



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Instrumentación y monitorizado de un compresor de pistón  
para el mantenimiento predictivo

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Organización Industrial

AUTOR/A: Vidal Madrid, Marina

Tutor/a: Salavert Fernández, José Miguel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

## AGRADECIMIENTOS

*“La realización de este proyecto marca el fin de mi etapa universitaria, con lo que me gustaría agradecer de corazón a las personas que han estado conmigo durante estos años.*

*En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres por confiar en mí siempre, por su amor incondicional, paciencia y comprensión durante todo este proceso.*

*Vuestro apoyo emocional ha sido invaluable y sin vuestra ayuda, no habría sido posible completar este trabajo.*

*En segundo lugar, a mis amigos de clase, que han sido un apoyo fundamental en este camino. Vuestras palabras de ánimo y el apoyo constante han sido esenciales para superar los desafíos de este proyecto. Sin vosotros no habría sido posible llegar hasta aquí.*

*Además, quiero aprovechar esta ocasión para agradecer el trabajo realizado a mi tutor, ya que con su experiencia ha sabido aconsejarme y guiarme en todo momento. Su conocimiento y dedicación han sido cruciales para la calidad de este proyecto.*

*Gracias a todos por formar parte de este logro.”*

## **RESUMEN**

Este trabajo consistirá en analizar y diseñar un sistema de instrumentación y monitoreo de un compresor de pistón con el objetivo de implementar un sistema de mantenimiento predictivo. Para lograr esto, se realizará un estudio sobre los principales fallos que pueden presentarse en un compresor y, basándonos en estos estudios, se propondrá la inserción de sensores para la detección temprana de estos fallos. Además, se explorará la utilidad y efectividad del mantenimiento predictivo mediante el análisis de los datos obtenidos, evaluando así la viabilidad y eficacia del sistema propuesto.

Se estudiará el compresor, sus funciones, sistemas y piezas, con el fin de comprender sus posibles modos de fallo. También se realizará un análisis de averías basado en históricos y en la opinión de técnicos con experiencia en compresores de pistón, lo que permitirá crear una lista de averías de distinta calificación (frecuentes, graves, leves) para este tipo de máquinas.

En base a esta información y análisis previo, se desarrollará una lista de piezas objetivo, el síntoma que producen al degradarse, los sensores que permiten monitorizar dichos síntomas, y el establecimiento de una relación causa-efecto entre el síntoma monitorizado y la posible avería que se pretende detectar. Con ello, se establecerá un plan de mantenimiento predictivo del compresor basado en la evolución de síntomas.

El trabajo pretende ser una guía de sensórica y tratamiento de síntomas para compresores de pistón que se pueda trasladar completa o en parte a equipos industriales.

## **RESUM**

Aquest treball consistirà en analitzar i dissenyar un sistema d'instrumentació i monitoratge d'un compresor de pistó amb l'objectiu d'implementar un sistema de manteniment predictiu. Per a aconseguir això, es realitzarà un estudi sobre les principals fallades que poden presentar-se en un compresor i, basant-nos en aquests estudis, es proposarà la inserció de sensors per a la detecció primerenca d'aquestes fallades. A més, s'explorarà la utilitat i efectivitat del manteniment predictiu mitjançant l'anàlisi de les dades obtingudes, avaluant així la viabilitat i eficàcia del sistema proposat.

S'estudiarà el compresor, les seues funcions, sistemes i peces, amb la finalitat de comprendre els seus possibles modes de fallada. També es realitzarà una anàlisi d'avaries basat en històrics i en l'opinió de tècnics amb experiència en compresors de pistó, la qual cosa permetrà crear una llista d'avaries de diferent qualificació (freqüents, greus, lleus) per a aquest tipus de màquines.

En base a aquesta informació i anàlisi prèvia, es desenvoluparà una llista de peces objectiu, el símptoma que produeixen al degradar-se, els sensors que permeten monitoritzar aquests símptomes, i l'establiment d'una relació causa-efecte entre el símptoma monitoritzat i l'avaria que es pretén detectar. Amb això, s'establirà un pla de manteniment predictiu del compresor basat en l'evolució de símptomes.

El treball pretén ser una guia de sensorització i tractament de símptomes per a compresors de pistó que es puga traslladar completa o en part a equips industrials.

## **ABSTRACT**

This work will consist of analyzing and designing an instrumentation and monitoring system for a piston compressor with the aim of implementing a predictive maintenance system. To achieve this, a study will be conducted on the main failures that may occur in a compressor and, based on these studies, the insertion of sensors for the early detection of these failures will be proposed. Additionally, the utility and effectiveness of predictive maintenance will be explored through the analysis of the data obtained, thus evaluating the feasibility and effectiveness of the proposed system.

The compressor, its functions, systems, and components will be studied to understand its potential failure modes. Additionally, an analysis of failures will be conducted based on historical data and the opinions of experienced technicians in piston compressors, allowing for the creation of a list of failures with different classifications (frequent, severe, minor) for this type of machine.

Based on this information and prior analysis, a list of target parts, the symptoms they produce when degrading, the sensors that allow monitoring these symptoms, and the establishment of a cause-effect relationship between the monitored symptom and the potential failure will be developed. With this, a predictive maintenance plan for the compressor based on symptom evolution will be established.

The work aims to be a guide for sensorization and symptom treatment for piston compressors that can be fully or partially applied to industrial equipment.

# ÍNDICE

MEMORIA .....	8
1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1. OBJETIVO DEL TRABAJO .....	10
1.2. JUSTIFICACIÓN Y RELEVANCIA DEL ESTUDIO.....	10
2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL COMPRESOR DE PISTÓN.....	11
2.1. CONCEPTOS Y FUNCIONAMIENTO .....	11
2.2. PIEZAS QUE COMPONEN UN COMPRESOR DE PISTÓN .....	14
2.3. AVERÍAS DE COMPONENTES EN COMPRESOR DE PISTÓN Y VARIABLES A MEDIR ..	20
2.4. MANTENIMIENTO PREDICTIVO .....	22
2.4.1. Fundamentos .....	22
2.4.2. Ventajas .....	23
3. SENSORES PARA EL MONITOREO DEL COMPRESOR.....	24
3.1. TIPOS DE SENSORES.....	24
3.2. UBICACIÓN ESTRATÉGICA DE SENSORES EN EL COMPRESOR.....	25
3.3. SELECCIÓN DE LOS SENSORES PARA EL MONITOREO DEL COMPRESOR.....	30
3.3.1. Sensor de Presión .....	30
3.3.2. Sensor de Temperatura .....	31
3.3.3. Sensor de Vibración .....	33
3.3.4. Sensor de Corriente .....	34
3.3.5. Sensor de Nivel de Aceite.....	35
3.3.6. Sensor de Humedad.....	37
3.3.7. Sensor de Posición del Pistón.....	38
3.3.8. Normativa .....	39
4. SIMULACIÓN DE FALLOS.....	41
4.1. MÉTODOS DE SIMULACIÓN DE FALLOS EN EL COMPRESOR .....	43
4.2. PRUEBAS PARA VALIDAR EL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN .....	45
4.2.1. PRUEBAS PARA VALIDAR EL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN .....	46
4.2.2. SIMULACION DE PRUEBAS VALIDACIÓN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN ....	50
4.3. EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA ANTE FALLOS SIMULADOS .....	52

<b>4.4. SIMULACION COMPRESOR</b> .....	53
<b>4.4.1. CONDICIONES DE SIMULACION</b> .....	54
<b>4.4.2. SIMULACION TANQUE DEL COMPRESOR DE AIRE</b> .....	56
<b>4.4.3. SIMULACION CAMARA PISTON COMPRESOR DE AIRE</b> .....	59
<b>5. PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO</b> ..	62
<b>5.1. IMPLANTACIÓN DE LOS SENSORES EN EL SISTEMA DE MONITOREO</b> .....	63
<b>5.2. CONFIGURACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES ESCOGIDOS</b> .....	64
<b>6. ANÁLISIS DE DATOS</b> .....	65
<b>6.1. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS POR LA SIMULACION</b> .....	65
<b>6.2. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL SISTEMA DE MONITOREO</b> .....	66
<b>6.3. IDENTIFICACIÓN DE TENDENCIAS EN LOS DATOS</b> .....	67
<b>6.4. PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO</b> .....	69
<b>7. RELACIÓN DEL TFG CON LOS ODS</b> .....	70
<b>8. CONCLUSIONES</b> .....	71
<b>PLIEGO DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS</b> .....	73
<b>PRESUPUESTO</b> .....	77
<b>1.1. RESUMEN DEL PRESUPUESTO</b> .....	77
<b>NOMENCLATURA</b> .....	80
<b>PLANOS</b> .....	81
<b>ANEXOS</b> .....	88
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	90

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Detalles compresor de aire comprimido [1].....	12
Figura 2-2. Fases de la cámara del pistón [2].....	14
Figura 2-3. Cilindro.....	15
Figura 2-4 Pistón.....	15
Figura 2-5. Biela.....	15
Figura 2-6. Cigüeñal.....	16
Figura 2-7. Juntas y válvulas de admisión y escape.....	16
Figura 2-8. Válvula de alivio.....	16
Figura 2-9. Válvula reguladora de presión.....	16
Figura 2-10. Válvula antirretorno.....	17
Figura 2-11. Válvula de drenaje.....	17
Figura 2-12. Cojinetes.....	17
Figura 2-13. Segmentos pistón.....	17
Figura 2-14. Filtro de aire.....	18
Figura 2-15. Culata.....	18
Figura 2-16. Depósito de aire.....	18
Figura 2-17. Motor eléctrico.....	18
Figura 2-18. Presostato.....	19
Figura 2-19. Manómetro.....	19
Figura 2-20. Visor de aceite.....	19

Figura 2-21. Cáster .....	19
Figura 2-22. Lubricante .....	20
Figura 2-23. Flujo de mantenimiento predictivo [3] .....	24
Figura 3-1. Esquema del compresor.....	25
Figura 3-2. Posición de los sensores dentro del esquema del compresor.....	26
Figura 3-3. Sensor de Presión [4] .....	30
Figura 3-4. Sensor de temperatura [5].....	32
Figura 3-5. Sensor de Vibración [6] .....	33
Figura 3-6. Sensor de Vibración [7] .....	34
Figura 3-7. Sensor de Vibración [8] .....	36
Figura 3-8. Sensor de Vibración [9] .....	37
Figura 3-9. Sensor de Vibración [10] .....	38
Figura 4-1. Simulación estructural de compresor [11].....	42
Figura 4.1-2. Simulación de pistón de compresor [12] .....	44
Figura 4.2-3. Simulación de Presión de compresor [13] .....	50
Figura 4.2-4. Simulación de caudal de aire [14] .....	51
Figura 4.2-5. Simulación de temperatura motor [15] .....	52
Figura 4.4-6. Vistas en 3D del compresor .....	54
Figura 4.4-7. Depósito compresor de aire.....	56
Figura 4.4-8. Vista interior del depósito compresor de aire .....	57
Figura 4.4-9. Mallado del depósito compresor de aire .....	57
Figura 4.4-10. Simulación del depósito compresor de aire.....	57
Figura 4.4-11. Tensiones en la simulación del depósito compresor de aire .....	58
Figura 4.4-12. Deformaciones en la simulación del depósito compresor de aire.....	59
Figura 4.4-13. Fases cámara de pistón .....	59
Figura 4.4-14. Deformaciones en la simulación de la cámara de pistón.....	59
Figura 4.4-15. Fases pistón y bulón .....	60
Figura 4.4-16. Deformaciones en la simulación del pistón. ....	60
Figura 4.4-17. Tensiones brazo transmisor del pistón .....	61
Figura 4.4-18. Deformaciones en la simulación del brazo transmisor del pistón .....	61
Figura 6-1. Rendimiento medio por hora [16] .....	67

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2–1. Tabla de averías o fallos de sus componentes .....	22
Tabla 4–1. Características compresor de aire .....	55
Tabla 3 Coste Final .....	77
Tabla 4 Coste Diseño .....	78
Tabla 5 Coste Ejecución.....	78
Tabla 6 Coste Ensayo y Validación .....	79
Tabla 7 Coste Instalación y Modificación .....	79

## MEMORIA

El aire comprimido representa una forma eficiente de almacenar energía para su posterior utilización, superando en este aspecto al vapor y los fluidos hidráulicos. Además de su eficacia, es respetuoso con el medio ambiente, ya que la eventual fuga no genera contaminación por pérdida de líquidos como ocurre con los sistemas hidráulicos, ni emite gases nocivos como el vapor. Esta característica lo convierte en una opción preferida en numerosas actividades industriales.

Investigaciones actuales indican que entre el 10% y el 15% del consumo eléctrico en empresas se destina a la generación de aire comprimido. En algunas instalaciones, esta cifra puede ascender hasta el 30% o más, convirtiéndose así en una de las principales fuentes de consumo energético en una planta.

La gestión del mantenimiento predictivo en la industria es un componente crucial para el funcionamiento óptimo de las operaciones. Es fundamental que esté bien diseñado este tipo de mantenimiento para optimizar recursos, componentes y productividad empresarial. En el caso específico de los compresores, se ha observado que, en la mayoría de los casos, este proceso no es llevado a cabo por el departamento de mantenimiento de la empresa, sino que se delega a los fabricantes y distribuidores de los equipos. Estos proveedores, en muchos casos, cobran tarifas elevadas por este tipo de servicios, lo que representa una considerable desventaja empresarial. Por otro lado, la implementación de un plan de gestión del mantenimiento predictivo que permitiría una atención inmediata de estos equipos, con la ventaja adicional de reducir el coste a nivel del departamento de mantenimiento.

El mantenimiento predictivo, como actividad humana, asegura la continuidad, disponibilidad y calidad esperada de los servicios y de las máquinas, ya que dentro del entorno empresarial actual, el mantenimiento predictivo emerge como un pilar fundamental, ya que con el tiempo, el uso de sistemas de compresores se ha vuelto fundamental en muchos tipos de empresas, por tanto su operativa y funcionamiento conlleva importantes implicaciones dentro de la Gestión de Mantenimiento (preventivo, predictivo, correctivo).

Con este trabajo se pretende diseñar un programa de GME, este programa contendría procedimientos y directrices exhaustivas para llevar a cabo mantenimientos predictivos en compresores de pistón. Con esta iniciativa, se puede abordar cualquier gestión relacionada con

estos equipos. La creación de dicho programa motivaría a las empresas a prestar mayor atención al mantenimiento predictivo de sus equipos de aire comprimido, lo que podría extenderse a nivel empresarial para estandarizar las prácticas de gestión de mantenimiento. Actualmente, las empresas a menudo carecen de un seguimiento adecuado de los mantenimientos, lo que puede desembocar en problemas operativos y sobre todo económicos.

Con este trabajo, se pretende abordar los problemas comunes en compresores de pistón accionados por motores eléctricos. Al facilitar la gestión de mantenimiento predictivo para el personal de la empresa que no suele ser personal especializado en el mantenimiento de los equipos, el estudio ayudaría a mitigar problemas típicos y recurrentes en la industria. Además, puede garantizar el éxito de la gestión de mantenimiento predictivo, no solo a los equipos de trabajo, sino también a las infraestructuras o conjuntos de equipos de similares características para minimizar los fallos operativos, reducir el consumo energético y disminuir los costes asociados con el mantenimiento externo. Por tanto, este trabajo constará de una serie de apartados que definirán e introducirán el estudio del mantenimiento predictivo en los compresores de aire comprimido.

Para este estudio y análisis se emplearán AutoCAD® e Inventor®. A partir de los planos recopilados en la información del producto y en formato PDF, se realizará un modelo y la simulación para así mejorar la vida útil de este tipo de equipos. Posteriormente, se realizará un presupuesto de lo que conllevaría la instalación de estos sensores para el mantenimiento predictivo y, finalmente, se presentarán las conclusiones de todo este estudio y trabajo realizado sobre el mantenimiento predictivo de este tipo de compresor.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. OBJETIVO DEL TRABAJO

El objetivo principal de este proyecto es la instrumentación y el monitorizado de un compresor de pistón para el mantenimiento predictivo. Por un lado, se establecerá un sistema de mantenimiento predictivo basado en el monitorizado y análisis de la evolución de síntomas, y por otro, se realizará la simulación de averías para obtener más información y ajustar el mantenimiento predictivo. Para ello, se estudiarán los distintos modos de fallos que pueden presentar las piezas de un compresor, con la finalidad de poder seleccionar los sensores adecuados para medir las variables de este y así poder implementar este sistema de instrumentación y monitoreo.

Por otra parte, con el fin de conocer el efecto que tienen los modos de fallo sobre la intensidad de los síntomas asociados y la relación con la degradación funcional de las piezas que los provocan, se instalarán en el compresor objeto de estudio mecanismos y sistemas que permitan provocar o simular la degradación de las piezas analizadas. Estos modos de fallo y piezas involucradas están previamente identificados para evaluar la eficacia del sistema de mantenimiento predictivo, analizando los datos recopilados y los resultados de las simulaciones para determinar la utilidad del mantenimiento predictivo en la prevención de fallos en el compresor.

### 1.2. JUSTIFICACIÓN Y RELEVANCIA DEL ESTUDIO

La implementación de un sistema de instrumentación y monitoreo en un compresor tiene una alta relevancia en la industria actual por los siguientes motivos:

- Implantación de un sistema de monitoreo, esta produce una reducción de costes debido a que el sistema de monitoreo permite detectar fallos de manera temprana. Además, debido al mantenimiento predictivo se puede evitar la detención de la producción, provocando así una reducción del costo de oportunidad.
- Constante supervisión del compresor, permitiendo observar e identificar puntos de mejora en su rendimiento y realizando ajustes en tiempo real. Esto permitirá un aumento de la eficiencia y una disminución del consumo de energía.

- Detección temprana de fallos debido a la implementación de un sistema de monitoreo, reduciendo el número de accidentes y garantizando una mayor seguridad a los trabajadores.
- Innovación dentro de los compresores, ya que la implementación de un sistema de monitoreo implica un salto tecnológico y una mejora en la competitividad de las empresas.
- Aprovechamiento de la vida útil de las piezas, al poder estimar la evolución de la degradación de estas, y proceder a su cambio cuando sea necesario frente al cambio periódico que propugna el mantenimiento preventivo sistemático.

Por estos motivos se realiza este trabajo para generar un estudio de mantenimiento predictivo óptimo para este tipo de equipos y poder rentabilizar su operativa y ciclo de vida operativa de los mismos.

## **2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL COMPRESOR DE PISTÓN.**

Los compresores de pistón tienen una larga historia que se remonta al siglo XIX. A lo largo de los años, han experimentado numerosas mejoras en términos de eficiencia, durabilidad y capacidad. Desde los primeros diseños de pistón simple hasta los sistemas más avanzados con múltiples etapas de compresión, la evolución de estos compresores ha estado impulsada por la demanda de una mayor eficiencia energética y una mayor fiabilidad. A continuación, en los diversos apartados se irán exponiendo desde sus conceptos a sus piezas como al mantenimiento que necesitan estos equipos.

### **2.1. CONCEPTOS Y FUNCIONAMIENTO**

Los compresores de pistón son máquinas utilizadas para aumentar la presión de un gas, comúnmente aire, mediante la compresión mecánica. Operan en una variedad de aplicaciones industriales y domésticas, y son fundamentales para la generación y el suministro de aire comprimido como se puede observar en la Figura 2.1-1.



Figura 2-1. Detalles compresor de aire comprimido [1]

A continuación, se exploran los conceptos y el funcionamiento de los compresores de pistón.

- Compresión, es el proceso en el que un gas es reducido en volumen y, como resultado, aumenta su presión. Los compresores de pistón logran esto al disminuir el espacio en una cámara de compresión donde el gas es contenido.
- Ciclo de Trabajo, que implica cuatro fases:
  - Admisión
  - Compresión
  - Descarga
  - Escape

El pistón desciende para permitir la admisión de aire. Durante su movimiento ascendente, el pistón comprime el aire, impulsándolo o descargándolo hasta que

alcanza el Punto Muerto Superior. Una vez que el pistón llega a este punto, el ciclo vuelve a comenzar.

- Pistones y Cilindros: Los compresores de pistón cuentan con uno o varios pistones que se mueven dentro de cilindros. Estos pistones se desplazan mediante un sistema de biela-cigüeñal, el cual es accionado ya sea directamente o mediante una transmisión por un motor eléctrico, un motor de combustión interna o una fuente de energía externa. Este conjunto de cilindro-culata, pistón, biela y cigüeñal está acoplado y alojado en un cárter que, además, contiene el lubricante.
- Válvulas de admisión y escape que controlan el flujo de aire hacia y desde la cámara de compresión. Se abren y cierran en momentos específicos del ciclo de trabajo para permitir la entrada de aire fresco y la salida de aire comprimido.

El funcionamiento mecánico del compresor de pistón está basado en la Admisión y Compresión del aire que se descarga en el depósito del sistema y termina por liberarse del mismo para realizar otro ciclo. Estas fases van desde la Admisión al Escape describiéndose a continuación.

