimenten pequeños desplazamientos, como se observa en la figura 6 donde los colores rojos corresponden a los valores máximos de desplazamiento y los que se acercan a la gama de color azul son los mínimos; de acuerdo a esto el desplazamiento máximo que puede sufrir el material del tanque en condiciones de operación.

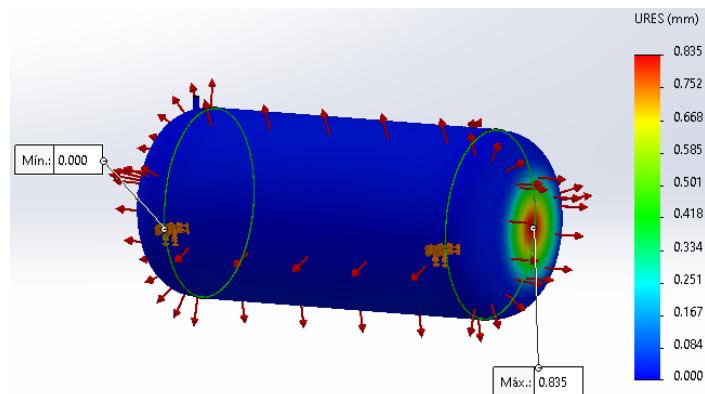


Figura 6. Análisis de desplazamiento del tanque de almacenamiento.

En el tanque, en condiciones de inicio de llenado, el desplazamiento comienza con un mínimo de 0,084 mm, en la medida en que va incrementándose la presión del aire en los casquitos alcanza un valor de 0,418; mientras se acerca al centro del casquete estos desplazamientos se incrementan a 0,835 mm, máximo admisible. Si se sobrepasa este valor se produce al agrietamiento por efecto de la presión.

Análisis del factor de seguridad

Refiere Torrell Quinta *et al.* (2024) que el factor de seguridad según el método de Von Mises debe ser superior a 1 para que el diseño de la parte o pieza sea aceptable y confiable en cuanto a la tensión o fuerza máxima. Al calcular este valor debe estar por encima de este parámetro para establecer que el componente analizado cumple con las

condiciones de cargas a las que se somete sin presentar deformación que afecte el funcionamiento del mismo.

En las condiciones a la que será sometido el tanque de almacenamiento, el factor de seguridad mínimo es 2,4 y máximo presente en la boquilla de la salida con un valor de 4,009, por lo cual se cumple la condición de ser mayor que 1 donde el elemento soportará las condiciones a las que será sometido por lo que no ofrece riesgos de deformación y cizallamiento (Figura 7). Se puede plantear que el factor de seguridad para el acero ASTM A512 reúne los requisitos para ser empleado para la fabricación del sistema de suministro de aire, teniendo en cuenta que el mismo va a trabajar en condiciones diferentes a la cual fue diseñado.

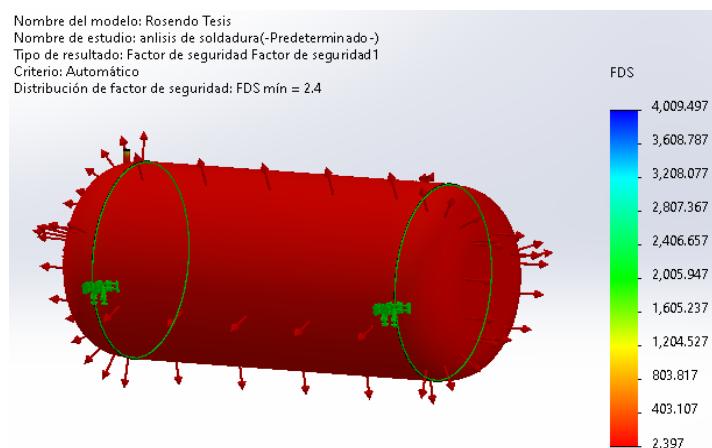


Figura 7. Análisis del factor de seguridad del tanque de almacenamiento.

Selección del sistema de mantenimiento

Este sistema de suministro de aire implica un elevado costo de adquisición en la industria debido a que consta con dos compresores. Estos son esenciales para garantizar un suministro adecuado de aire comprimido, especialmente en operaciones como el barnizado y la pintura. La presencia de dos compresores, uno abierto y otro cerrado, que operan según las necesidades específicas, refleja la complejidad del sistema de suministro de aire.

Esta capacidad de adaptación a las demandas cambiantes de producción asegura un suministro constante y óptimo de aire comprimido para las diversas operaciones, que requieren niveles específicos de presión y calidad. En la tabla 2 se presentan los resultados de los coeficientes de evaluación según el criterio a nivel de máquina.