- Admisión es la fase donde el pistón se mueve desde el PMS (Punto muerto Superior) al PMI (Punto Muerto Inferior), creando un espacio en el cilindro. La válvula de admisión se abre y permite que el aire ambiente entre en el cilindro.
- Compresión, una vez que el cilindro está lleno de aire, el pistón se desplaza hasta el PMS, reduciendo el volumen del aire atrapado en el cilindro. Este proceso comprime el aire, lo que aumenta su presión y temperatura. La válvula de admisión se cierra en este punto.
- Descarga, es la fase cuando la presión alcanza un nivel deseado, la válvula de escape se abre y permite que el aire comprimido sea expulsado de la cámara de compresión y dirigido hacia el sistema o el tanque de almacenamiento. El pistón vuelve a su posición inicial, lo que permite la preparación del cilindro para el siguiente ciclo. La válvula de escape se cierra.

Este proceso se repite continuamente, generando un flujo constante de aire comprimido. La presión máxima que un compresor de pistón puede alcanzar depende de su diseño y capacidad, como se representa en la Figura 2.1-2.

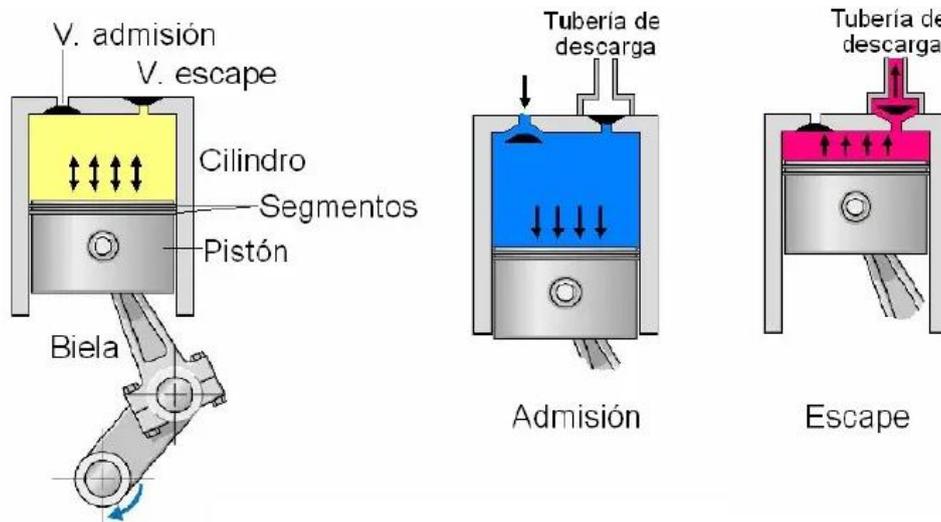


Figura 2-2. Fases de la cámara del pistón [2]

Los compresores de pistón son muy utilizados en aplicaciones que requieren aire comprimido, como herramientas neumáticas, sistemas de refrigeración, sistemas de aire acondicionado, y más. En este apartado se ha descrito el concepto y el fundamento de los compresores de aire ya que comprender estos conceptos y su funcionamiento de estos compresores es esencial para un mantenimiento predictivo y para garantizar su funcionamiento eficiente y seguro.

## 2.2. PIEZAS QUE COMPONEN UN COMPRESOR DE PISTÓN

Para evaluar los posibles tipos de fallos que puede presentar un compresor, primero se debe conocer cada uno de los elementos que lo componen. Éstas son:

- **Cilindro:** Es la parte del compresor donde se produce la compresión del aire o gas. El pistón se mueve dentro del cilindro para comprimir el aire.



Figura 2-3. Cilindro

- **Pistón:** Es una pieza móvil que se desplaza dentro del cilindro y realiza el proceso de compresión del aire.



Figura 2-4 Pistón

- **Biela:** Es una barra de metal que conecta el pistón con el cigüeñal y convierte el movimiento lineal del pistón en movimiento rotatorio.



Figura 2-5. Biela

- **Cigüeñal:** Es un eje giratorio que convierte el movimiento lineal de la biela en movimiento circular.



Figura 2-6. Cigüeñal

- **Juntas y válvulas de admisión y escape:** Son válvulas que controlan el flujo de aire o gas hacia y desde el cilindro durante el proceso de compresión.



Figura 2-7. Juntas y válvulas de admisión y escape

- **Válvula de alivio:** Es una válvula de seguridad que se abre para liberar la presión excesiva en el sistema del compresor y evitar daños.



Figura 2-8. Válvula de alivio

- **Válvula reguladora de presión:** Es una válvula utilizada para controlar y mantener la presión dentro de un rango específico predefinido.



Figura 2-9. Válvula reguladora de presión

- **Válvula antirretorno:** También conocida como válvula check, es una válvula unidireccional que permite que el aire o gas fluya en una dirección específica, evitando el retroceso o el flujo en sentido contrario.



Figura 2-10. Válvula antirretorno

- **Válvula de drenaje:** componente utilizado para liberar el condensado acumulado en el tanque de aire comprimido.



Figura 2-11. Válvula de drenaje

- **Cojinetes:** Son elementos de apoyo y rodamiento que permiten el movimiento suave y la reducción de fricción en las partes móviles del compresor, como el cigüeñal.



Figura 2-12. Cojinetes

- **Segmentos:** Son anillos metálicos para sellar el espacio entre el pistón y la pared del cilindro, evitando así que el aceite lubricante del motor entre en la cámara de combustión.



Figura 2-13. Segmentos pistón

- **Filtro de aire:** Es un dispositivo utilizado para filtrar el aire, eliminando impurezas y asegurando un aire limpio y de calidad.



Figura 2-14. Filtro de aire

- **Culata:** Es una pieza que cierra la parte superior del cilindro, contiene las válvulas, pipas, y en algunos casos conductos de lubricación.



Figura 2-15. Culata

- **Tanque de aire:** Es un depósito donde se almacena el aire comprimido para su posterior uso.



Figura 2-16. Depósito de aire

- **Motor:** Es un motor eléctrico que mueve al compresor.



Figura 2-17. Motor eléctrico

- **Presostato:** Es un dispositivo que controla la presión del aire comprimido y puede activar o desactivar el compresor según los valores establecidos.



Figura 2-18. Presostato

- **Manómetro:** Es un instrumento de medición utilizado para mostrar la presión del aire o gas en el sistema del compresor.



Figura 2-19. Manómetro

- **Visor de aceite:** Es un indicador visual que permite verificar el nivel y la condición del aceite lubricante en el compresor.



Figura 2-20. Visor de aceite

- **Cárter:** Es la carcasa que envuelve y protege las partes móviles del compresor, como el cigüeñal y las bielas. Además, contiene el aceite lubricante.



Figura 2-21. Cárter

- **Lubricante:** Es un aceite especial diseñado para reducir la fricción y el desgaste entre las partes móviles del compresor.



Figura 2-22. Lubricante

### 2.3. AVERÍAS DE COMPONENTES EN COMPRESOR DE PISTÓN Y VARIABLES A MEDIR

A continuación, mostramos los modos de fallo que puede presentar cada una de las piezas del compresor, así como los síntomas que estos provocan en el compresor, y la variable a medir para detectarlos.

PIEZA	MODOS DE FALLO	SÍNTOMAS	VARIABLE A MEDIR
<b>Cilindro</b>	Desgaste del revestimiento interno	Pérdida de presión y fugas de aire	Presión, fugas
<b>Culata</b>	Fisuras o grietas	Pérdida de presión, Ruido anormal	Fugas, presión, ruido, vibraciones
	Desgaste de las superficies de sellado	Vibraciones anormales	
<b>Pistón</b>	Rotura o daños de los segmentos	Consumo de aceite	Consumo de aceite
<b>Biela</b>	Desgaste excesivo entre la biela y el cigüeñal	Vibraciones anormales, ruidos anormales	Vibraciones, ruidos
<b>Cigüeñal</b>	Desgaste en los cojinetes	Vibraciones anormales, ruidos anormales	Vibraciones, ruidos
	Desgaste excesivo entre la biela y el cigüeñal	Vibraciones anormales, ruidos	Vibraciones, ruidos
<b>Retén del cigüeñal</b>	Desgaste	Fugas de aceite Pérdida de lubricación Sobrecalentamiento	Nivel de aceite Temperatura Vibración

		Reducción de la eficiencia	
<b>Válvulas de admisión y escape</b>	Desgaste de los asientos	Pérdida de compresión, consumo de aceite	Compresión, consumo
	Fugas en las válvulas de admisión y escape	Pérdida de presión, ruidos	Presión, ruido
	Pegado de válvula en el asiento (oxidación, corrosión)	Pérdida de eficiencia, aumento de la temperatura, ruido y vibraciones, desgaste	Ruido, vibraciones, temperatura
<b>Válvula de descarga</b>	Mal funcionamiento de la válvula (no descarga al parar el compresor)	Doblado de válvula Deformación de la válvula Juego en el bulón	Presión, ruido
<b>Válvula de drenaje</b>	Obstrucción o bloqueo	Acumulación excesiva de condensado en el tanque	Nivel de condensado.
	Fugas	Pérdida de presión en el tanque	Presión
	No se abre o se cierra correctamente	Acumulación excesiva de condensado en el tanque	Nivel de condensado
<b>Válvula anti retorno</b>	Fugas, obstrucciones	Retroceso de flujo, ruido de escape	Flujo, ruido
<b>Cojinetes</b>	Desgaste	Ruido de fricción, vibraciones anormales	Ruido, vibraciones
	Falta de lubricación	Ruido de fricción, vibraciones anormales	Vibraciones
<b>Bulones</b>	Grietas o fracturas en el bulón	Mal funcionamiento del compresor	Inspección visual
	Corrosión	Formación de óxido en la superficie del bulón	Análisis de corrosión
<b>Filtro de aire</b>	Obstrucción	Pérdida de presión, disminución del flujo de aire, aumento del consumo de aceite	Presión, flujo, nivel de aceite
<b>Tanque de aire</b>	Fugas, corrosión	Pérdida de presión, reducción del rendimiento	Presión, rendimiento
<b>Motor</b>	Falta de potencia	No arranca, pérdida de potencia	Arranque, potencia
<b>Rodamiento de motor</b>	Desgaste	Ruido anormal Vibración excesiva	Temperatura Vibración (cambiar cada 30000h)
<b>Silent Block</b>	Rotura	Aumento vibraciones Ruido anormal	Vibraciones Ruido
<b>Mangueras de impulsión</b>	Fugas	Disminución de presión Disminución del rendimiento	Presión Rendimiento

<b>Presostato</b>	Mal funcionamiento, falta de ajuste	Arranque y detención inapropiados	Presión
<b>Manómetro</b>	Lectura incorrecta	Lecturas inexactas, indicación de presión incorrecta	Presión, indicación
<b>Visor de aceite</b>	Fugas	Nivel de aceite bajo, falta de lubricación	Nivel de aceite, lubricación
<b>Cuadro de conexiones</b>	Malos contactos (oxidación, corrosión)	Fallas en el arranque Sobrecalentamiento del motor Paradas intermitentes	Tensión eléctrica Corriente eléctrica
<b>Lubricante</b>	Pérdida de viscosidad, pérdida de propiedades, contaminación (agua, silicio, partículas metálicas)	Pérdida de eficiencia, aumento de desgaste	Viscosidad Propiedades del lubricante Análisis de contaminantes

Tabla 2-1. Tabla de averías o fallos de sus componentes

## 2.4. MANTENIMIENTO PREDICTIVO

El mantenimiento predictivo es una estrategia de mantenimiento operativo que se basa en la recopilación y el análisis de datos en tiempo real para predecir cuándo es probable que ocurra un fallo en un equipo o sistema. Esta técnica se ha convertido en una herramienta fundamental en la gestión del mantenimiento industrial debido a sus numerosas ventajas y beneficios. A continuación, se va a describir tanto los fundamentos de esta técnica como sus ventajas.

### 2.4.1. Fundamentos

El fundamento principal de esta técnica es el monitoreo de síntomas y la asociación de los valores obtenidos a la evolución de la degradación de una determinada pieza o elemento susceptible de provocar una avería, es decir, se realiza un seguimiento constante de las condiciones de funcionamiento del equipo, lo que incluye la recopilación de datos en tiempo real, como vibraciones, temperatura, presión, corriente eléctrica y otros parámetros relevantes

También el análisis y diagnóstico de los componentes más críticos, los datos se analizan utilizando herramientas y técnicas avanzadas, como análisis de vibraciones, termografía, análisis de aceite, entre otros. Estos análisis de datos recopilan y analizan los datos operativos, como horas de funcionamiento, ciclos de carga/descarga, consumo de energía, etc., y el conjunto de

estos en el tiempo ayudan a identificar tendencias y patrones que podrían indicar un desgaste anormal o la necesidad de ajustes en la operación.

También con ayuda de sensores distribuidos a lo largo del equipo como sensores de presión y temperatura se monitorea estas dos variables que son críticas en la operativa de estos equipos. El monitoreo continuo de la presión y la temperatura dentro del compresor puede detectar cambios anormales que podrían indicar problemas con el sistema de refrigeración, sobrecalentamiento o fugas en el sistema.

Cuando se detecta una anomalía, se programa una intervención de mantenimiento. Esto puede incluir reparaciones preventivas o correctivas, dependiendo de la gravedad del problema. Cuando esta programación de mantenimiento está basada en condiciones que utiliza la información recopilada a través de diversas técnicas de monitoreo, se puede implementar un programa de mantenimiento predictivo basado en las condiciones reales del compresor, en lugar de simplemente seguir un calendario preestablecido y dar más vida útil a las piezas del sistema ya que no se llegaría nunca al fallo del equipo.

#### **2.4.2. Ventajas**

Una vez visto los fundamentos de este tipo de inspección se puede deducir que las ventajas siempre serán de tipo proactivo y con tendencia a ser automatizadas y supervisadas por algoritmos que controlen el ciclo de vida de estos sistemas. Además, esta implementación y automatización de este tipo de mantenimiento está más optimizada y es más eficiente al estar monitorizada en tiempo real prácticamente. Por tanto, a continuación, se enumeran las principales ventajas de este tipo de mantenimiento. En la Figura 2.4-21 se muestra el flujo de este mantenimiento predictivo para cualquier sistema que se imponga.

- Reducción de costos ya que al predecir problemas antes de que ocurran, se evitan costosos tiempos de inactividad no planificados y reparaciones de emergencia.
- Aumento de la disponibilidad, esto se debe a que, al realizar mantenimiento de manera proactiva, se maximiza el tiempo de funcionamiento del equipo, lo que mejora la disponibilidad y la productividad.

- Optimización de recursos debido a los recursos que se utilizan de manera más eficiente al programar mantenimiento solo cuando es necesario, en lugar de seguir un calendario fijo.
- Prolongación de la vida útil de sus componentes debido a que se aborda los problemas en etapas tempranas, se reduce el desgaste y se prolonga la vida útil del equipo.
- Seguridad mejorada, este se debe a la detección de problemas potenciales contribuye a la seguridad al prevenir accidentes y fallas críticas
- Mejora en la calidad del producto, esto se debe a que en la elaboración de piezas dentro de procesos industriales, el mantenimiento predictivo puede garantizar una mayor calidad del producto final.

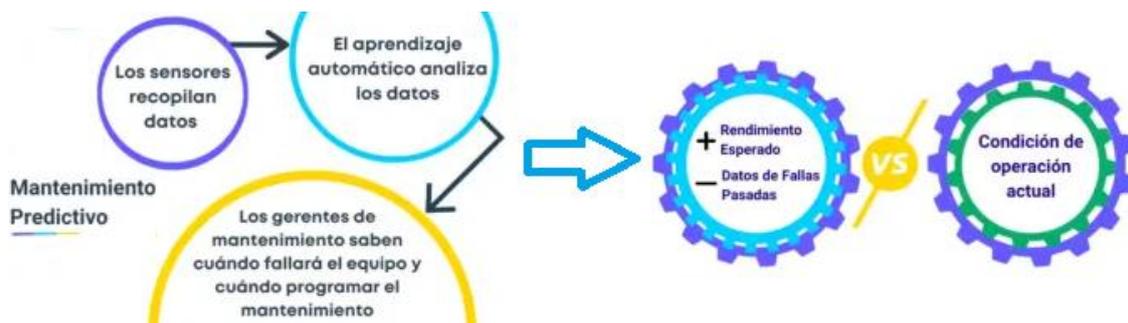


Figura 2-23. Flujo de mantenimiento predictivo [3]

### 3. SENSORES PARA EL MONITOREO DEL COMPRESOR.

#### 3.1. TIPOS DE SENSORES.

Los compresores de pistón de aire comprimido utilizan una variedad de sensores para monitorear diferentes aspectos de su funcionamiento y condiciones de operación. A continuación, se enumeran los más comunes, y se describirán en los siguientes apartados:

- Sensores de presión
- Sensores de temperatura
- Sensores de vibración
- Sensores de nivel de aceite

- Sensores de flujo de aire
- Sensores de posición
- Sensores de humedad

### 3.2. UBICACIÓN ESTRATÉGICA DE SENSORES EN EL COMPRESOR.

Nuestro enfoque de instrumentación y monitoreo del compresor se centrará en los fallos más comunes que suelen ocurrir en el compresor, es decir, los más concurrentes y críticos. Para predecir y detectar estos fallos, se implementarán los sensores específicos y se realizarán simulaciones de fallos en el flujo por fallo de alguno de estos sensores para evaluar la eficacia del sistema de mantenimiento predictivo en la prevención de estos problemas. En este punto se va a realizar una descripción detallada del sistema de instrumentación que se va a implementar. Para ello, primero se representará un esquema grafico del compresor.

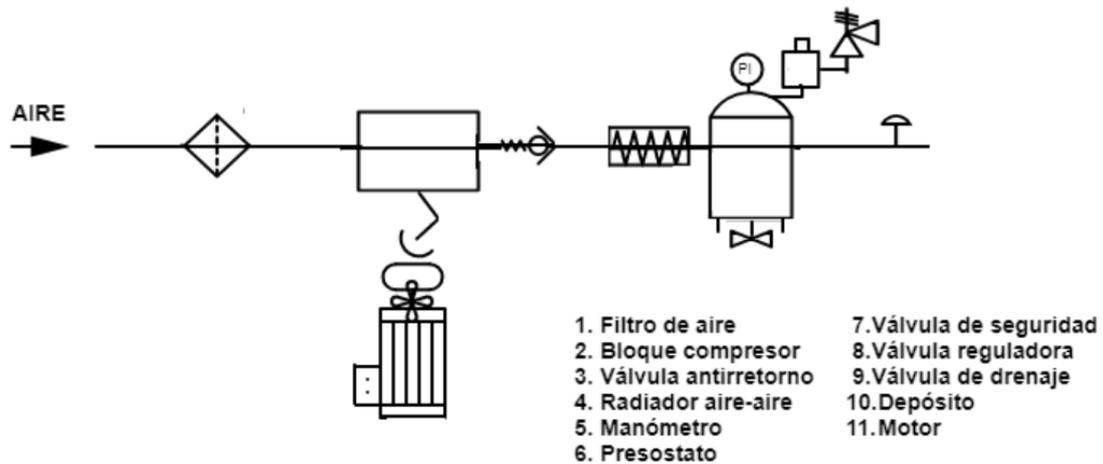


Figura 3-1. Esquema del compresor

A continuación, un esquema donde se describen los sensores a instalar.

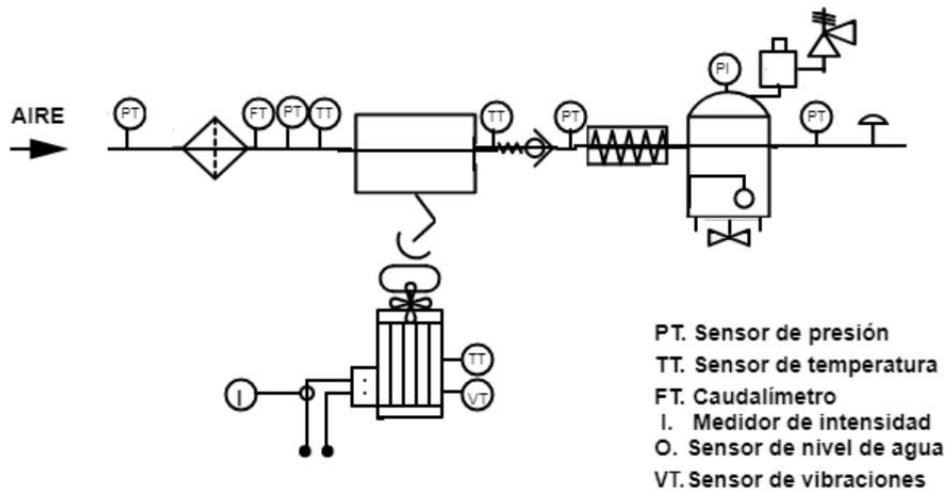


Figura 3-2. Posición de los sensores dentro del esquema del compresor

En primer lugar, se utilizará un sensor de caída de presión a través del filtro de aire. Se colocará este sensor en el conducto de admisión de aire, colocando una toma de presión antes del filtro de aire y otra después del filtro. Esto permitirá medir la diferencia de presión entre los dos puntos. Mediante este sensor se va a detectar cuando se producirá una obstrucción del filtro de aire, ya que este sensor mide la diferencia de presión entre la entrada y salida del filtro de aire, por lo que cuando el filtro está limpio y sin obstrucciones, la diferencia de presión es baja o prácticamente la misma, y a medida que se acumulan partículas de suciedad y polvo en el filtro la diferencia de presión aumenta.

Este sensor de presión diferencial debe tener un rango de presión diferencial que incluya la presión máxima del compresor, es decir, los 10 bares de presión máxima operativa, para que sea capaz de medir la diferencia de presión a través del filtro en condiciones normales de funcionamiento.

En segundo lugar, se instalará un caudalímetro después del filtro de aire. Mediante la instalación de este sensor se va a analizar y detectar cuando se produce una obstrucción el filtro de aire, ya que detectaría una disminución en el caudal de aire. Además, si hay fugas en el sistema de admisión, el caudalímetro detectará una pérdida de caudal o si esta obstrucción es a la salida del sistema provocando una sobrepresión en el caudal.

El caudalímetro a instalar sería de flujo de aire, este tendrá un rango de medición adecuado para cubrir el flujo de aire esperado en el sistema, es decir que sea capaz de medir, al menos, la capacidad máxima de aire de admisión, que es de 222lt/min.

En tercer lugar, se instalarán dos sensores de temperatura, uno antes del bloque compresor y otro después de este. Estos sensores tienen la finalidad de detectar cuando se produce un aumento en la temperatura del aire de admisión después de pasar por el filtro. Esto podría indicar problemas de sobrecalentamiento en varios componentes del compresor. Estos componentes son:

- Cilindro y pistón, donde el sobrecalentamiento puede ser causado por una lubricación insuficiente, un desgaste excesivo, o incluso una compresión inadecuada del aire. El monitoreo de la temperatura del aire de admisión puede ayudar a detectar problemas en estos componentes.
- Cojinetes, donde se puede producir un sobrecalentamiento como resultado de una fricción excesiva debida a la falta de lubricación o al desgaste. La temperatura del aire de admisión puede reflejar problemas en estos componentes.

En cuarto lugar, se instalará un sensor de presión después de la válvula antirretorno, es decir, en la tubería o conducto de aire que sale de la válvula. Esta ubicación permitirá medir la presión del aire inmediatamente después de pasar por la válvula. Cuando la válvula antirretorno tiene fugas o no se cierra completamente, puede permitir que el aire retroceda hacia el sentido contrario, lo que provocaría una caída de presión en el lado de salida de la válvula. El sensor de presión después de la válvula detectará esta caída de presión. Además, nos ayudaría a identificar si la válvula antirretorno está funcionando adecuadamente, ya que, si la válvula está obstruida, ya sea debido a suciedad u otros residuos, se produciría una disminución de la presión, lo que conlleva problemas en el compresor.

En quinto lugar, se instalará un sensor de temperatura en el motor del compresor, ya que, mediante la instalación de este, podemos detectar los siguientes fallos:

- Sobrecalentamiento del motor, este sensor de temperatura puede detectar un aumento inusual de la temperatura en el motor del compresor. Este aumento de temperatura

podría ser debido a un flujo de aire inadecuado para la refrigeración, un mal funcionamiento del sistema de enfriamiento o una carga excesiva en el motor.

- Sobrecarga del motor, una carga excesiva en el motor puede generar un aumento en la temperatura. El sensor de temperatura detectará este sobrecalentamiento que podría ser debido a una demanda de aire comprimido superior a la capacidad del compresor.
- Desgaste de componentes, esto provocaría un sobrecalentamiento del motor también puede estar relacionado con el desgaste de algunos componentes internos como los cojinetes. El sensor de temperatura ayudaría a identificar este problema en las etapas iniciales.
- Problemas de lubricación, debido a una lubricación inadecuada del motor, podría generar un aumento de la fricción y, en consecuencia, una mayor temperatura. La colocación de un sensor de temperatura en el motor del compresor podría alertar de una falta de lubricación en el sistema.

El sensor de temperatura utilizado será uno cuyo rango de temperatura abarque un rango de operación desde  $-10^{\circ}\text{C}$  hasta  $50^{\circ}\text{C}$ , para garantizar mediciones confiables en todas las condiciones de funcionamiento del compresor.

En sexto lugar se instalará un sensor de vibraciones en el motor de compresor, ya que este ayudará a detectar problemas como el desgaste de los rodamientos, así como desgaste o daños en el pistón y el cilindro y un desequilibrio en sus componentes debido a una deformación en su geometría. También sería útil para detectar fallos más comunes en componentes mecánicos, como piezas sueltas que puedan generar vibraciones anormales.

El sensor de vibraciones a instalar será un acelerómetro, con un rango de frecuencia de al menos 1 - 10KHz, ya que así cubriría la mayoría de las vibraciones generadas por el compresor. Además, la sensibilidad del sensor debe ser suficiente para detectar las vibraciones generadas por el compresor. En este caso, una sensibilidad de 100mV/g (milivoltios por gravedad). Por otra parte, también hay que considerar un rango de amplitud de vibraciones de al menos  $\pm 50\text{g}$ .

En séptimo lugar, se instalará un sensor de presión en la salida de aire del compresor, en el tramo de flujo después de que el aire haya sido comprimido. Con la instalación de estos sensores se pretende adquirir datos y monitorear los siguientes fallos:

- Sobrepresión en distintos puntos del equipo con los sensores de presión que detectarían una presión excesivamente alta en la salida del aire comprimido, lo que podría indicar un mal funcionamiento del sistema de regulación de presión.
- Fuga en la línea de aire dentro de los circuitos del sistema, se podrá producir un descenso constante de la presión detectado por el sensor podría señalar una fuga en la línea de aire comprimido, lo que resultaría en una pérdida de presión constante y vibraciones en el compresor.
- Variaciones de presión dentro del sistema provocando fluctuaciones anormales en la presión del aire comprimido, lo que podría ser un signo de problemas en el sistema de compresión, como un funcionamiento intermitente o inestable del compresor.

También se utilizará un amperímetro con el objetivo de supervisar la carga del motor y detectar variaciones anormales en la corriente. Un aumento sostenido en la corriente podría indicar un aumento de la carga debido a problemas mecánicos, como un aumento de la resistencia en los pistones o en el sistema de compresión. Además, cambios significativos en la corriente del motor pueden ser indicativos de desgaste o problemas en las partes móviles del compresor, como el pistón, biela o rodamientos.

Se debe instalar un amperímetro que sea capaz de manejar la corriente máxima que el compresor requiere. En este caso, sabiendo que la alimentación de nuestro compresor es 230V, y la potencia 2HP, la intensidad eléctrica será:

$$I = (2 \text{ hp} \times 745.7 \text{ W/hp}) / 230 \text{ V} \approx 6.48 \text{ A.} \quad (1)$$

Por tanto, se instalará un amperímetro con una capacidad nominal de al menos 10 A para tener un margen de seguridad.

Por último, se instalará un sensor de humedad en el depósito del compresor con el objetivo de detectar el nivel de humedad en el depósito para alertar sobre un mal funcionamiento de la válvula de drenaje, lo que podría causar acumulación de agua y corrosión.

### 3.3. SELECCIÓN DE LOS SENSORES PARA EL MONITOREO DEL COMPRESOR.

El monitoreo del compresor es esencial para garantizar su rendimiento óptimo y prevenir posibles fallos, por tanto, la selección de sensores depende del tipo de compresor, su aplicación específica y los parámetros que se crean críticos y con estos criterios se añadirán para que sean monitorizados. Estos sensores dentro del compresor se insertan según el tipo de compresor, del trabajo que se vaya a desarrollar con el compresor y del ciclo de vida que se le quiera poner. Desde esta perspectiva, se va a enumerar a continuación los sensores más comunes que se pueden utilizar para el monitoreo del compresor.

#### 3.3.1. Sensor de Presión

Este sensor mide la presión del aire en diferentes puntos del sistema. En el caso de estudio, es decir, para nuestro compresor de pistón, el sensor de presión es un dispositivo diseñado para medir la presión del aire en diferentes puntos del sistema. Este sensor es esencial para monitorear y controlar la presión generada durante el proceso de compresión. Su función es convertir la presión del aire en una señal eléctrica proporcional, que luego puede ser interpretada por el sistema de control del compresor. Es un sensor que se coloca generalmente en puntos clave del sistema, como en la entrada y salida del compresor, así como en otros lugares estratégicos donde sea crucial medir la presión. Su principio de funcionamiento está basado en utilizar tecnologías como piezorresistivos, capacitivos o piezoeléctricos. En el caso de compresores de pistón, los sensores suelen utilizar el principio piezorresistivo, donde la resistencia eléctrica del sensor cambia proporcionalmente a la presión aplicada. Este tipo de sensor se conecta al sistema eléctrico del compresor. La señal generada por el sensor se transmite al sistema de control a través de cables eléctricos. Su rango de medición en el que opera está dentro del rango específico de presiones. Es importante seleccionar un sensor con el rango adecuado para las condiciones de operación del compresor.



Figura 3-3. Sensor de Presión [4]

Por ejemplo, el sensor de la Figura 3.3-1 emite una señal de 0,5 a 4,5 V CC, facilitando la retroalimentación de información al controlador cuando el compresor de aire alcanza la presión predeterminada. La variación de la señal está directamente relacionada con la presión en la línea, permitiendo el control preciso del ciclo de carga y descarga del compresor de aire. Destacando por su elevada confiabilidad, durabilidad extendida y su capacidad para operar de manera eficiente en diversos entornos desafiantes, este sensor se presenta como una opción robusta y fiable.

Se puede realizar con este tipo de componente una monitorización continua, proporcionando una lectura continua de la presión en tiempo real. Esto permite al sistema de control ajustar automáticamente la operación del compresor para mantener la presión dentro de los límites deseados. Este componente ofrece una protección contra sobrepresión, incluyendo características de protección contra sobrepresión, enviando señales de advertencia o incluso deteniendo el compresor si se detecta una presión peligrosa. Este tipo de sensores son adecuados para mantenimiento

Predictivo, ya que la información proporcionada por el sensor de presión también puede ser utilizada para implementar estrategias de mantenimiento predictivo. Las lecturas anómalas pueden indicar problemas potenciales en el compresor, permitiendo intervenciones antes de que se produzcan fallas importantes. Por tanto, el sensor de presión en un compresor de pistón desempeña un papel crucial en la operación eficiente y segura del sistema, contribuyendo al monitoreo, control y mantenimiento adecuados del compresor.

### **3.3.2. Sensor de Temperatura**

Este tipo de sensor dentro de un compresor de pistón es un componente que mide la temperatura en diferentes puntos del sistema. Es esencial para monitorear y controlar la temperatura del compresor y del aire comprimido. Ya que la función de este componente es de convertir la temperatura en una señal eléctrica proporcional, que luego puede ser interpretada por el sistema de control del compresor. La ubicación de este tipo de sensores debe ser estudiada para posicionarlo en diferentes partes del compresor, como el motor, los cilindros de compresión, el sistema de refrigeración y otros puntos críticos donde es importante medir la temperatura, Figura 3.3-2.



Figura 3-4. Sensor de temperatura [5]

El principio de funcionamiento, de este tipo de sensores varía según la tecnología aplicada, aunque estos serán de dos tipos, con termopares o termorresistencias. Un termopar genera una pequeña corriente eléctrica en respuesta a cambios de temperatura, mientras que una termorresistencia experimenta cambios en su resistencia eléctrica en función de la temperatura. La conexión eléctrica de este componente se realiza conectándolo al sistema eléctrico del compresor. La señal generada por el sensor se transmitirá al sistema de control a través de cables eléctricos.

Estos sensores realizarán una monitorización continua, proporcionando una lectura continua de la temperatura en tiempo real. Esto permitirá al sistema de control ajustar automáticamente la operación del compresor para mantener la temperatura dentro de los límites seguros. Además, este tipo de sensores tiene la funcionalidad de protección contra sobrecalentamiento, si se detecta una temperatura peligrosa, el sistema de control puede tomar medidas para proteger el compresor, como detener la operación o reducir la velocidad.

Este tipo de sensores es uno de los más indicados para el mantenimiento predictivo, ya que la información proporcionada por el sensor de temperatura también puede ser utilizada para implementar estrategias de mantenimiento predictivo, ya que lecturas anómalas, pueden indicar problemas potenciales en el compresor, permitiendo intervenciones antes de que se produzcan fallas mayores.

Además, este tipo de componentes realizan la función de control de refrigeración, es decir, este tipo de sensor de temperatura ayuda a controlar y optimizar la eficiencia del sistema de enfriamiento, garantizando que los componentes críticos operen a temperaturas seguras. Por tanto, el sensor de temperatura en un compresor de pistón juega un papel crucial en la supervisión y control de las condiciones térmicas del sistema, contribuyendo al funcionamiento seguro y eficiente del compresor.

### 3.3.3. Sensor de Vibración

Este tipo de sensor en un compresor de pistón es un componente diseñado para detectar y medir las vibraciones generadas durante el funcionamiento del compresor. Estas vibraciones pueden ser indicativas de desequilibrios, desalineaciones, desgaste de componentes o problemas en el sistema.



Figura 3-5. Sensor de Vibración [6]

El sensor de La Figura 3.3-3 está especialmente diseñado para la detección de movimiento y vibración, manteniendo su sensibilidad constante independientemente de su posición de montaje. Es versátil para su uso en circuitos tanto analógicos como digitales. Responde a desequilibrios causados por impactos o vibraciones, generando un breve cambio de estado, como pasar de normalmente abierto a normalmente cerrado o viceversa. La duración de esta perturbación dependerá de la energía recibida en el momento del impacto, y el estado final en el que se establezca será arbitrario. La baja resistencia de contacto de este sensor lo convierte en una elección idónea tanto para nuevas implementaciones como para integrarse en diseños ya existentes. Su diseño sin mercurio lo posiciona como una alternativa respetuosa con el medio ambiente

Este tipo de componentes tienen la función de convertir las vibraciones mecánicas en una señal eléctrica proporcional que puede ser interpretada por el sistema de control del compresor. Los sensores de vibración se colocan generalmente en ubicaciones del compresor donde son susceptibles de vibraciones, como en el motor, los rodamientos, el cárter, o en cualquier otro elemento donde las vibraciones puedan ser indicativas de problemas. El principio de funcionamiento de estos componentes es a través de implementación tecnológica de elementos piezoeléctricos o acelerómetros como en la Figura 3.3-3. Estos dispositivos generan una señal eléctrica en respuesta a las vibraciones mecánicas. La amplitud y frecuencia de la señal proporcionan información sobre la magnitud y la naturaleza de las vibraciones.

La conexión eléctrica se realiza a través del sistema eléctrico del compresor. La señal generada por el sensor se transmite al sistema de control a través de cables eléctricos. Son elementos fundamentales para una monitorización continua, ya que proporciona una lectura continua de las vibraciones en tiempo real. Esto permite al sistema de control detectar cambios

inusuales en las vibraciones y tomar medidas preventivas antes de que se agraven los problemas. Este tipo de sensor puede identificar desequilibrios en el rotor del compresor. Los desequilibrios pueden causar vibraciones significativas y, si no se abordan, pueden resultar en daño adicional a los rodamientos y otros componentes. También pueden indicar desalineaciones en los componentes del compresor, como en el acoplamiento entre el motor y el compresor.

Este tipo de sensor es fundamental para el mantenimiento predictivo, debido a que la información proporcionada por el sensor puede proporcionar e implementar estrategias de mantenimiento predictivo. La detección temprana de vibraciones anómalas permite la planificación de intervenciones de mantenimiento antes de que se produzcan fallos catastróficos. Por tanto, este tipo de componente es esencial para la protección contra fallos, en algunos sistemas de control utilizan sensores de vibración para activar protecciones automáticas, como detener el compresor, en caso de vibraciones excesivas que podrían indicar una condición de emergencia, es decir, este sensor es fundamental para el monitoreo del estado mecánico del sistema y contribuye a una operatividad segura de todos sus componentes y eficiencia del compresor.

#### 3.3.4. Sensor de Corriente

El sensor de corriente en un compresor de pistón es un dispositivo diseñado para medir la corriente eléctrica que fluye hacia el motor del compresor. Este sensor es esencial para monitorear y controlar la carga eléctrica del motor, lo que puede ser indicativo del rendimiento y la eficiencia del compresor.



Figura 3-6. Sensor de Vibración [7]

El sensor de la Figura 3.3-4 desempeña dos funciones fundamentales, por un lado, genera una señal analógica que, tras pasar por un amplificador operacional, resulta idónea para la conversión A/D. En segundo lugar, emite una señal de conmutación que permite establecer previamente el límite de corriente. Cuando el valor de corriente real supera el límite

preestablecido, la señal de conmutación transita de un nivel bajo a uno alto, indicándose mediante un LED.

Este componente tiene la función de convertir la corriente eléctrica que fluye hacia el motor en una señal eléctrica proporcional que puede ser interpretada por el sistema de control del compresor, generalmente, se coloca en línea con los conductores que suministran corriente al motor del compresor. Este tipo de sensores se basan en tecnologías de transformadores de corriente o efecto Hall. En un transformador de corriente, la corriente que fluye a través del conductor primario induce una corriente secundaria proporcional que es medida por el sensor. En el efecto Hall, se utiliza un campo magnético para medir la corriente a través de la deflexión de partículas cargadas. Se conectan en serie con los cables que suministran energía al motor del compresor. La señal generada por el sensor se transmite al sistema de control a través de cables eléctricos.

Estos elementos para la monitorización continua proporcionan una lectura de la corriente en tiempo real. Esto permite al sistema de control ajustar automáticamente la operación del compresor para mantener la corriente dentro de los límites seguros y eficientes. Estos sensores se emplean esencialmente para detectar sobrecargas eléctricas que podrían indicar problemas en el motor, como desgaste de los componentes, pérdida de eficiencia o condiciones de operación anómalas. También, permite monitorear la eficiencia energética del compresor al evaluar la corriente consumida en relación con la carga de trabajo. Variaciones significativas en la corriente pueden indicar la necesidad de ajustes en la operación para mejorar la eficiencia. Dentro del mantenimiento predictivo, proporcionan información para implementar estrategias de mantenimiento predictivo.

Por tanto, algunos sistemas de control utilizan información del sensor de corriente para activar protecciones automáticas, como desconectar el compresor en caso de sobre corriente para evitar daños al motor. El sensor de corriente en un compresor de pistón es esencial para garantizar la operación segura y eficiente del motor, al tiempo que proporciona información valiosa para el monitoreo y mantenimiento del compresor.

### **3.3.5. Sensor de Nivel de Aceite**

El sensor de nivel de aceite en un compresor de pistón es un dispositivo diseñado para monitorear el nivel de aceite lubricante en el sistema. Mantener un nivel adecuado de aceite es

fundamental para el buen funcionamiento y la vida útil del compresor, como el que se muestra en la Figura 3.3-5.



Figura 3-7. Sensor de Vibración [8]

Tiene la función de detectar y medir el nivel de aceite en el cárter o en el sistema de lubricación del compresor de pistón. Este tipo de sensor se instala generalmente en el cárter del compresor donde pueda detectar el nivel de aceite de manera precisa. Estos elementos pueden utilizar diferentes tecnologías, como flotadores magnéticos, sondas conductivas o ultrasonido. El principio específico dependerá del tipo de sensor empleado. Se conecta al sistema eléctrico del compresor y la señal generada se transmite al sistema de control a través de cables eléctricos.

Proporciona una lectura continua del nivel de aceite en tiempo real. Esto permitirá al sistema de control alertar al operador o tomar medidas automáticas si el nivel de aceite está fuera de los límites aceptables. También realiza funciones de protección del motor y mantiene un nivel adecuado de aceite, ya que es esencial para la lubricación adecuada de los componentes internos del compresor, como los pistones y los cojinetes. El sensor de nivel de aceite contribuye a la protección del motor y otros componentes al asegurar que siempre haya suficiente lubricación. Este tipo de sensor alerta de nivel bajo de aceite si el nivel de aceite cae por debajo de un umbral seguro, el sensor puede activar una advertencia o una parada automática del compresor para evitar daños al motor.

Este tipo de componente es fundamental dentro del mantenimiento predictivo, debido a que la información proporcionada por el sensor de nivel de aceite también se puede utilizar en análisis y estrategias de mantenimiento predictivo. Debido a que puede indicar pérdidas de aceite o problemas en el sistema de lubricación antes de que se conviertan en problemas mayores. La mayoría de los sensores de nivel de aceite están diseñados para integrarse fácilmente con sistemas de control más amplios, permitiendo una supervisión y control centralizados.

### 3.3.6. Sensor de Humedad

El sensor de humedad es un dispositivo diseñado para medir el contenido de humedad en el aire comprimido generado por el compresor. El control del nivel de humedad es crucial en muchos procesos industriales y aplicaciones donde el aire comprimido se utiliza para evitar daños a equipos y asegurar un rendimiento óptimo, Figura 3.3-6.