Tabla 2. Coeficientes de evaluación según el criterio a nivel de máquina

Coeficiente	Comprende	Valor
C1	Elevado costo de adquisición de la máquina	1
C2	Alto costo por concepto de pérdidas de producción	1
C3	No existencia de duplicados de la máquina	0
C4	Posibilidad de efectuar un diagnóstico de la máquina con la instrumentación disponible	1
C5	Posibilidad de efectuar mediciones de control de parámetros globales tales como: vibraciones, temperatura y flujo	1
C6	Elevado costo de mantenimiento de la máquina	1
C7	Elevadas pérdidas de vida útil debido al desarme	0
C8	Graves consecuencias económicas de una rotura para la máquina	1

A partir de los valores de los coeficientes de evaluación según el criterio a nivel de máquina planteados en la tabla 2 se determinaron los coeficientes de mantenimiento predictivo y el coeficiente de mantenimiento correctivo/preventivo, los cuáles poseen un valor de 0,75 y 0,8 respectivamente, teniendo en cuenta para el coeficiente de mantenimiento correctivo/preventivo las $C_{PÉRDIDAS}$ y C_{FALLAS} con valores de 3 y 1 respectivamente.

Según los índices alcanzados y en correspondencia con la metodología propuesta el sistema de mantenimiento que debe aplicarse al sistema de suministro de aire teniendo en cuenta la tabla 1 es el mantenimiento preventivo con medición de parámetros y síntomas como: la temperatura, presión y vibraciones.

De acuerdo con Thielsen (1970) las vibraciones mecánicas deben revelarse en el mantenimiento preventivo y predictivo. El interés principal deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de las vibraciones detectadas en el equipo, la determinación de las causas, y la corrección del problema que ellas representan.

Una vez determinada la factibilidad y conveniencia de realizar un mantenimiento predictivo, es necesario determinar las variables físicas a controlar que sean indicativas de la condición del sistema. El objetivo es revisar en forma detallada las técnicas comúnmente usadas en el monitoreo según condición, de manera que sirvan de guía para su selección general, según lo reporta Chávez-Basantes (2004).

Propuesta para la estructura del ciclo de reparación

El ciclo a aplicar en cada equipo deberá determinarse en cada área de producción, analizando individualmente la máquina de trabajo, eligiéndose de acuerdo con la experiencia y datos que se posean del equipo. La duración del ciclo de reparación en

horas maquinas depende de las características constructivas del mismo, así como condiciones de explotación, tipos de producción.

En este caso el sistema de suministro de aire presenta dos compresores, un motor eléctrico y un regulador de presión que purifica el aire de contaminantes que puedan dañar el proceso de pintura. Para el compresor semihermético que pertenece a un ZIL 130, se estableció aplicar el mantenimiento a las 20 000 horas. A partir de este valor se realizará la propuesta de mantenimiento a todo el conjunto del sistema de suministro de aire.

Sobre las estructuras típicas de ciclos de mantenimiento para máquinas y equipos industriales se puede incluir al sistema dentro de los equipos del grupo 7, establece un rango de 17 280 a 20 160 horas máquinas entre reparaciones generales, eligiéndose como duración del ciclo de mantenimiento 20 000 horas máquinas. En la figura 8 se muestra la propuesta para la estructura del ciclo de reparación.

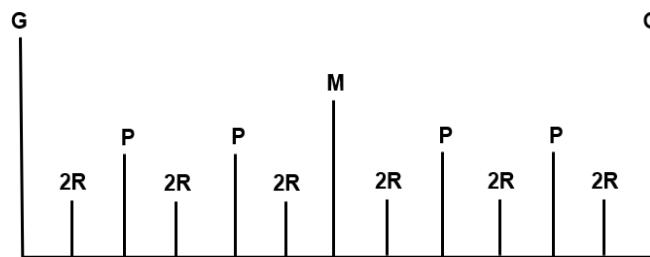


Figura 8. Propuesta para la estructura del ciclo de reparación.

Como muestra la Figura 8 la propuesta del ciclo de mantenimiento para el sistema de suministro de aire, objeto de estudio contempla 12 revisiones, 4 reparaciones pequeñas y una reparación mediana.

Fijado el período que transcurrirá entre las reparaciones generales y establecida la estructura del ciclo de mantenimiento; se define el período entre una reparación mediana de 10 000 horas-máquinas y el período entre reparaciones de 3 333,33 horas-máquinas. Por su parte el cálculo del período entre intervenciones o servicios de mantenimiento da como resultado 1 111,11 horas máquinas. Con esta propuesta el ciclo de mantenimiento queda garantizado con total fiabilidad para el sistema anticipándose adecuadamente al fallo prematuro.

Conclusiones

Para garantizar la funcionalidad del equipo, se propuso que el sistema de mantenimiento del mismo fuera realizado en un periodo de 20 000 h para el compresor y de 10 000 h para el motor eléctrico, teniendo en cuenta las características de empleo del mismo en la industria de construcción.

Al determinar las tensiones a las cuales trabajará el tanque de suministro se determinó que, estas tensiones alcanzan un valor mínimo de 0,021 MPa en las paredes, mientras que en los casquetes es donde se alcanza el valor máximo de 78,414 MPa, valores que garantizan la resistencia del mismo al encontrarse trabajando a máxima capacidad.