Figura 3-8. Sensor de Vibración [9]

El sensor de humedad tiene la función de medir la cantidad de vapor de agua presente en el aire comprimido generado por el compresor de pistón. Este tipo de sensor se coloca generalmente en la línea de aire comprimido, preferiblemente después del compresor y antes de que el aire sea utilizado en el proceso o almacenado.

Los sensores de humedad utilizan tecnologías como higroscopía, capacitancia, resistencia eléctrica o infrarrojos para medir el contenido de humedad en el aire comprimido. Este componente se conecta al sistema eléctrico del compresor y transmite la información sobre el contenido de humedad al sistema de control a través de cables eléctricos. También como otros sensores, proporciona una lectura continua del nivel de humedad en tiempo real. Esto permite al sistema de control ajustar automáticamente las condiciones de operación para mantener la humedad dentro de los límites especificados. Este tipo de sensor está indicado para la prevención de corrosión, ya que un alto contenido de humedad en el aire comprimido puede contribuir a la corrosión de componentes metálicos. El sensor de humedad ayuda a prevenir problemas de corrosión al mantener la humedad bajo control.

Este es un motivo esencial para la utilidad de este tipo de compresores porque afecta directamente sobre la calidad del producto final, donde el aire comprimido se utiliza directamente en la producción, mantener niveles bajos de humedad. Dentro del mantenimiento Predictivo, al detectar cambios en los niveles de humedad, el sensor puede ser parte de una estrategia de mantenimiento predictivo, indicando posibles problemas en los sistemas de secado o alertando sobre la necesidad de cambio de filtros. El sensor de humedad en un

compresor de pistón contribuye a mantener la calidad del aire comprimido y asegura que se cumplan los requisitos específicos de las aplicaciones industriales o procesos donde se utiliza el aire comprimido.

### 3.3.7. Sensor de Posición del Pistón

El sensor de posición del pistón en un compresor de pistón es un dispositivo diseñado para monitorear la posición del pistón durante su ciclo de compresión y expansión. Este sensor proporciona información valiosa sobre el estado y el rendimiento del compresor, y puede ser crucial para optimizar la eficiencia y prevenir posibles problemas. El elemento tiene la función de detectar y medir la posición del pistón dentro del cilindro del compresor de pistón durante su ciclo de trabajo. Se instala generalmente en o cerca del cilindro del compresor, de manera que pueda detectar el movimiento del pistón, Figura 3.3-7.



Figura 3-9. Sensor de Vibración [10]

Los sensores de posición utilizan diversos principios, como potenciómetros, encoders, sensores magnéticos, o tecnologías más avanzadas dependiendo del diseño específico del compresor. Se conecta al sistema eléctrico o al sistema de control del compresor para transmitir la información sobre la posición del pistón. Proporcionará una lectura continua de la posición del pistón en tiempo real y permitirá al sistema de control ajustar la operación del compresor para optimizar su eficiencia y adaptarse a diferentes cargas de trabajo. Además, permite al sistema de control del compresor sincronizar y controlar los ciclos de compresión y expansión del pistón, asegurando un rendimiento suave y eficiente. Cambios anómalos en la posición del pistón pueden indicar desgaste en los componentes, problemas de sellado o problemas mecánicos en el sistema. El sensor de posición del pistón es esencial para detectar estos problemas de manera temprana. En algunos compresores, el sensor de posición del pistón se utiliza para ajustar la apertura de la válvula de descarga, lo que contribuye a mantener la presión y el rendimiento dentro de los parámetros deseados.

Dentro del mantenimiento predictivo, la información proporcionada por el sensor de posición del pistón puede utilizarse para implementar estrategias de mantenimiento predictivo. Cambios graduales o repentinos en la posición del pistón pueden indicar la necesidad de mantenimiento preventivo. El sensor de posición del pistón es esencial para el monitoreo y control preciso de un compresor de pistón, asegurando un rendimiento eficiente y contribuyendo a la prevención de problemas mecánicos.

### 3.3.8. Normativa

Se ha enumerado anteriormente los tipos de sensores más comunes que puedes llevar este tipo de sensores, pero estos se tienen que insertar y realizar pruebas para su monitoreo y mantenimiento predictivo en función de la normativa recogida en las normas industriales. La normativa UNE (Normas Españolas) es un conjunto de normas técnicas aplicables en España, y muchas de estas normas están alineadas con las normativas europeas e internacionales. Para compresores de pistón, aplican las normas relacionadas con compresores y equipos de aire comprimido. Las normas más relevantes para compresores de pistón serían:

- **UNE-EN ISO 1217: Compresores de aire**

Esta norma especifica los métodos de ensayo para la determinación de las características de rendimiento de los compresores de aire. Incluye aspectos como la capacidad, la eficiencia, la potencia absorbida, entre otros.

- **UNE-EN ISO 7183: Compresores de aire. Especificaciones generales**

Esta norma proporciona especificaciones generales para compresores de aire, incluyendo requisitos técnicos y de seguridad.

- **UNE-EN ISO 8573: Calidad del aire comprimido**

Esta norma establece los límites y métodos de prueba para la calidad del aire comprimido en términos de contenido de agua, partículas y aceite. Puede ser relevante para compresores de aire que suministran aire comprimido para aplicaciones críticas.

- **UNE-EN 1012: Compresores y soplantes**

Esta norma se centra en la seguridad de los compresores y soplantes, proporcionando requisitos específicos para su diseño y construcción.

- **UNE-EN 953: Equipos de trabajo. Protecciones móviles**

Si el compresor de pistón está integrado en un equipo de trabajo más grande, esta norma podría ser relevante, ya que trata sobre protecciones móviles en equipos de trabajo.

- **UNE-EN 12021: Calidad del aire. Requisitos para el suministro de aire respirable**

Si el compresor se utiliza en aplicaciones que requieren aire respirable, esta norma establece requisitos para garantizar la calidad del aire respirable.

- **Seguridad de equipos a presión**

En este punto se tiene la directiva de la UE 87/404/CE, sobre Recipientes a presión simples y la directiva de la UE 97/23/CE, sobre equipos a presión, referenciadas a las normas siguientes:

- EN 764-1 a 7, Equipos a presión
- EN 286-1 a 4, Recipientes a presión simple, no sometidos a la llama, diseñados para contener aire o nitrógeno

- **Medioambiente**

Esta normativa está recogida en la directiva de la UE 2000/14/CE, y hace referencia a las emisiones sonoras en el entorno, con referencia a las normas siguientes:

- EN ISO 3744:2009, Determinación de los niveles de potencia acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Método de ingeniería
- EN ISO 2151:2004, Código de ensayo de ruido para compresores y bombas de vacío. Método de ingeniería
- Directiva de la UE 2004/26/CE, Norma de emisiones de los motores de las máquinas móviles no de carretera. Niveles de la fase III implementados desde 2006 hasta 2013; fase IV a partir de 2014

- Norma federal de EE. UU. sobre emisiones para los motores de las máquinas móviles no de carretera. Niveles Tier III implementados desde 2006 hasta 2008; niveles Tier IV desde 2008 hasta 2015

- **Seguridad eléctrica**

Las normas de seguridad eléctricas son recogidas en la directiva de la UE 2004/108/CE, Compatibilidad electromagnética, con referencia a las normas siguientes:

- EN 61000-6-2:2005, Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 6-2: Normas genéricas. Inmunidad en entornos industriales
- EN 61000-6-4:2006, Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 6-4: Normas genéricas. Norma de emisión en entornos industriales
- Directiva de la UE 2006/95/CE, Equipos de baja tensión, con referencia a las normas siguientes:
  - EN 60034, Partes 1 a 30, Maquinas eléctricas rotativas. Características asignadas y características de funcionamiento
  - EN 60204-1:2009, Seguridad de las máquinas. Equipo eléctrico de las máquinas. Parte 1: Requisitos generales
  - EN 60439-1:2004, Cuadros de control de baja tensión. Parte 1: Tipo probado y conjuntos parcialmente probados

Con la exposición de esta normativa se intenta abarcar todos los requisitos y pruebas para el monitoreo y mantenimiento predictivo del compresor de estudio de este proyecto.

#### **4. SIMULACIÓN DE FALLOS**

La simulación de un fallo en un compresor es una forma de evaluar cómo el sistema respondería ante situaciones adversas. Para poder realizar la simulación de un fallo en concreto

se debe de realizar unas hipótesis de trabajo, funcionalidad y de entorno, es decir, se debe describir el escenario donde se va a realizar la simulación. Para generar estos fallos se emplea software de ingeniería mecánica como, Autodesk Inventor®. En estos programas, hay que introducir el elemento de estudio mediante planos y la propia pieza modelada en 3 dimensiones y sobre ella se le aplica el escenario de la prueba. En este escenario se debe describir el tipo de fallo que se quiere reproducir, fallos mecánicos, eléctricos, sobrecargas para analizar cómo se comportara el sistema completo o en particular alguno de sus elementos. En la figura 4.1 se visualiza una simulación analizando la integridad estructural del compresor mediante el análisis de elementos finitos (FEA).

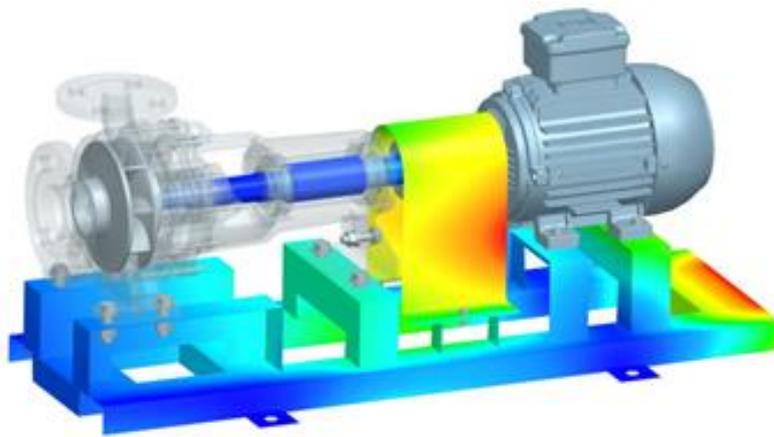


Figura 4-1. Simulación estructural de compresor [11]

Con esa información, se podrá analizar para posteriormente, en los sitios más críticos del compresor se introduzcan sensores y poder monitorizar en esos sitios, las distintas variables de funcionamiento y con ello poder generar un modelo y extraer el mantenimiento predictivo para el compresor de pistón.

En la simulación y sobre en el escenario de esa simulación lo que se pretende es tener el entorno más realista desde el punto de vista de ingeniería para a partir de un modelo tridimensional, someterlo a todo tipo de simulaciones para ver cómo se comporta el diseño y poder extraer la información necesaria sobre el propio compresor de pistón. Las variables que se extraen de esta simulación se resumen:

- Variables de entorno del Sistema, como afecta el fallo del pistón al rendimiento general del compresor. Podrías esperar una disminución en la capacidad de compresión, una reducción en la presión de salida y un aumento en la vibración.

- Variables del Fallo, donde se evalúa cómo el sistema de instrumentación y monitoreo detecta este fallo. Verifica si se activan alarmas y si se registran datos anómalos. Esto podría incluir sensores de vibración, presión y temperatura.
- Variables de respuesta del sistema de control, es decir, cómo responde el sistema de control ante el fallo del pistón.
- Variables de activación de protecciones, estas variables extraen y comprueba si las protecciones del sistema, como las alarmas de baja presión o las paradas de emergencia, se activan correctamente en respuesta al fallo simulado.
- Variables de Recuperación de fallo, se prueba procedimientos para recuperar el compresor después del fallo simulado.
- Registro y agrupación de todas las variables, se registra detalladamente los datos durante la simulación del fallo. Esto proporcionará información valiosa para el análisis post-fallo y la mejora continua del sistema.

Al simular fallos en el compresor de aire, se puede mejorar la preparación del sistema para situaciones reales y garantizar que esté equipado para manejar problemas potenciales de manera eficiente y segura.

#### 4.1. MÉTODOS DE SIMULACIÓN DE FALLOS EN EL COMPRESOR

Los métodos de simulación de fallos en cualquier elemento, va desde métodos analógicos donde se prueban elementos particulares del mecanismo a acciones externas como a métodos digitales o software que están encaminados a simulaciones virtualizadas a través de elementos finitos. La simulación de fallos en un compresor es una herramienta valiosa para evaluar el rendimiento del sistema, identificar posibles problemas y desarrollar estrategias de mantenimiento predictivo. En la Figura 4.1-2 se representa la simulación sobre un pistón de compresor después de generar unas condiciones de uso.

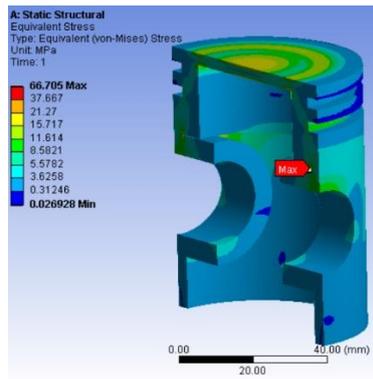


Figura 4.1-2. Simulación de pistón de compresor [12]

La FEA se utiliza para simular el comportamiento estructural del compresor bajo diferentes condiciones, incluidas vibraciones, tensiones y deformaciones. Esto puede ayudar a prever y mitigar problemas mecánicos. A continuación, se enumeran algunos de estos métodos y tipos de simulación de fallos que pueden ser utilizados en el contexto de un compresor:

- **Simulación por Software**

Se modelará el comportamiento del compresor bajo diversas condiciones de fallo utilizando Autodesk Inventor®. Este programa permite modificar parámetros específicos y observar cómo afectan al rendimiento del compresor.

- **Simulación de Desgaste y Fatiga**

Modelado de procesos de desgaste y fatiga en componentes clave del compresor, como los pistones, anillos, cojinetes, etc. Esto revelará cómo ciertas condiciones operativas afectan la vida útil de los componentes.

- **Simulación de Fallos en Sistemas de Control**

Introducción controlada de fallos en el sistema de control del compresor para evaluar cómo responde a condiciones anómalas. Esto podría incluir la simulación de problemas en sensores, actuadores o el software de control.

- **Simulación de Fugas**

Modelado de fugas en diferentes puntos del sistema para evaluar cómo afectan la eficiencia y el rendimiento del compresor. Esto puede incluir fugas en sellos, válvulas, conexiones y otros puntos críticos.

- **Simulación de desgaste**

Modelado en el sistema de condiciones de desgaste, sobre todo se simulan el desgaste desigual en los pistones o en los componentes giratorios, para evaluar cómo afectan las vibraciones y la operación del compresor.

- **Simulación de Sobrecalentamiento**

Modelado de condiciones de sobrecalentamiento para evaluar cómo afectan la temperatura del compresor y los componentes críticos. Esto puede incluir simulaciones de condiciones de operación anormales o fallas en el sistema de enfriamiento.

- **Simulación de Fallos en Válvulas**

Modelado y evaluación de cómo las fallas en las válvulas de succión o descarga afectan el flujo de aire y la capacidad del compresor para comprimir el aire de manera eficiente.

- **Simulación de Problemas en el Sistema de Lubricación**

Modelado de condiciones de baja lubricación o fallas en el sistema de lubricación para evaluar el impacto en el desgaste de los componentes y en la eficiencia del compresor.

- **Simulación de Variaciones de Carga**

Modelado y evaluación de cómo el compresor responde a variaciones de carga, ya sea en términos de velocidad del motor o demanda de aire comprimido, para identificar posibles problemas de rendimiento.

### 4.2. PRUEBAS PARA VALIDAR EL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN

Las pruebas sobre el compresor real deben seguir la normativa anteriormente mencionada, como la norma ISO 8573 de calidad del aire comprimido, que se puede utilizar para analizar muestras de aire comprimido, tiene como objetivo detectar tres contaminantes principales (agua, partículas sólidas y aceite). Este sistema de prueba industrial de aire está estandarizado porque es eficiente y rentable para determinar la calidad del aire comprimido. Las pruebas para validar el sistema de instrumentación las vamos a dividir en dos tipos de pruebas.

- Pruebas sobre el equipo real
- Simulación sobre un modelo idéntico al equipo real de variables del compresor

#### 4.2.1. PRUEBAS PARA VALIDAR EL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN

Estas pruebas son realizadas sobre el equipo real, son del tipo mecánicas sin carga del equipo, se llevarán a cabo en coordinación con otros grupos de pruebas. Se verificará accionamientos, componentes mecánicos de rotación, engranajes y posteriormente se probará el funcionamiento sin carga. Este tipo de pruebas incluirán el funcionamiento del conjunto de elementos mecánicos para verificar la suavidad de operación, la vibración, el sobrecalentamiento y el funcionamiento de interruptores de seguridad, instrumentos y accesorios.

Pruebas sobre partes estancas del compresor, como tuberías y depósitos sellados. Donde todas las tuberías se someterán a pruebas neumáticas con las presiones marcadas por cada fabricante utilizando aire seco. En este tipo de pruebas se testearán todas las juntas bridadas o roscadas, acoplamientos mecánicos, soldaduras en campo, válvulas y accesorios, ya sea sobre el suelo o bajo tierra, se dejarán expuestos, con las juntas sin pintar.

Este tipo de pruebas, están tipificadas según y en estas en concreto, la presión de prueba se aplicará durante al menos 20 minutos. Si no se observa ninguna fuga y la caída de presión no supera el 5% de la presión de prueba, se considerará que la sección de la tubería ha pasado la prueba.

Otras pruebas realizarán la validación del sistema de instrumentación de un compresor. Con la realización de estas pruebas se asegura que los instrumentos utilizados para medir y controlar diferentes parámetros estén funcionando correctamente y proporcionen lecturas precisas. Por tanto, las pruebas sobre el equipo real se realizarán para validar y certificar el sistema de instrumentación de un compresor. Algunas de estas pruebas serán:

- Prueba de Arranque y Parada, donde se verificará que el compresor se inicie y se detenga adecuadamente. Esto incluye evaluar la respuesta del motor, la activación de los controles y la estabilidad durante la operación.

**Límites de Aceptación:** El compresor debe arrancar y parar sin incidentes. El tiempo de respuesta no debe exceder los 3 segundos. Las fluctuaciones de presión no deben superar el  $\pm 3\%$

- Prueba de Rango Completo donde se realizará pruebas a lo largo de todo el rango de operación del compresor para garantizar que los instrumentos puedan medir con precisión en todas las condiciones.

**Límites de Aceptación:** Los instrumentos deben medir con una precisión del 95% a lo largo de todo el rango de operación.

- Pruebas de estabilidad y repetibilidad, donde se verificará la estabilidad de las lecturas midiendo constantemente un parámetro durante un período prolongado. Además, realiza pruebas de repetibilidad para asegurarte de que las lecturas sean consistentes en condiciones similares.

**Límites de Aceptación:** Las variaciones en las lecturas deben ser menores al 1% durante 24 horas en condiciones constantes.

- Prueba de sensibilidad, donde se realizará cambios intencionales en las condiciones de operación del compresor y verifica si los instrumentos responden correctamente a esos cambios.

**Límites de Aceptación:** Los instrumentos deben responder a los cambios en menos de 2 segundos, con una desviación máxima del 2%.

- Prueba de Tiempo de Respuesta, donde se introducirá cambios rápidos en las condiciones de operación y observa cuánto tiempo tardan los instrumentos en registrar estos cambios.

**Límites de Aceptación:** Los instrumentos deben registrar cambios en menos de 1 segundo.

- Prueba de Alarmas y Límites, donde se verificará que las alarmas y límites configurados en los instrumentos se activen correctamente cuando se alcanzan ciertos umbrales críticos.

**Límites de Aceptación:** Las alarmas deben activarse al alcanzar los umbrales críticos definidos, con una tolerancia de  $\pm 2\%$ .

- Prueba de simulación de Fallos, donde se simulará fallos en algunos componentes del sistema (sensores, cables, etc.) y observa cómo responde el sistema de instrumentación.

- Prueba de Interferencia Electromagnética (EMI) y Ruido, donde se verificará si hay interferencia electromagnética que pueda afectar las lecturas de los instrumentos. Esto es crucial, especialmente en entornos industriales donde puede haber equipos eléctricos potentes.

**Límites de Aceptación:** No debe haber desviaciones superiores al 1% en las lecturas debido a EMI.

- Prueba de Precisión a Temperaturas Extremas, es una prueba muy especial donde se verificará la precisión de los instrumentos a temperaturas extremas, tanto en condiciones de frío como de calor, si estas variaciones son relevantes para la aplicación.

**Límites de Aceptación:** Las lecturas deben mantenerse dentro de un margen de  $\pm 3\%$  en un rango de temperaturas de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ .

- Prueba de Vibración y Choque, es una prueba habitual donde se evalúa la resistencia de los instrumentos a vibraciones y choques, especialmente si el compresor de pistón se utiliza en entornos donde estas condiciones puedan ser comunes.

**Límites de Aceptación:** Los instrumentos deben operar correctamente bajo vibraciones de hasta 5g y choques de hasta 10g.

- Prueba de Condiciones Ambientales Extremas, es una prueba de condiciones extremas en la que se somete el compresor en entornos extremos, como condiciones húmedas, salinas o polvorientas, realiza pruebas para asegurar que los instrumentos sean capaces de funcionar en tales condiciones.

**Límites de Aceptación:** Los instrumentos deben funcionar sin fallos en ambientes con hasta 95% de humedad relativa, alta salinidad y presencia de polvo.

- Prueba de Consumo de Energía, donde se medirá y verificará el consumo de energía del sistema de instrumentación para asegurar que sea eficiente y cumpla con los requisitos de consumo energético.

**Límites de Aceptación:** El consumo de energía debe estar dentro de los límites especificados, con una tolerancia de  $\pm 5\%$ .

- Prueba de Redundancia y Tolerancia a Fallos, en este ensayo se realizará pruebas para garantizar que la transición entre los componentes redundantes sea suave y sin pérdida de potencia. Además, verifica la capacidad del sistema para tolerar fallos sin comprometer la seguridad o la operación.

**Límites de Aceptación:** La transición debe ocurrir sin pérdida de datos y sin interrupciones superiores a 0.5 segundos.

- Prueba de Integración del Sistema, donde se verificará la correcta integración de todos los componentes del sistema de instrumentación con el sistema de control general del compresor.

**Límites de Aceptación:** Todos los componentes deben comunicarse correctamente y funcionar como un sistema unificado sin errores de integración.

- Prueba de Resistencia a la Corrosión, donde se someterá al compresor a ambientes corrosivos, realiza pruebas para garantizar que los instrumentos sean resistentes a la corrosión.

**Límites de Aceptación:** No debe haber corrosión significativa en los instrumentos después de la exposición a ambientes corrosivos durante 48 horas.

- Prueba de Seguridad Funcional, donde se debe asegurar que los instrumentos cumplan con los requisitos de seguridad funcional y que sean capaces de realizar las funciones críticas de manera segura.

**Límites de Aceptación:** Los instrumentos deben operar de manera segura y realizar funciones críticas sin fallos.

Como se observa estas pruebas sobre el equipo real están desarrolladas para probar el correcto funcionamiento del equipo y probar insitu su funcionalidad y comportamiento. El problema es que son pruebas individualizadas y bastante costosas. Además, no se puede inspeccionar equipo a equipo para tener una base de datos y extrapolar y analizar posteriormente el comportamiento de algunos componentes para posteriormente extraer un mantenimiento predictivo para este equipo. Por lo general lo que se realiza análisis de elementos finitos (FEA) para simular el comportamiento de componente y de mecanismos

enteros y así evaluar donde se van a introducir sensores dentro del equipo que nos proporcionara este mantenimiento predictivo que se va buscando por parte del fabricante.

#### 4.2.2. SIMULACION DE PRUEBAS VALIDACIÓN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN

Una vez que se introduce el modelo en CAD dentro de un software de elementos finitos se puede introducir el entorno donde se va a desarrollar la simulación. Esta puede ir desde comportamientos individuales de cada componente hasta un conjunto de elementos para analizar el comportamiento que tiene en función de las variables de entorno que se le van introduciendo. Es una forma analítica de testear este componente y darnos las pautas para saber dónde estarán mejor los sensores que controlarán todos los elementos del compresor de aire de un solo pistón. De esta forma, se puede desarrollar un mantenimiento predictivo del compresor ya que lo que se simula para un posterior análisis es condiciones desfavorables, desgastes y vibraciones que afectan cada componente y al material de que está fabricado. Esto junto con el histórico que se desarrolla nos genera en otro software de mantenimiento predictivo unas recomendaciones en función de las horas de trabajo, entorno de trabajo y mantenimiento de los equipos.

Estas simulaciones son fundamentales para garantizar su correcto mantenimiento, eficiencia y seguridad. Algunas de estas simulaciones se corresponden con variables de entorno y de funcionamiento. A continuación, se describen algunas simulaciones para poder ubicar sensores dentro del equipo y también para analizar el mantenimiento predictivo de algunas partes de este:

- Simulación de Presión Máxima, en este tipo de prueba se simula ajustes del compresor para alcanzar su presión máxima especificada. Confirmar que el sistema de seguridad (válvula de alivio de presión) se activa correctamente cuando se alcanza esta presión Figura 4.2-3.

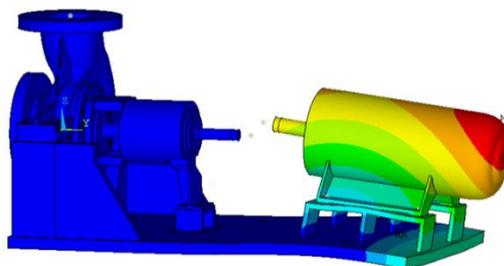


Figura 4.2-3. Simulación de Presión de compresor [13]

- Simulación de Fugas de Aire, en esta prueba simulada se realiza para analizar las conexiones y mangueras en busca de posibles fugas de aire, debido al tipo de soldadura o ajuste. Las fugas pueden afectar la eficiencia del compresor y deben corregirse.
- Simulación de eficiencia y caudal de aire, en esta prueba se simula la cantidad de aire comprimido que el compresor puede suministrar en un período de tiempo específico. Esto ayuda a evaluar la eficiencia del compresor y asegura que cumple con las especificaciones de rendimiento, Figura 4.2-4.

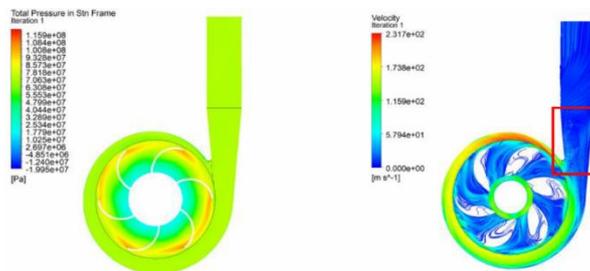


Figura 4.2-4. Simulación de caudal de aire [14]

- Simulación de Vibración, para este tipo de prueba se pretende analizar la vibración y el nivel de ruido durante el funcionamiento. Niveles inusualmente altos pueden indicar problemas mecánicos o desgaste que deben abordarse.
- Simulación de Temperatura, esta prueba es para simular la variación de la variable de temperatura del compresor durante la operación para asegurarse de que esté dentro de los límites seguros. El sobrecalentamiento puede indicar problemas en la lubricación o en la refrigeración.

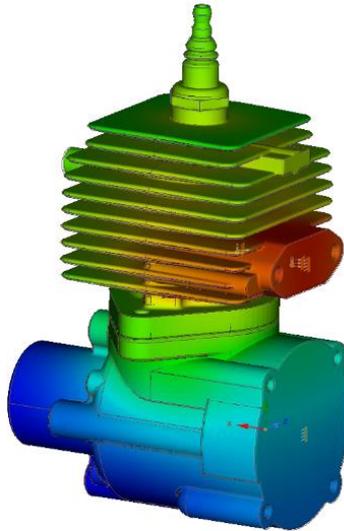


Figura 4.2-5. Simulación de temperatura motor [15]

- Simulación de Protecciones de Seguridad, este tipo de simulaciones se realizan para verificar el funcionamiento de las protecciones de seguridad, como interruptores de presión, válvulas de seguridad y sistemas de parada de emergencia.
- Simulación de Aceite en compresores de pistón lubricados, verificar el nivel de aceite y la calidad. Asegurarse de que el sistema de lubricación esté funcionando correctamente.
- Simulación de Regulación de Presión, en este tipo de estudio se ajusta la presión de salida del compresor y verificar la capacidad del regulador de mantener una presión constante.

#### 4.3. EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA ANTE FALLOS SIMULADOS

La evaluación y análisis de los fallos simulados en un compresor de pistón son muy importantes para garantizar la fiabilidad y la seguridad del sistema en situaciones adversas y de cada elemento, desde el punto de vista mecánico, estructural y de diseño. A la hora de evaluar estos supuestos simulados se tiene que identificar los fallos críticos tanto del sistema como de cada elemento que sea simulado, con estos fallos se realiza una lista de posibles fallos que podrían ocurrir en el sistema de instrumentación y control del compresor real. Con esta lista se debe priorizar aquellos que podrían tener un impacto significativo en el rendimiento y la seguridad.

La simulación de los fallos se debe introducir de forma hipotética con unos valores reales y controlados, esto implica simular el sistema o parte de este sin los sensores que llevaría el sistema real, para proporcionar esta información y también introducir errores en las lecturas, o de mal funcionamiento en componentes clave. Durante la simulación se debe observar la respuesta del sistema, es decir, monitorear la respuesta del sistema ante cada fallo simulado. Se observará cómo afecta el rendimiento general del compresor, la precisión de las mediciones y la capacidad del sistema para detectar y gestionar los fallos. También se verificará si las alarmas y protecciones configuradas en el sistema se activan correctamente en respuesta a los fallos simulados. Hay que asegurarse que estas alarmas también simuladas generan el mismo tipo de alertas visuales o sonoras, de tal forma que se tomen medidas para mitigar los riesgos, al igual que se evalúa los tiempos de respuesta del sistema ante fallos simulados. Determinando cuánto tiempo tarda el sistema en detectar, diagnosticar y responder a cada fallo. También se debe evaluar los efectos sobre el equipo y algunos componentes del efecto en una operación continua de larga duración y analizar cómo afecta los fallos simulados a dicha operación continua del compresor. Esto puede influir en la capacidad de mantener la producción, la estabilidad del compresor y la seguridad de las personas y del equipo. Con toda esta información registrada se realizará una evaluación y análisis post-fallo para entender las causas subyacentes de los fallos simulados y determinar si hay mejoras o ajustes necesarios en el diseño del sistema. Este proceso al producirse sobre un modelo virtual, según los resultados se puede iterar sobre el diseño del sistema y realizar mejoras según sea necesario.

#### 4.4. SIMULACION COMPRESOR

Una vez que se ha llevado nuestro modelo a AutoCAD se procede a elegir los elementos que se van a simular. En nuestro caso será en depósito del compresor y el pistón.

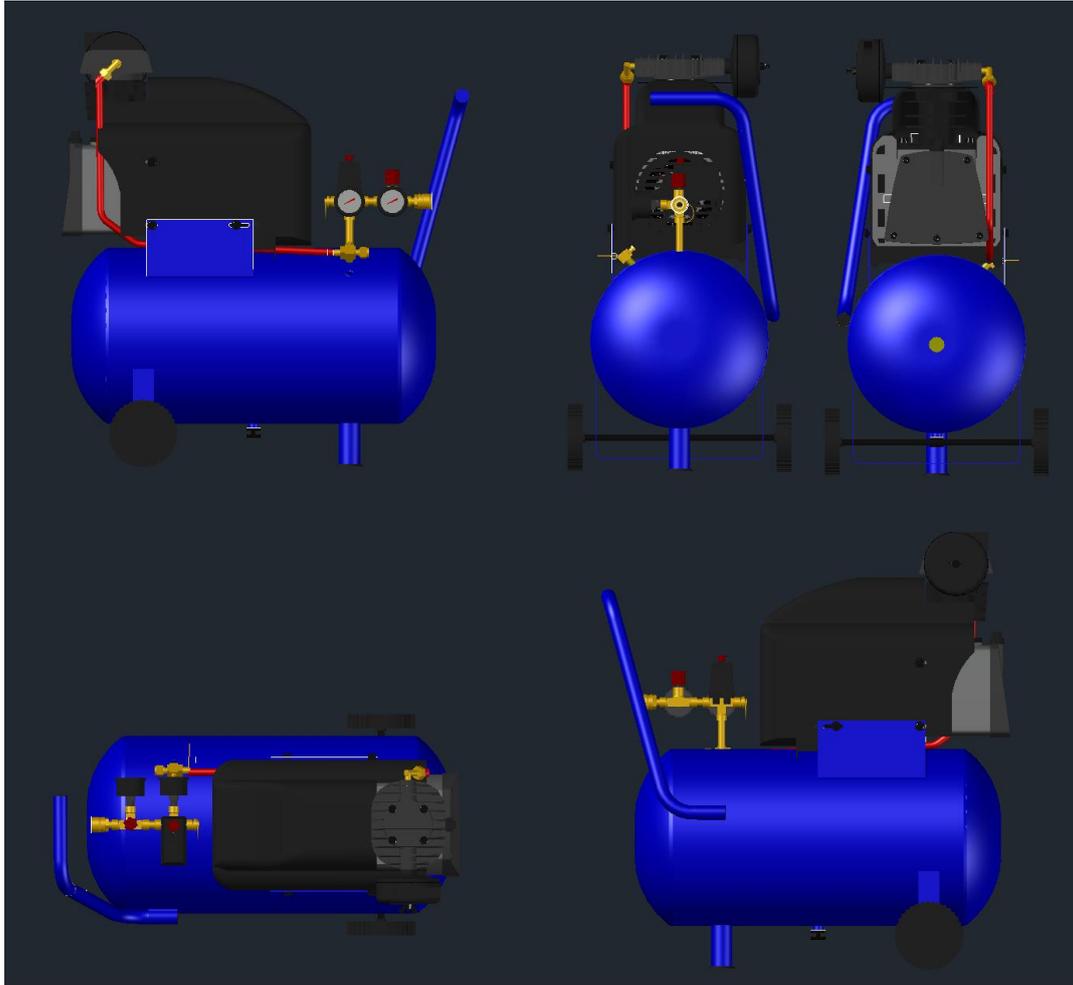


Figura 4.4-6. Vistas en 3D del compresor

#### 4.4.1. CONDICIONES DE SIMULACION

Las condiciones de entorno para las partes del compresor que se van a simular son condiciones de máximo trabajo de estas partes. Lo que se pretende es simular sobre todo son las tensiones y deformaciones de estos elementos que provoquen situaciones de rotura debido a estas condiciones de trabajo o incluso otros factores que desencadenen estas bajadas de rendimiento o la rotura de estos componentes, como puede ser las vibraciones en partes estructurales de nuestro compresor. Con estas hipótesis de partida y de simulación lo que se pretende es saber si los sensores repartidos por todos los elementos del compresor son suficientes si se dan estas condiciones en el ciclo real del compresor para analizar el mantenimiento predictivo más adecuado y sobre todo en funciones de sus condiciones de trabajo.

A la hora de crear el entorno de la simulación del tanque de aire comprimido, se debe tener en cuenta varios factores para reflejar con precisión el entorno real y el comportamiento

del sistema. Aquí hay algunas condiciones y parámetros importantes que se deben de considerar a la hora de configurar este entorno para su simulación. Estas variables son, por ejemplo, la presión Inicial, esta es la presión inicial en el tanque, que es cuando este no está en estado operativo ( $p_o$ ). Otro variable que se debe tener en cuenta es el volumen del Tanque ( $V_o$ ), esta es una variable que nos marca el rango de presiones y por tanto volumen de aire comprimido que puede soportar el depósito. También, se debe tener en cuenta el flujo de entrada, este será el aire de entrada en el compresor que, junto con el flujo de salida, aunque para la simulación no representará si hay alguna pérdida de presión en el compresor. Esta diferencia de flujo para otros estudios representa el consumo de aire en el sistema.

Otro elemento que se tiene en cuenta, sobre todo para simulaciones dinámicas, aunque no es nuestro caso, es la temperatura del aire comprimido, este valor es fundamental, ya que puede afectar la densidad y, por lo tanto, la presión. Otra variable a tener en cuenta es la eficiencia del Compresor, dentro de la simulación, al incorporar la eficiencia del compresor en la simulación, se puede reflejar la cantidad de energía requerida para comprimir el aire y por tanto su eficiencia.

Otros parámetros que se pueden definir en la simulación, es el tiempo total de simulación y ajustar los parámetros en consecuencia., también realizar hipótesis con la variable de pérdida de presión y así incluir posibles pérdidas de presión en el sistema, como las causadas por tuberías y accesorios asemejando más el modelo simulado al real. Las condiciones ambientales, es otra de las variables que se debe de considerar dentro de las condiciones de simulación, porque esta supedita el comportamiento de otras variables como la temperatura, densidad y presión atmosférica. Dentro de este estudio no se incluirán todas estas variables y tampoco se tendrán en cuenta otros elementos como son la apertura o cierre de válvulas, para simular cambios en el sistema. Después de enumerar las variables candidatas para generar la simulación, se deben tener en cuenta las características del depósito real que se muestran en la Tabla 4.1.

Depósito	24	litros
Aire Aspirado	220	litros/min
Potencia	2/1,5	HP/KW
Velocidad Giro Cabezal	2.850	rpm
Presión	10	bar
Dimensiones LxWxH	610x310x580	mm

Tabla 4–1. Características compresor de aire

#### 4.4.2. SIMULACION TANQUE DEL COMPRESOR DE AIRE

Generalmente los depósitos de los compresores de aire comprimido se suelen construir con materiales resistentes y duraderos para que puedan soportar la presión generada por el aire comprimido. Los materiales más comunes son:

- Acero:
  - Acero al carbono galvanizado, siendo el material más común para depósitos de compresores de aire debido a su resistencia y durabilidad.
  - Acero inoxidable AISI 304, este al igual que el acero al carbono son muy usado pero este se utiliza en aplicaciones donde la resistencia a la corrosión es una consideración importante.
- Aluminio:
  - Cuando se necesita reducir el peso del compresor y resistencia a la corrosión, se suelen emplear aleaciones de aluminio de la familia 20XX.

Estos materiales son seleccionados por su capacidad para soportar la presión interna del aire comprimido y su resistencia a la corrosión. Hay que tener en cuenta que la elección del material depende algunos factores como el tipo de compresor, la aplicación específica y los requisitos de resistencia química. En la Figura 4.4-7 se muestra el depósito de nuestro compresor.

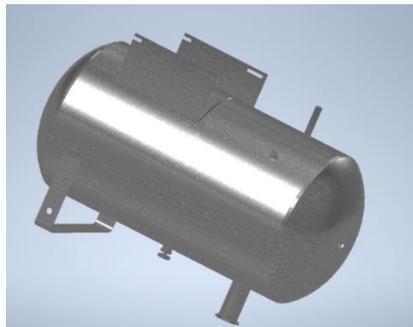


Figura 4.4-7. Depósito compresor de aire

Para crear la simulación, al ser la presión ejercida en el interior, desde inventor se crea un plano vertical al depósito y se realiza una representación como la de la Figura 4.4-8. Además, definimos la presión máxima que aguantará nuestro depósito que es de 15 bares, siendo este valor en libras por pulgada cuadrada sería 217,57 lpc.

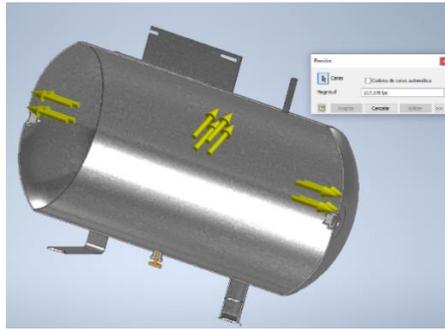


Figura 4.4-8. Vista interior del depósito compresor de aire

Posteriormente una vez que se pone la presión interior distribuida por todo el depósito de aire del compresor se procede al mallado para el cálculo de la simulación como se muestra en la Figura 4.4-9. Este mallado es continuo y con una intensidad de malla, adecuada para esta simulación.

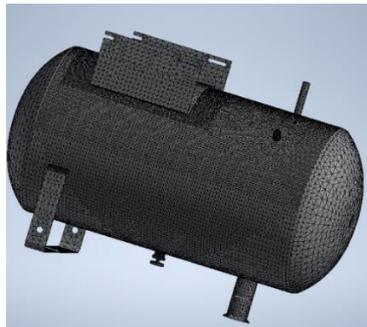


Figura 4.4-9. Mallado del depósito compresor de aire

Una vez introducido tanto los parámetros como el mallado de la pieza que se va a simular, se ejecuta la simulación y se obtienen los resultados como los de la Figura 4.4-10. Donde se reflejan las tensiones en partes estructurales del depósito.

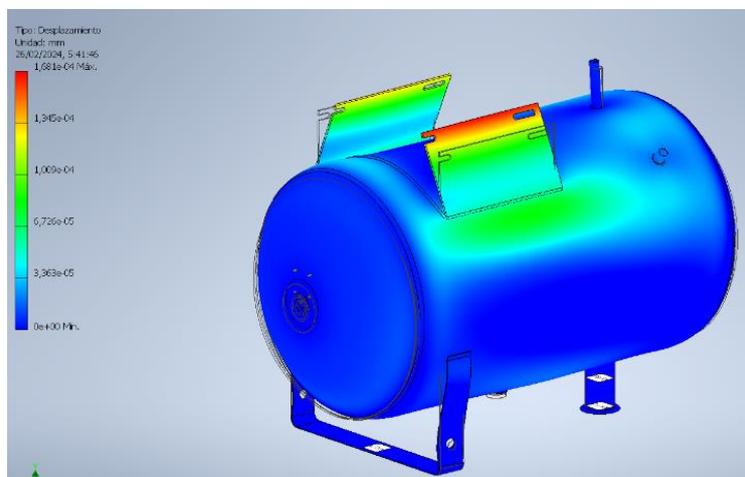


Figura 4.4-10. Simulación del depósito compresor de aire

En la Figura 4.4-11 se refleja el perfil del depósito y las deformaciones de este. Esta simulación lo que pretende es ver estas hipotéticas deformaciones dentro de este componente para analizar los efectos colaterales que conlleva dentro de su operativa, es decir, estas deformaciones como se aprecia en la Figura afectan directamente al soporte del compresor y esto genera directamente sobre este elemento elevadas vibraciones de trabajo. Estas vibraciones a su vez provocan microgrietas en el soporte, llegando a romper por la parte de la soldadura el depósito.