Referencias bibliográficas

- Alvarez, L.I., Lozano, D.A., & Bravo, C.A. (2022). Metodología para el mantenimiento predictivo de transformadores de distribución basada en aprendizaje automático. *Ingeniería*, 27(3). <https://doi.org/10.14483/23448393.17742>
- Arroyo, C.S. & Obando, R.F. (2022). Importancia de la implementación de mantenimiento preventivo en las plantas de producción para optimizar procesos. *E-idea Journal of Engineering Science*, 4(10), 59-69. <https://doi.org/10.53734/esci.vol4.id240>
- Chávez-Basantes, W.I. (2004). *Gestión del análisis de riesgos aplicados en procesos de inspección técnica de tanques de almacenamiento*. (Trabajo de Diploma, Universidad de Cuenca). <http://www.dspace.edu.ec/handle/123456789/14674>
- Crespo, H. E., Arias, C. P., & Zhigüe, C. (2024). Evolución del Análisis de Vibraciones en Mantenimiento Predictivo en Relación a los Patrones de Vibración en Elementos Mecánicos. *Ciencia Latina*, 8(4), 2443-2452. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12488
- González, F. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial Avanzado*. Fundación Confemetal.
- Hernández, J.A., Flores, C.G., González, V.A., Chacón, G., & López, J. (2024). Predicción de propiedades mecánicas de metamateriales obtenidos por Manufactura aditiva. *Padi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 90. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10097381>

Hernández-Montero, F.E.E., Anías-Calderón, C. & Ruiz-Barrios, M.L. (2023). El camino hacia la implementación del mantenimiento predictivo 4.0 en Cuba. *Ingeniería Industrial*, 44(3), 17-28. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9456541>

Lee, J., Ni, J., Singh, J., Jiang, B., Azamfar, M., & Feng, J. (2020). Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11), 110805. <https://doi.org/10.1115/1.4047856>

Montijo, E.E. & Martínez, M.P. (2020). Cálculo de esfuerzos mediante simulación con elementos finitos: una herramienta para implementarse en ingeniería. *Pro Sciences: revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 4(34), 70-78. <https://journalprosciences.com/index.php/ps/article/view/248>

Mustapha, K.B. (2022). *Simulaciones prácticas de elementos finitos con SOLIDWORKS 2022: Guía ilustrada para realizar análisis estáticos con SOLIDWORS Simulation*. Packt Publishing Ltd.

Nascimento, P.H., & Cardoso, L. (2024). Análise de dinâmica por Métodos dos Elementos finitos. *Brazilian Journal of Development*, 10(7), 1-16. <https://doi.org/10.34117/bjdv/10n7-056>

Nunes, P., Santos, J. & Rocha, E. (2023). Challenges in predictive maintenance – A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 40, 53-67. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.11.004>

Orejuela-Mendoza I.C., Suárez-Reyes D.J., Pino-Tarrago Julio C., Regalado-Jalca J.J. (2024). Diseño de Conexiones Soldadas RCFT mediante Elementos Finitos en Pórticos a Momento. *INGENIAR*, 7(14). <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0215>

Pillado, M., Castillo, V.H., & de la Riva, J. (2022). Metodología de administración para el mantenimiento preventivo como base de la confiabilidad de las máquinas. *Revista Iberoamericana para la investigación y el desarrollo educativo*, 12(24). <https://doi.org/10.23913/ride.v12i24.1218>

Pineda, J. (2025). Optimización de la Fabricación del Servo de Retro del Vehículo HMMWV. *Ciencia y Reflexión*, 4(9), 272-290. <https://cienciayreflexion.org/index.php/Revista/article/view/540>

Ramírez, I.M., Rivera, M.G., Cruz, J.N., Torres, I.E., & Moreno, S.H. (2022). Optimización geométrica de estructuras metálicas ligeras para aplicaciones prácticas utilizando el método de elemento finite. *Ingenio Magno*, 13(2), 89-94.
<https://revistas.santototunja.edu.co/index.php/ingenio/article/view/2676>

Simbaña, I., Quitiaquez, W., Cabezas, P., & Quitiaquez, P. (2024). Estudio comparativo de la eficiencia de colectores solares de placa plana rectangular y triangular mediante el método de elementos finitos. *Revista Técnica "Energía"*, 20(2), 81-89.
<https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n2.2024.593>

Simbaña, I., Vaca, X., Andrade, C., & Sevillano, W. (2025). Análisis numérico computacional de la estructura de soporte de un tanque de almacenamiento de agua de Lluvia. *Revista Digital Novasinergia*, 8(1), 6-18.
<https://doi.org/10.37135/ns.01.15.04>

Smith, G.T. (2016). *Machine Tool Metrology: An Industrial Handbook*. Springer.

Thielsen, A. (1970). *Mantenimiento predictivo y vibraciones mecánicas*. Editorial McGraw-Hill.

Tiddens, W., Braaksma, J., & Tinga, T. (2020). Exploring predictive maintenance applications in industry. *Journal of quality in maintenance engineering*, 28(1), 68-85. <https://doi.org/10.1108/JQME-05-2020-0029>

Torrell Quinta, U., Matos Mendoza, E., Viera Callar, J.M., Fernández Pérez, Y., & Martínez Rojas, R. (2024). Simulación de partes y piezas de un ariete hidráulico. *Ciencia & Futuro*, 4(1), 42-55.
<https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistacf/article/view/2484>