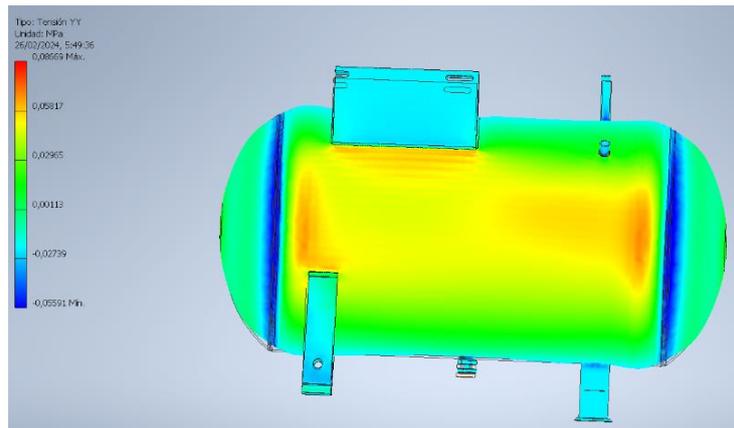


Figura 4.4-11. Tensiones en la simulación del depósito compresor de aire

Siguiendo con los resultados de la simulación, en la Figura 4.4-12, también se aprecian deformaciones en la estructura de soporte del depósito del compresor. Esto como se ha comentado anteriormente, es fuente de vibraciones y otros comportamientos no deseados dentro de la operativa de trabajo del compresor. Estos resultados se analizarán posteriormente para ir diseñando el plan de mantenimiento predictivo.

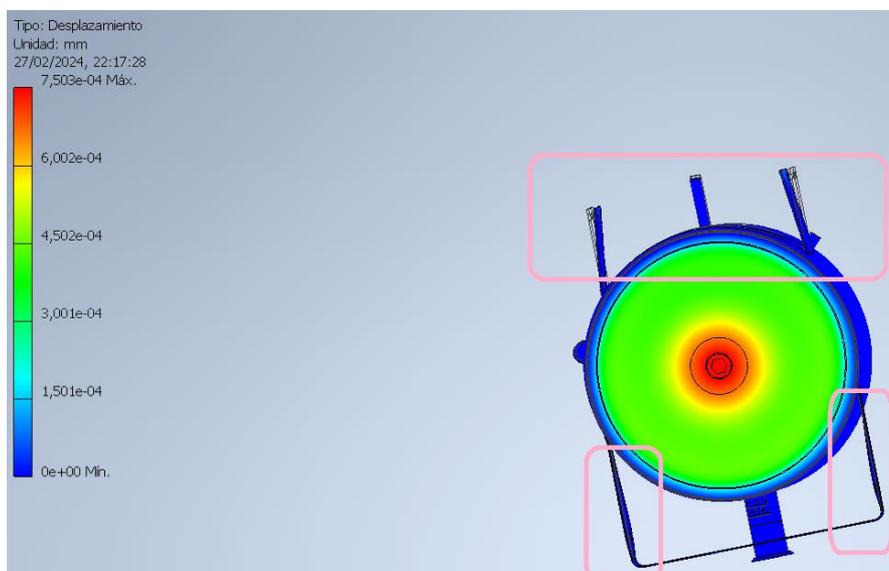


Figura 4.4-12. Deformaciones en la simulación del depósito compresor de aire

### 4.4.3. SIMULACION CAMARA PISTON COMPRESOR DE AIRE

En la Figura 4.4-13 se visualiza las distintas fases por las que ha pasado la cámara del pistón para poder simularla. Donde se puede observar cómo se han generado las presiones internas del componente y su posterior mallado para poder realizar la simulación estática de nuestro componente y analizar posteriormente que es lo que puede afectar una sobre presión dentro de estos elementos que generar el aire comprimido del compresor.

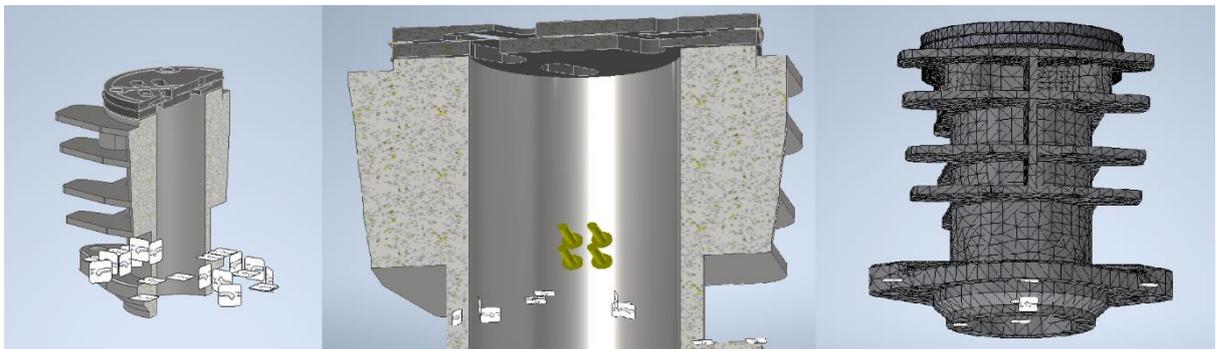


Figura 4.4-13. Fases cámara de pistón

Una vez realizada la simulación la Figura 4.4-14 muestra los resultados de este elemento y sobre todo que partes son más críticas cuando se somete a una sobrepresión, debida algún fallo de alguno de sus componentes.

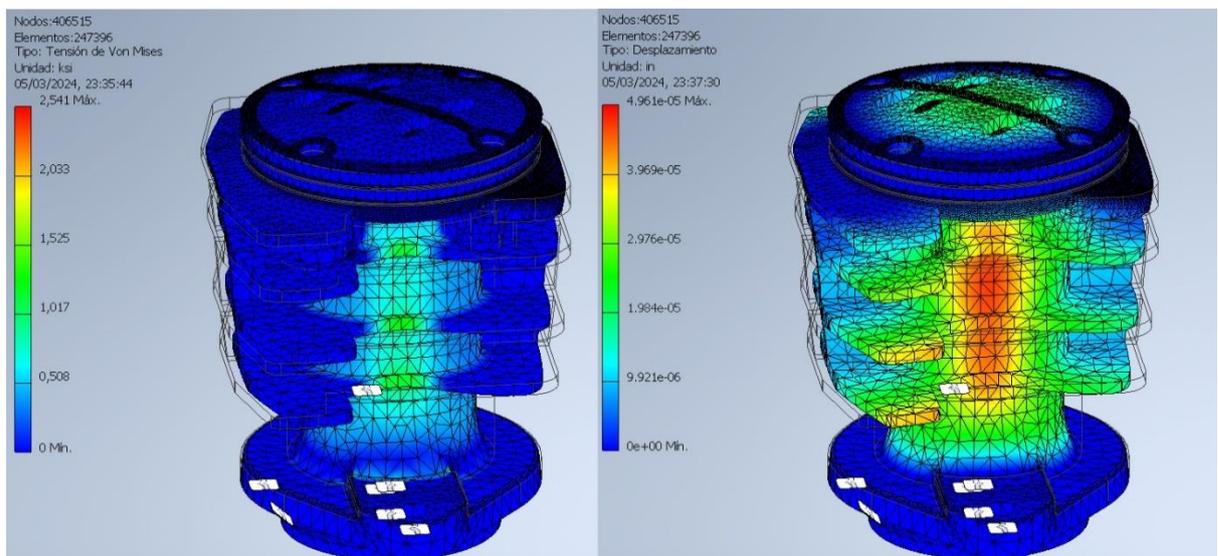


Figura 4.4-14. Deformaciones en la simulación de la cámara de pistón

En la Figura 4.4-15 se observa los distintos pasos por los que va pasando el pistón y el bulón interior para poder realizar la simulación de este componente.

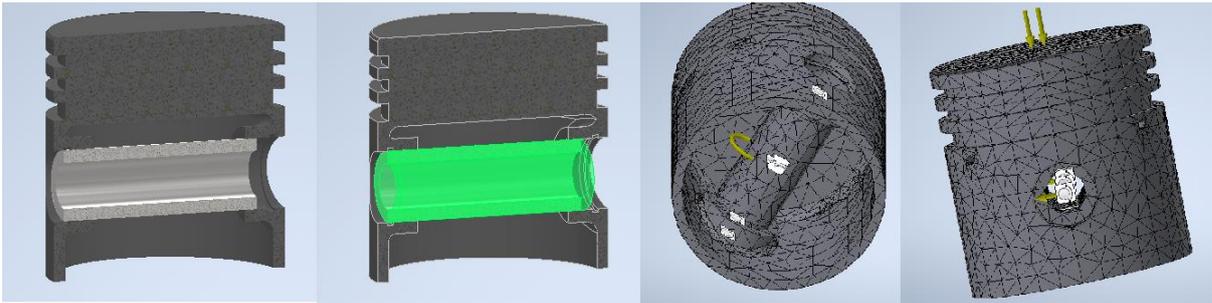


Figura 4.4-15. Fases pistón y bulón

Posteriormente en la Figura 4.4-16 se visualiza los resultados de la simulación de este componente. Como se puede observar, es uno de los elementos más críticos dentro del compresor, debido a factores como la temperatura, vibraciones, deformaciones y desgaste. Posteriormente se analizará este componente y se estudiará tanto su manteniendo predictivo como algunas pautas para eliminar pasibles causas de este comportamiento de este componente.

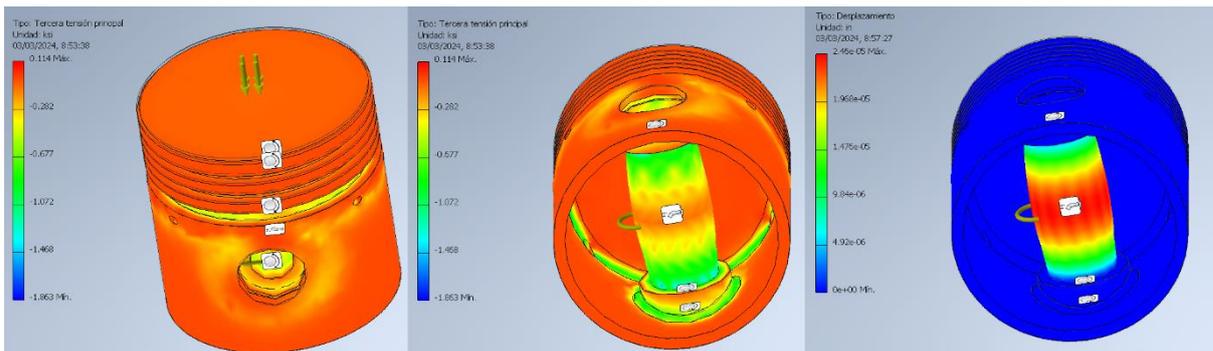


Figura 4.4-16. Deformaciones en la simulación del pistón.

Al igual que en los componentes anteriores, este componente que es el transmisor de movimiento del pistón, se realiza los distintos pasos de preparación para su simulación y obtener el resultado de los mismo para poder analizar su comportamiento.

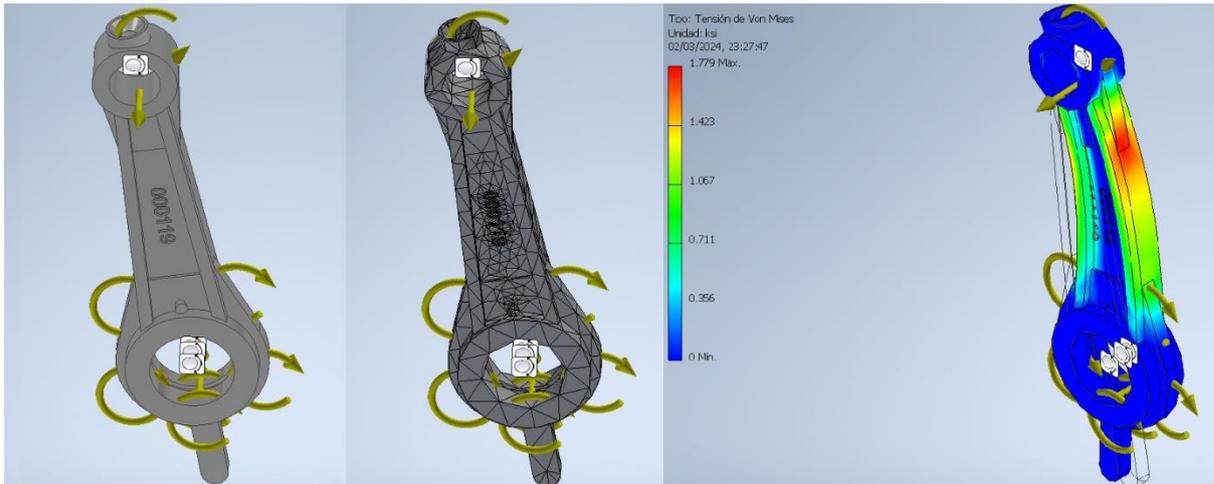


Figura 4.4-17. Tensiones brazo transmisor del pistón

En la Figura 4.4-17 se observa las tensiones que tiene el brazo transmisor del pistón debido a un sobre esfuerzo dentro de su comportamiento operativo. Estas tensiones pueden llevar a microgrietas, vibraciones o un bajo rendimiento del compresor bajo ciertas circunstancias operativas.

En La Figura 4.4-18 se observa de forma más clara están tensiones y deformaciones de este componente. Y como afecta sobre todo a la parte más delgada del elemento. Esta concentración de esfuerzos y deformaciones en esta parte del componente puede provocar una deformación plástica y su rotura.

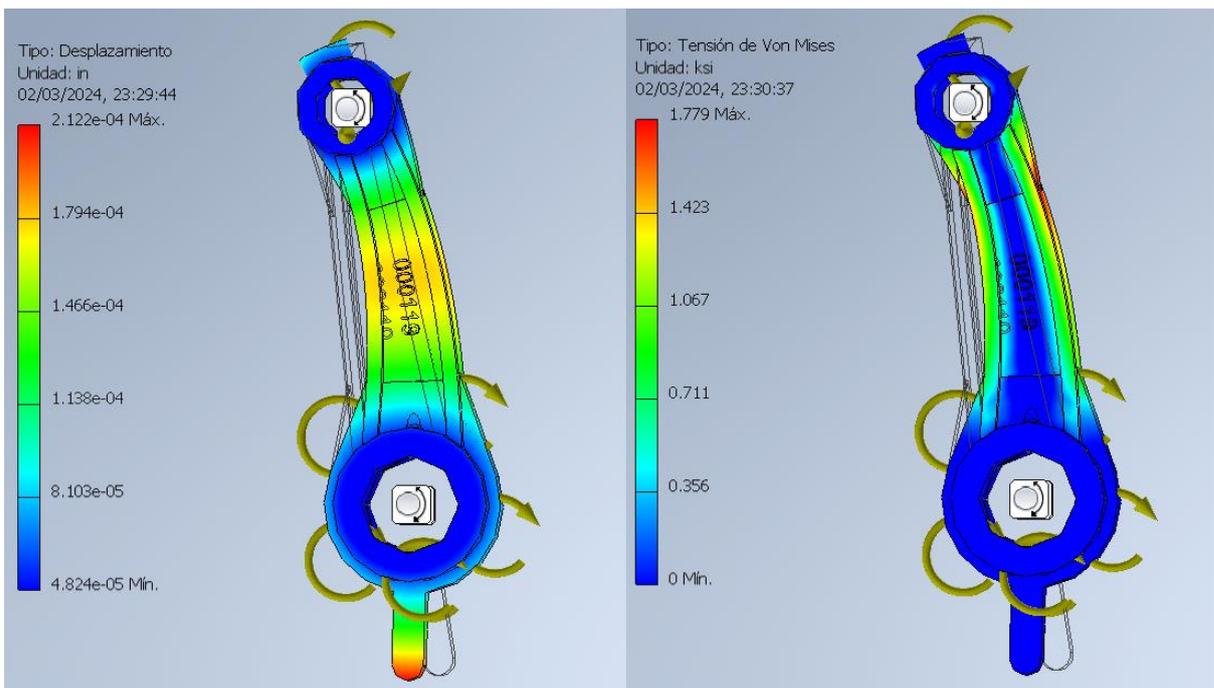


Figura 4.4-18. Deformaciones en la simulación del brazo transmisor del pistón

## 5. PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO

La puesta en marcha consiste en poner en marcha el equipo dentro del lugar de trabajo donde va a operar y llevar a cabo todos los ajustes necesarios hasta que funcione en condiciones de servicio desde carga parcial hasta carga completa. Esta puesta en marcha incluirá el ajuste de los componentes interactivos dentro de los ciclos de control para lograr la respuesta de control óptima del compresor.

Cuando los elementos del sistema equipo están duplicados, como pueden ser sensores de seguridad, válvulas o elementos de diseño sobre todo de seguridad, se debe realizar las pruebas de todos y cada uno de estos sistemas redundante para su puesta en marcha.

Lo más crítico dentro de la puesta en funcionamiento del sistema de instrumentación y monitoreo en un compresor de aire son los procesos para garantizar un rendimiento eficiente y seguro. Por tanto, lo primero que se debe realiza antes de la puesta en marcha es una revisión de documentación relacionada con el sistema de instrumentación y monitoreo. Esto incluye manuales del fabricante, esquemas eléctricos y cualquier otro documento técnico relevante. Posteriormente se realizará una verificación de los componentes del sistema de instrumentación que estén presentes y en buen estado. Esto incluye sensores, transmisores, controladores, cables y cualquier otro elemento necesario. También, se debe realizar una verificación de conexiones, donde se verificará que todas las conexiones eléctricas y comunicación para garantizar que estén correctamente instaladas. Además, se tiene que verificar el sistema de alimentación eléctrica que suministra la energía eléctrica necesaria al sistema.

Por último, se debe realizar la configuración del sistema, es decir, configurar los parámetros del sistema de instrumentación según las especificaciones del compresor de aire. Ajustando las configuraciones de los sensores, umbrales de alarma y cualquier otro ajuste necesario. Con este protocolo cumplimentado se debe realizar la calibración de los sensores, esta se realiza para garantizar lecturas precisas y sobre todo para garantizar y minimizar posibles fallos en la vida operativa de muchos de sus componentes. Se debe utilizar los patrones de calibración certificados y ajustar los sensores según sea necesario. Esta puesta de funcionamiento es la que se realizará en el sistema de instrumentación que también conllevara verificación de las pruebas funcionales, configuración de alarmas, pruebas de comunicación y todo este protocolo se tendrá que realizar cada vez que se instale un nuevo sensor o se reemplace algún componente de nuestro sistema.

### 5.1. IMPLANTACIÓN DE LOS SENSORES EN EL SISTEMA DE MONITOREO

Una vez realizada la simulación de los componentes más críticos dentro del funcionamiento operativo del compresor, se analiza y se ratifica la implantación de sensores en el sistema de monitoreo de compresor. Este es un proceso clave para garantizar mediciones precisas y una supervisión efectiva del rendimiento del conjunto. A continuación, se presentan unas directrices generales para realizar la implantación de sensores:

- Identificación de parámetros críticos, donde se determine los parámetros críticos que deben ser monitoreados. Esto puede incluir temperatura del aire, presión, caudal, humedad, vibraciones, entre otros, dependiendo de las necesidades específicas del compresor.
- Selección de los sensores más apropiados para medir los parámetros identificados. En esta etapa hay que garantizar que los sensores elegidos sean compatibles con las condiciones operativas del compresor y cumplan con las especificaciones de precisión requeridas.
- Distribución estratégica de los sensores, una vez realizado los análisis y evaluaciones, se determina la ubicación más adecuada para cada sensor. Estos sensores se tienen que colocar en puntos críticos del sistema donde puedan proporcionar lecturas representativas del rendimiento general del compresor.
- Instalación, ubicación real y pruebas de los sensores para verificar que estos funcionan correctamente, para ello, se deben de instalar soportes para fijar los sensores de manera segura y estable.
- Asegurar las conexiones eléctricas y de comunicación, es decir, se deben de diseñar un procedimiento para conectar los sensores a la fuente de alimentación eléctrica y al sistema de comunicación según las especificaciones del fabricante. Hay que asegurarse que se utilizan cables adecuados y verifica la polaridad y la integridad de las conexiones.

- Puesta en funcionamiento inicial, donde se realiza una calibración Inicial utilizando los estándares de calibración para asegurar lecturas precisas.
- Se tiene que verificar las alarmas, además de configurarlas cada una asociada con cada sensor, estableciendo umbrales adecuados. Se realizará pruebas para asegurar que las alarmas se activan correctamente en caso de condiciones fuera de rango.
- Uno de los últimos pasos es la realización de pruebas funcionales para cada sensor individualmente y para el sistema en su conjunto. Se verificará que los sensores proporcionen lecturas coherentes y que la información se transmita correctamente al sistema de monitoreo.
- Una vez realizada las pruebas funcionales se realizará la integración con el Sistema de Monitoreo, donde se integra los sensores con el sistema de monitoreo del compresor de aire.

En este punto, cuando el sistema ya está lo suficientemente optimizado se procederá a desarrollar el mantenimiento Preventivo para este sistema, donde se establecerá un programa de mantenimiento preventivo para los sensores y para los componentes del compresor. Se realizarán calibraciones periódicas y verifica la integridad física de los sensores para asegurar mediciones precisas.

## 5.2. CONFIGURACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES ESCOGIDOS

Una vez que se valida la simulación de los componentes y se analiza los posibles fallos de compresor se procede a la instalación, configuración y calibración de los sensores. Este es una etapa esencial para garantizar un funcionamiento correcto y eficiente del conjunto. Por tanto, para la configuración y calibración de estos sensores se tiene que realizar según las especificaciones y características particulares del compresor y siguiendo las instrucciones del fabricante. El protocolo o los pasos para configurar y calibrar los sensores serán los siguientes:

- Identificación de los sensores junto a su documentación técnica o del fabricante para analizar sus especificaciones antes de proceder a su configuración y calibración.

- Verificación de los sensores, antes de la calibración, hay que asegurarse de que estén en buen estado. Inspeccionar las conexiones, cables y el estado físico del sensor. En caso de defectuoso reemplazarlo.
- Configuración del sistema de control, en este paso se debe acceder al sistema de control del compresor y verificar las opciones de configuración de sensores.
- Ajustar rangos y unidades para cada sensor. Hay que ajustar los valores máximos y mínimos permitidos para evitar lecturas fuera de rango que podrían afectar la operación del compresor.
- Calibración de Presión, temperatura, caudal y vibraciones. Para cada una de estas calibraciones se usará el calibrador específico y recomendado por el fabricante.
- Verificación continua, se deberá proporcionar un programa de verificación continua para asegurarse que los sensores mantengan su precisión a lo largo del tiempo. Se deberán realizar inspecciones periódicas y calibraciones según sea necesario o las marque el fabricante o la propia inspección de campo.
- Registro digital de todas las calibraciones realizadas, fechas, resultados y cualquier ajuste hecho. Mantén esta documentación para futuras referencias y auditorías.

Hay que tener presente que la calibración y configuración de sensores puede variar según el tipo y la marca del compresor, no es un protocolo estandarizado para cualquier tipo de compresor. Siempre hay que seguir las instrucciones proporcionadas por el fabricante.

## **6. ANÁLISIS DE DATOS**

### **6.1. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS POR LA SIMULACION**

Una vez realizadas las simulaciones del depósito del compresor y del sistema que genera el aire comprimido (pistón, cámara y brazo transmisor de movimiento), se puede analizar y sacar las valoraciones sobre que posibles problemas se deben evitar durante el funcionamiento del compresor para prevenir posibles fallos o mal funcionamientos del equipo.

Todas las simulaciones se han realizado con un sobre esfuerzo o umbrales de presión superiores al de trabajo del equipo. Se ha realizado, con este tipo de condicionante para ver cómo se comporta desde el material del equipo a los fallos que se pueden provocar. Estos fallos están relacionados con la pérdida de geometría de algunos elementos como el depósito o elementos del pistón.

Como fallo colateral se producen pérdidas de presión y vibraciones en todo el equipo. Estas vibraciones desencadenan bajo rendimiento y roturas en elementos estructurales del compresor, pudiendo provocar desde una baja eficiencia en los casos menos críticos hasta la pérdida total por avería en elementos esenciales del propio equipo.

Como se ha analizado en las Figuras del apartado 4.4, los puntos críticos por sobre presión es en las soldaduras y en partes del equipo que no tiene un espesor adecuado para tener una sobre presión en picos de trabajo. Esto provoca las vibraciones en todo el compresor y habría que tener en cuenta sistemas para minimizar o amortiguar estas vibraciones en caso de una pérdida de geometría en alguno de sus componentes, esto se puede minimizar con algún tipo de juntas o plataformas de caucho distribuidas por las partes de contacto del equipo con la plataforma donde va a estar ubicado el equipo. También se tendría que tener en cuenta algún tipo de sistema que en el momento que algunos de los sensores de temperatura, presión o caudal pasaran el umbral desconectara automáticamente el equipo y enviara a algún software de mantenimiento preventivo los valores que han desencadenado esa parada del equipo.

### 6.2. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL SISTEMA DE MONITOREO

Estos datos de monitores quedan fuera del alcance de la simulación realizada en este estudio, lo que se tiene que tener en cuenta con este estudio y los sensores instalados en el equipo, es la posibilidad de recopilación de datos y el posterior análisis de los indicadores de rendimiento procedentes de estos sensores que ofrecerán una información cuantitativa para poder realizar mejoras en la estrategia de control.

Una vez ya configurado y calibrado el equipo, en la operativa del compresor se debe realizar un análisis dinámico de los eventos del sistema y la respuesta del control del compresor, cada n intervalos o ciclos programados desde su puesta en marcha. Se deben tener en cuenta Indicadores Clave de Desempeño (KPI) y los Indicadores Clave de Rendimiento Energético (EnPI)

y con el software adecuado se calcularán los valores de medición y referencia para poder ir realizando un mantenimiento predictivo del equipo. A modo de ejemplo, los datos de rendimiento ilustrados en la Figura 6-1 reflejan el rendimiento medio por hora, derivado de mediciones de referencia con una tasa de muestreo de 100 milisegundos y un intervalo de datos de seis segundos.

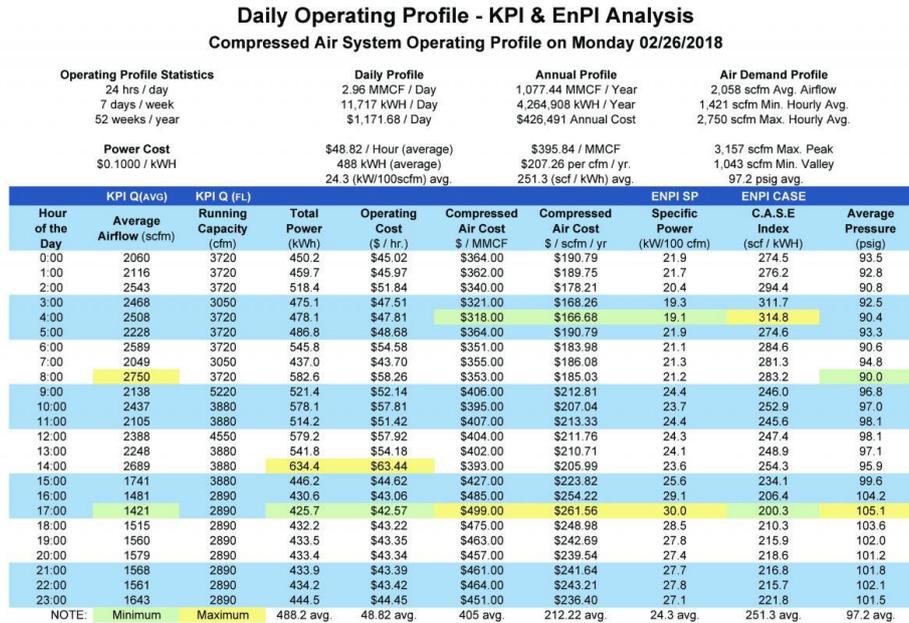


Figura 6-1. Rendimiento medio por hora [16]

### 6.3. IDENTIFICACIÓN DE TENDENCIAS EN LOS DATOS

Después de los resultados obtenidos, sobre todo el más importante es la presión, densidad y temperatura de trabajo, se puede identificar conductas y tendencias para la monitorización y análisis de datos predictivos para optimizar el rendimiento del equipo. Por tanto, la identificación de tendencias en los datos predictivos proveniente de una simulación en su fase de diseño y fabricación o una monitorización en la fase operativa se convierte en una herramienta eficaz para prever posibles problemas, mejorar la eficiencia operativa y reducir el coste de mantenimiento. Por este motivo, la identificación de tendencias en los datos predictivos de un compresor permite desde el departamento de ingeniería como a las empresas que uses estos equipos anticipar y abordar problemas potenciales antes de que afecten la producción. Esto es especialmente crítico en entornos industriales donde la interrupción no planificada puede tener un impacto significativo en la productividad y la rentabilidad. Por este motivo en este trabajo se ha separado la identificación de tendencias de datos o variables en dos partes.

- Parámetros de la Simulación

Estos parámetros han sido descritos en el apartado 4.4, son parámetros que simulan condiciones del equipo bajo parámetros como la presión interna dentro de la cámara o del depósito del compresor. Este parámetro viene también influenciado por otros parámetros de las condiciones ambientales y operativas del equipo como son la densidad y la temperatura. Al final de la simulación se ha evaluado que estos parámetros influyen sobre otro componente que es la vibración sobre partes estructurales del compresor. Estas vibraciones lo que van a desencadenar con pérdidas de eficiencia, más gasto energético y sobre todo daños sobre el equipo de trabajo.

- Parámetros para la Monitorización

Los parámetros que se deben tener en cuenta debido a los tipos de sensores instalados en el equipo son:

- Presión del Aire
- Temperatura del Sistema
- Consumo de Energía
- Vibración

Una vez definido los distintos parámetros en las fases tanto de diseño como operativa se debe seleccionar una herramienta de análisis de datos, esta herramienta deberá representar y analizar los parámetros anteriormente citados para generar un *análisis estadístico para evaluar patrones* y variaciones en los datos predictivos. Esto puede incluir el análisis de la media, la desviación estándar y la identificación de valores atípicos. Además, debe tener la capacidad de visualizar y representar gráficamente las tendencias en los datos. Los gráficos de series temporales y diagramas de dispersión pueden ser especialmente útiles para identificar patrones.

Con estas pautas se identifican las tendencias que proporcionarían el mantenimiento predictivo para identificar de forma ágil las tendencias de los componentes permitiendo la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo, reduciendo el tiempo de inactividad no planificado. Además, se optimiza el rendimiento ajustando la operación del compresor según las tendencias identificadas puede llevar a una mayor eficiencia y ahorro de

energía. Esto provocará una mayor vida útil del equipo y abordará problemas antes de que se conviertan en fallos graves contribuyendo a prolongar la vida útil del compresor y reducir los costos de reemplazo.

Como se ha mencionado anteriormente la identificación de tendencias en los datos predictivos de compresor es una herramienta esencial para la gestión eficiente, así como la combinación de parámetros clave, análisis estadístico que permiten a las empresas tomar decisiones informadas, mejorar la confiabilidad operativa y mantener la competitividad en un entorno industrial cada vez más digitalizado.

### **6.4. PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

Después del análisis de este trabajo, se puede decir que la planificación del mantenimiento predictivo en un compresor implica una serie de pasos y consideraciones para garantizar la eficacia y la eficiencia del equipo. Estos pasos se pueden describir de la siguiente forma:

- Identificación de Componentes Críticos, donde se tiene que analizar el compresor para identificar los componentes críticos que tienen un impacto significativo en el rendimiento y la operación. Además, de priorizar los elementos en función de su importancia para el funcionamiento general del compresor.
- Selección de Sensores y Tecnologías de Monitoreo, es decir, elegir sensores apropiados para medir variables clave como temperatura, presión, vibración y corriente eléctrica. Seleccionar tecnologías de monitoreo continuo que se integren de manera efectiva con los sistemas existentes del compresor.
- Configuración de umbrales y parámetros para establecer dichos umbrales y valores de referencia para cada variable medida, así como definir los criterios que indiquen condiciones normales y anómalas en el funcionamiento del compresor.
- Poder desarrollar modelos predictivos e implementar algoritmos y modelos predictivos que utilicen datos históricos para anticipar posibles fallos e integrar técnicas de optimización de los datos para mejorar la capacidad predictiva.

- Incorporar sistemas de alerta y notificación, de tal forma que se pueda configurar sistemas de alerta y notificación que informen automáticamente al personal de mantenimiento cuando se detecten condiciones problemáticas. Estableciendo niveles de prioridad para las alertas en función de la gravedad de la situación.
- Establecer criterios sobre la frecuencia de Monitoreo, es decir, se deberán definir la frecuencia con la que se realizará el monitoreo en tiempo real de los sensores, ajustando la frecuencia en función de la criticidad de los componentes y las condiciones operativas del compresor.
- Elaboración de programas de mantenimiento predictivo, desarrollando protocolos de mantenimiento específicos basados en las predicciones del sistema. De tal forma, que se pueda determinar la periodicidad de las intervenciones de mantenimiento preventivo en función de las predicciones y el estado actual del compresor.
- Por último, una evaluación y mejora continua, es decir se debe evaluar regularmente el rendimiento del sistema de mantenimiento predictivo. Así se podrá realizar ajustes y mejoras continuas en función de los resultados obtenidos y las nuevas tecnologías disponibles.

## 7. RELACIÓN DEL TFG CON LOS ODS

Este Trabajo Fin de Grado se relaciona con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la ONU, que son cruciales para fomentar un desarrollo equitativo y sostenible a nivel global.

- ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura El proyecto contribuye directamente al ODS 9, ya que se enfoca en la mejora de la infraestructura industrial a través de la implementación de tecnologías de monitoreo y mantenimiento predictivo. Esto no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también promueve la innovación tecnológica en la gestión de equipos industriales.
- ODS 12: Producción y Consumo Responsables Al optimizar el uso de recursos y reducir el desperdicio mediante el mantenimiento predictivo, el proyecto apoya el ODS 12. La reducción de fallos inesperados y la prolongación de la vida útil de los equipos contribuyen a una producción más sostenible y responsable.

- ODS 13: Acción por el Clima Implementar prácticas de mantenimiento predictivo puede ayudar a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al mejorar la eficiencia energética de los sistemas industriales. Esto está alineado con el ODS 13, que busca combatir el cambio climático y sus impactos.

## 8. CONCLUSIONES

Una vez realizado el estudio del compresor a través de unas simulaciones en Inventor de Autodesk, estas desprenden que hay que tener en cuenta en las primeras fases de diseño el tipo de material que tiene que estar fabricado el equipo. En función de este material se tendrán una serie de características que son las que se deben estudiar y priorizar como es el peso del equipo, condiciones de trabajo, tiempo de trabajo y mantenimiento.

Una vez que desde ingeniería y a través de dichas simulaciones se describen estos requisitos se pasa a la fase de fabricación donde se siguen teniendo en cuenta estos estudios de la simulación de los componentes para ubicar los distintos sensores de presión, caudal y temperatura y a partir de ellos ir generando una serie de datos para alimentar programas específicos de mantenimiento predictivo para poder precisar cuándo y cómo se debe realizar dicho mantenimiento.

Además, durante la elaboración de este trabajo y bajo la simulación se ha podido comprobar que una deformación en alguno de sus componentes es una fuente de vibraciones que es uno de los principales elementos de avería y baja eficiencia de estos equipos. Estas vibraciones afectan muy negativamente a la parte estructural del equipo. Este problema también se abordará en este mantenimiento predictivo, dando indicaciones de cómo se puede minimizar y recomendando que tipo de plataforma es la más adecuada para soportar este equipo. Estas deformaciones se pueden provocar de forma directa debido a un rango de algún parámetro como la presión que puede provocar esta deformación o puede ser provocada debido a un impacto de algún operario o de otro elemento externo cercano al equipo. Por tanto, el mantenimiento predictivo también debe abordar del área donde debe estar ubicado el equipo y los elementos de protección exterior que debería tener para prevenir este tipo de impactos.

Como resumen, el mantenimiento predictivo se tiene que sacar como una extrapolación de los análisis y estudios en el diseño y de la recopilación de datos por software de otros equipos

de las mismas características para que estos nos den las tendencias predictivas de mantenimiento y posibles fallos de los equipos debido al envejecimiento de las piezas o a las horas de trabajo que están funcionando.

## PLIEGO DE CARACTERISTICAS TECNICAS

### Descripción del Producto

El compresor de aire ABAC, de pistón L20 ABAC HP 2 L24 - 4116023464. Es un compresor lubricado con transmisión directa. La gama de compresores L20 hace que las pequeñas tareas sean más simples que nunca. Este modelo destaca al permitir una presión máxima de hasta 10 bares, una característica poco común en los compresores monoblock. Con una excelente tecnología y un funcionamiento sencillo, estos compresores son adecuados para una amplia variedad de aplicaciones, desde clavar clavos o instalar grapas hasta trabajos de soplado e inflado. Ofrecen un caudal superior y tienen la capacidad de alcanzar una presión de 10 bares. Perteneciente a la serie LINE, estos compresores son ligeros, compactos y fáciles de transportar, diseñados con un funcionamiento sencillo y fiable pensado para uso ocasional. En el Anexo se ha insertado su ficha y los planos de este compresor.

### Capacidad y Rendimiento

El compresor de aire ABAC, modelo L20 ABAC HP 2 L24 (referencia 4116023464), ofrece una notable capacidad y rendimiento para diversas aplicaciones industriales y comerciales. Su capacidad de producción está diseñada para proporcionar un caudal de aire comprimido de 210 LPM, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de tareas de trabajo. La presión máxima del compresor L20 ABAC HP 2 L24 puede generar una presión máxima de hasta 10 bares, lo que garantiza un suministro de aire comprimido confiable incluso para aplicaciones que requieren presiones más altas. Este modelo utiliza un diseño de compresor de pistón, garantiza una eficiente generación de aire comprimido con un bajo nivel de pulsaciones y una operación suave y silenciosa. Está equipado con un motor de alta potencia y eficiencia, lo que garantiza un rendimiento óptimo y una larga vida útil del equipo. El compresor L20 ABAC HP 2 L24 tiene dimensiones compactas y un peso moderado, lo que facilita su transporte y su integración en diferentes entornos de trabajo. Fabricado con materiales de alta calidad y siguiendo rigurosos estándares de fabricación, este compresor ofrece una excelente durabilidad y fiabilidad en su funcionamiento, lo que reduce al mínimo el tiempo de inactividad y los costos de mantenimiento. Cuenta con un sistema de control avanzado que permite ajustar la presión de

salida y monitorear los niveles de presión y temperatura del aire comprimido, lo que garantiza un funcionamiento seguro y eficiente. Tiene una capacidad del depósito de 24 L.

### **Tipo de Compresor**

El compresor de aire ABAC modelo L20 ABAC HP 2 L24 (referencia 4116023464) es un compresor de pistón. Este tipo de compresor utiliza un mecanismo de pistón alternativo para comprimir el aire con un flujo de aire a 10 m<sup>3</sup>/h, máximo 1,5 CV. El pistón se mueve dentro de un cilindro, creando presión al comprimir el aire en su carrera descendente. El aire comprimido se almacena en un tanque hasta que se necesita.

Los compresores de pistón son conocidos por su capacidad para producir altas presiones y su versatilidad en una amplia gama de aplicaciones industriales y comerciales. Son robustos y confiables, adecuados para entornos de trabajo exigentes. Además, los compresores de pistón suelen ser más económicos en comparación con otros tipos de compresores.

### **Motor y Alimentación**

El compresor de aire ABAC modelo L20 ABAC HP 2 L24 (referencia 4116023464) está equipado con un motor eléctrico monofásico de 2 HP. Este motor es alimentado por corriente eléctrica con un régimen de rotación del motor de 2850 rpm y máxima de 3400 rpm, siendo el responsable de impulsar el pistón dentro del cilindro para comprimir el aire. En cuanto a la alimentación, el compresor L20 ABAC HP 2 L24 está diseñado para operar con un suministro eléctrico estándar de corriente alterna (CA) a un voltaje de 230 v y una frecuencia de 50 Hz. La bomba es de aire aspirado de 220 l/min de una etapa, lubricado por aceite con un cilindro sin colector de refrigeración y fabricada con hierro fundido.

### **Control y Monitoreo**

El compresor de aire ABAC modelo L20 ABAC HP 2 L24 (referencia 4116023464) está diseñado con un sistema de control y monitoreo que proporciona funcionalidades para ajustar y supervisar el rendimiento del compresor. El sistema de control permite ajustar la presión de salida del aire comprimido según las necesidades específicas de la aplicación. Esto garantiza una operación precisa y eficiente del compresor. El compresor está equipado con indicadores que muestran los niveles de presión y temperatura del aire comprimido en tiempo real. Esto permite monitorear el funcionamiento del compresor para detectar cualquier tipo anomalía o

sobrecalentamiento. Incorpora funciones de protección que activan alarmas o detienen automáticamente el compresor en caso de condiciones anormales, como presiones excesivas o temperaturas elevadas, para prevenir daños en el equipo. La interfaz de control es fácil de usar y proporciona acceso rápido a las funciones de ajuste y monitoreo del compresor. Esto facilita la operación y la configuración del equipo, incluso para usuarios con poca experiencia. El sistema de control y monitoreo del compresor de aire ABAC L20 proporciona herramientas para ajustar, supervisar y proteger el funcionamiento del equipo, garantizando un rendimiento confiable y seguro en diversas aplicaciones industriales y comerciales.

#### **Dimensiones y Peso:**

Las dimensiones del compresor son:

- Ancho: 330 mm
- Largo: 600 mm
- Alto: 620 mm

El peso máximo del compresor es de 25 Kg

#### **Nivel de Ruido**

El nivel de emisiones sonoras de este equipo es de 97 dB(A).

#### **Mantenimiento y Servicio**

El mantenimiento y servicios estarán descritos dentro de los manuales que vienen incorporados en el embalaje del producto.

#### **Certificaciones y Normativas**

El compresor de aire ABAC, debe cumplir con varias certificaciones y normativas para garantizar su calidad, seguridad y conformidad con los estándares industriales.

- **Normativa Europea (CE):** Para cumplir con los requisitos establecidos por la Directiva de Equipos a Presión (PED) y otras directivas de la Unión Europea que apliquen a equipos industriales, garantizando la seguridad y la libre circulación de productos en el mercado europeo.
- **ISO 9001:** Certificación de sistema de gestión de calidad que garantiza que el compresor ha sido fabricado bajo estándares de calidad reconocidos internacionalmente.

- **ISO 1217:** Norma que establece los requisitos y métodos de prueba para la determinación del rendimiento de los compresores de aire.
- **ISO 14001:** Certificación de sistema de gestión ambiental que asegura que el fabricante del compresor tiene procedimientos establecidos para minimizar el impacto ambiental de su producción y operaciones.
- **Normas de Seguridad Eléctrica:** Cumplimiento con normativas como la Directiva de Baja Tensión (LVD) y la Directiva de Compatibilidad Electromagnética (EMC), que garantizan la seguridad eléctrica y la compatibilidad electromagnética del equipo.
- **Normativas de Ruido:** Cumplimiento con normativas locales o regionales que establecen límites máximos de emisión de ruido para equipos industriales, asegurando que el compresor no genere niveles de ruido excesivos.

Toda la normativa para este tipo de equipos está recogida en el apartado 3.3.8 de este estudio.

### **Garantía**

La garantía estará descrita dentro de los manuales que vienen incorporados en el embalaje del producto.

### **Estudio y análisis**

Para este producto se ha realizado una serie de modificaciones introduciendo una serie de sensores para recopilar y adquirir datos operativos del equipo. Todos estos sensores y material incorporado al equipo están totalmente homologado y con la garantía de los proveedores donde se ha comprado cada uno de los componentes. Con ello, se pretende elaborar un protocolo de mantenimiento predictivo que optimice al equipo en durabilidad y en eficiencia, optimizando el trabajo de este equipo dentro de la cadena de producción de la empresa. En el anexo se proporciona una tabla modelo de cómo se debería rellenar los datos para el mantenimiento predictivo de este equipo.

## PRESUPUESTO

Los aspectos a considerar para el presupuesto en nuestro caso serán:

- Materiales: licencias de software, sensores, herramientas
- Equipamiento: uso de equipos específicos, impresión, equipos de medida
- Gastos de ingeniería: horas de ingeniería o taller
- Instalación y modificación: instalación de sensores, mecanizado de piezas.
- Mantenimiento y simulación: coste lubricante, recambios, y horas de ensayo.

Se intenta generar un presupuesto bien elaborado como herramienta indispensable para la correcta gestión de nuestro estudio. Permitiendo optimizar recursos, tomar decisiones, mejorar la organización y comunicar de forma efectiva.

### 1.1. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

En este apartado se va a realizar el cálculo asociado al coste económico que ha supuesto la realización de este trabajo. Se parte que este trabajo es el resultado de la demanda de una empresa que quiere implementar un mantenimiento predictivo y este trabajo es el que necesita la empresa para su desarrollo e implementación dentro de su operativa habitual. Por tanto, se realiza el coste económico de este proyecto que constará de costes diseño, ejecución, ensayo y validación e instalación y modificación.

Código	Capítulo	Presupuesto(€)
C01	Diseño	1530.00
C02	Ejecución	1506.00
C03	Ensayo y Validación	460.00
C04	Instalación y Modificación	775.00
<b>TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL</b>		4271.00
	13% Gastos Generales	555.23
	6% Beneficio Industrial	256.26
<b>SUMA DE G.G. y B.I.</b>		811.49
<b>TOTAL PRESUPUESTO SIN IVA</b>		5082.49
	21% IVA	1067.32
<b>TOTAL PRESUPUESTO GENERAL</b>		6149.81

Tabla 2 Coste Final

## CAPÍTULO C01 DISEÑO

En este capítulo se contemplan todas las actividades relacionadas con el diseño del proyecto. Incluye la creación de modelos en AutoCAD e Inventor, generación de modelos 3D, documentación y pruebas de simulación, así como la redacción del estudio final.

Código	Descripción	Cantidad	Precio [€]	Importe [€]
01.01	Desarrollo del modelo AutoCAD 2024	50 horas	15.00	750.00
01.02	Inventor 2024	10 horas	15.00	150.00
01.03	Generación del Modelo 3D	8 horas	15.00	120.00
01.04	Documentación simulación	4 horas	15.00	60.00
01.05	Modificación de parámetros en la Simulación	5 horas	15.00	75.00
01.06	Pruebas de Simulación	10 horas	15.00	150.00
01.07	Redacción del Estudio	15 horas	15.00	225.00
<b>TOTAL CAPÍTULO C01</b>				<b>1530.00</b>

Tabla 3 Coste Diseño

## CAPÍTULO C02 EJECUCIÓN

Este capítulo detalla los costes asociados a la ejecución del proyecto. Incluye la adquisición de equipos y sensores necesarios para la implementación del sistema de mantenimiento predictivo.

Código	Descripción	Cantidad	Precio [€]	Importe [€]
02.01	Hp EliteDesk 800 G3 (i5 / 32 GB DDR 4)	1	1100.00	1100.00
02.02	Philip 27" LED FHD	1	150.00	150.00
02.03	Sensor de Presión (x2)	2	50.00	100.00
02.04	Caudalímetro	1	18.00	18.00
02.05	Sensor de temperatura (x3)	3	10.00	30.00
02.06	Sensor de vibración	1	10.00	10.00
02.07	Sensor de corriente	1	8.00	8.00
02.08	Sensor de humedad	1	7.00	7.00
02.09	Sensor de posición del pistón	1	30.00	30.00
02.10	Cables	1	8.00	8.00
02.11	Herramienta	1	45.00	45.00
<b>TOTAL CAPÍTULO C02</b>				<b>1506.00</b>

Tabla 4 Coste Ejecución

## CAPÍTULO C03 ENSAYO Y VALIDACIÓN

Este capítulo cubre los costes de las actividades necesarias para el ensayo y validación del proyecto, incluyendo el transporte e internet.

Código	Descripción	Cantidad	Precio [€]	Importe [€]
03.01	Validación de sensores	5 horas	20.00	100.00
03.02	Pruebas operativas del sistema	10 horas	70.00	200.00
03.03	Recopilación y Análisis de Datos	8 horas	20.00	160.00
<b>TOTAL CAPÍTULO C03</b>				<b>460.00</b>

Tabla 5 Coste Ensayo y Validación

#### CAPÍTULO C04 INSTALACIÓN Y MODIFICACIÓN

Este capítulo incluye los costes de la instalación de los sensores, el mecanizado de las piezas, el lubricante, recambios para modificar y simular averías, y las horas de ensayo.

Código	Descripción	Cantidad	Precio [€]	Importe [€]
04.01	Instalación de sensores	15 horas	20.00	300.00
04.02	Mecanizado de piezas	5 horas	25.00	125.00
04.03	Lubricante	1	50.00	50.00
04.04	Recambios para simular averías	1 (conjunto completo)	150.00	150.00
04.05	Horas de Ensayo	10 horas	15.00	150.00
<b>TOTAL CAPÍTULO C04</b>				<b>775.00</b>

Tabla 6 Coste Instalación y Modificación

## NOMENCLATURA

ADA	Secador de Aire Desecante
AHU	Unidad de Manejo de Aire
ASV	Válvula de Interruptor de Aire
CA	Compresor de Aire
CAE	Enfriador, Evaporativo de Aire
CFM	Pies cúbicos por minuto
DAMD	Dispositivo de Monitoreo de Aire de Conducto
EnPI	Indicador Clave de Rendimiento Energético
FA	Suministro de Ventilador
FAB	Caja de Aire del Filtro
FEA	Análisis de Elementos Finitos
FANE	Evaluador de ventiladores
FAR	Filtro del Aire Reemplazable
FC	Ventilador Circulante
FE	Escape del Ventilador
FRA	Ventilador, Aire de Retorno
FRL	Rollo de Aire del Filtro
GME	Gestión de Mantenimiento Específico
HEAP	Filtro de Aire De Alta Eficiencia
HP	Caballos de fuerza
HX	Intercambiador de Calor
KPI	Indicador Clave de Desempeño
LPM	Litros Por Minuto
PSI	Libras por pulgada cuadrada
UNE	Asociación Española de Normalización
SAT	Site Acceptance Test
SCD	Sistema de Control Distribuido

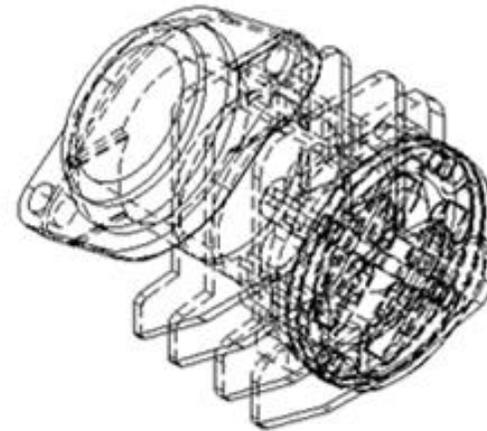
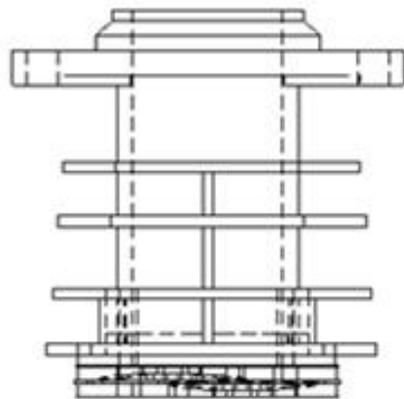
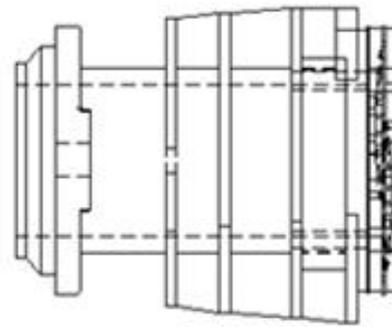
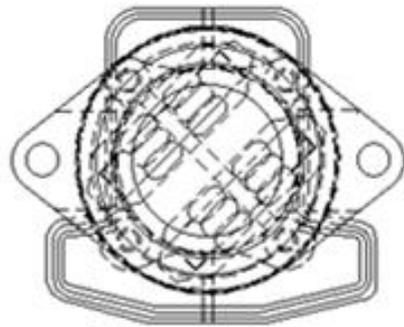
## PLANOS

En el diseño de este equipo se ha partido de un plano en formato pdf que se proporcionó con las características del equipo. Dentro del mundo de la ingeniería, la precisión es esencial para garantizar la calidad y la fiabilidad de los productos finales. Sin embargo, en esta ocasión, los planos realizados en AutoCAD 2024 pueden no reflejar con total exactitud un dibujo en formato pdf. Esto puede deberse a diversas razones, como limitaciones en la calidad o la resolución del pdf original, diferencias en la escala utilizada durante la digitalización, o errores humanos durante el proceso de conversión.

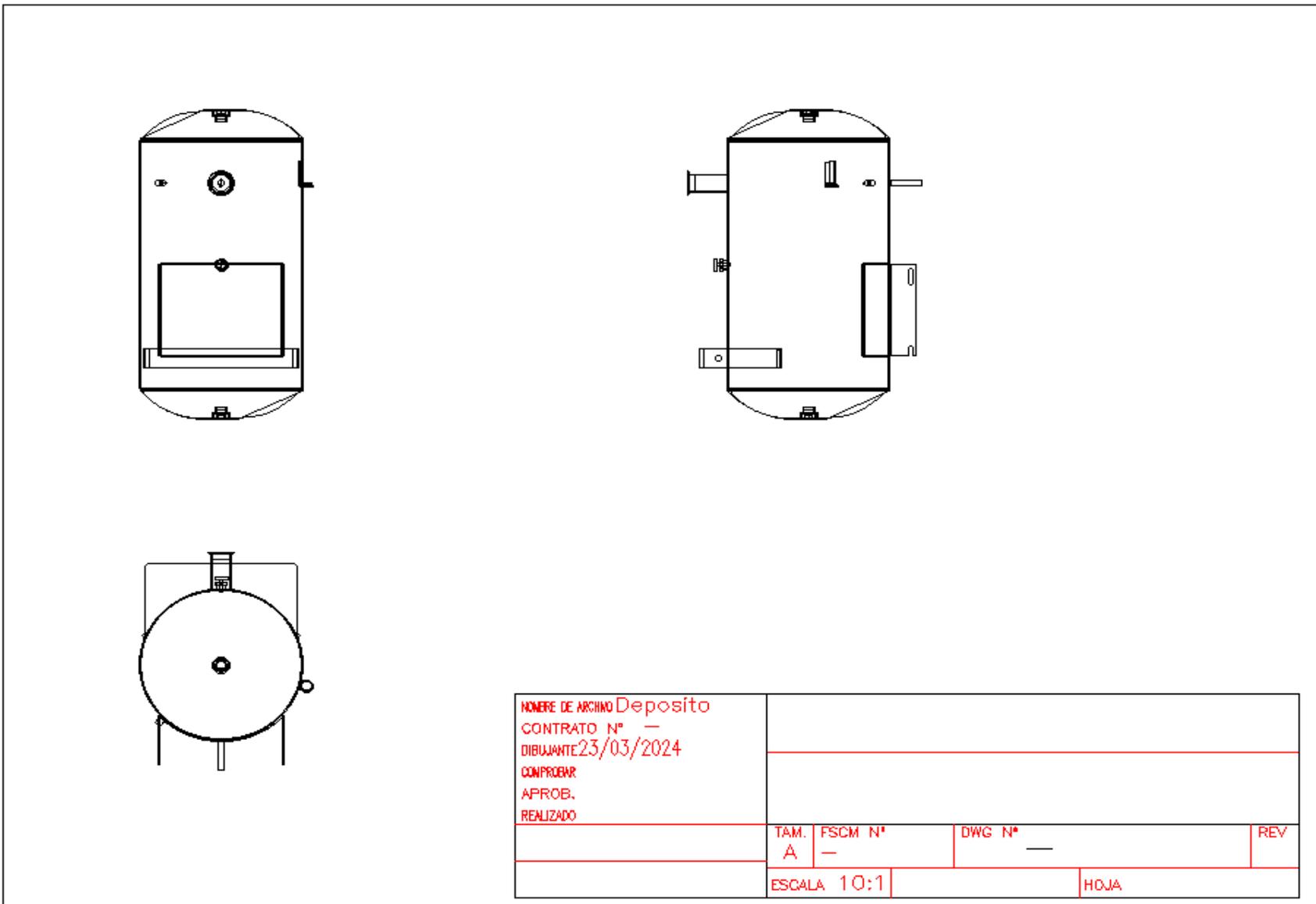
Con esta consideración, se hace fundamental reconocer que los planos generados en AutoCAD 2024 a partir de un dibujo en pdf pueden presentar ciertas discrepancias o imprecisiones. Estas discrepancias pueden manifestarse en formas de distorsiones en las dimensiones, desalineaciones en los elementos geométricos o pérdida de detalles importantes, por ese motivo los planos que se incorporan a este estudio vienen sin ningún tipo de cota. Ya que el propósito de este estudio era la simulación de ciertos componentes.

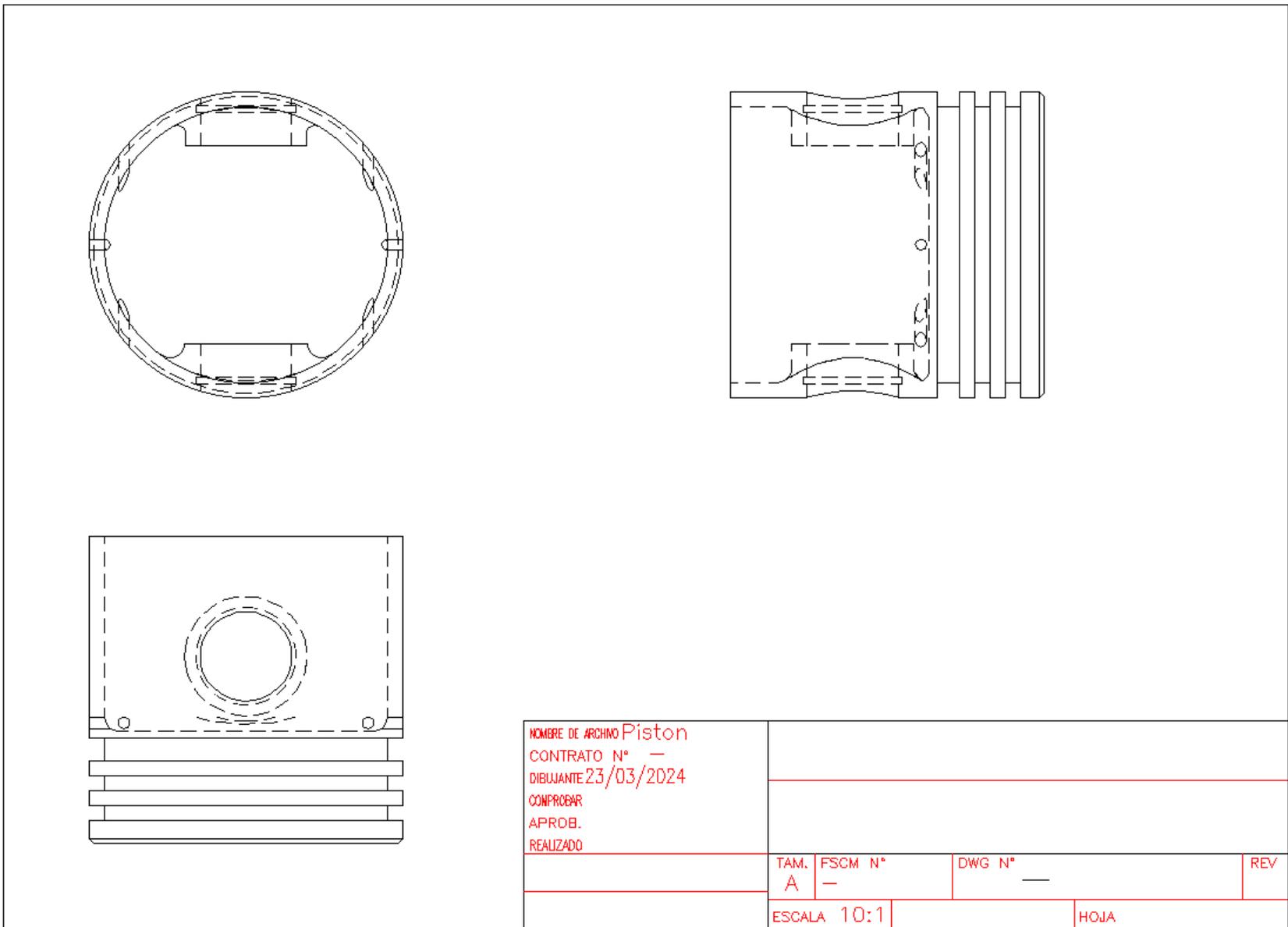
Por tanto, la falta de exactitud en los planos de AutoCAD generados a partir del dibujo en pdf en nuestro caso y como se ha mencionado anteriormente no va a tener consecuencias significativas porque no se va a realizar ningún proceso de diseño y fabricación. Por este motivo no se ha incorporado ninguna cota en ningún plano a excepción del plano obtenido del propio proveedor. Ya que las medidas incorrectas, pueden afectar la funcionalidad y la integridad estructural del producto final, mientras que la pérdida de detalles importantes puede dificultar la comprensión completa de los requisitos de diseño y en nuestro caso no se pretende modificar ninguno de sus componentes, solamente analizarlos para estudiar su criticidad operativa y encontrar un mantenimiento predictivo.

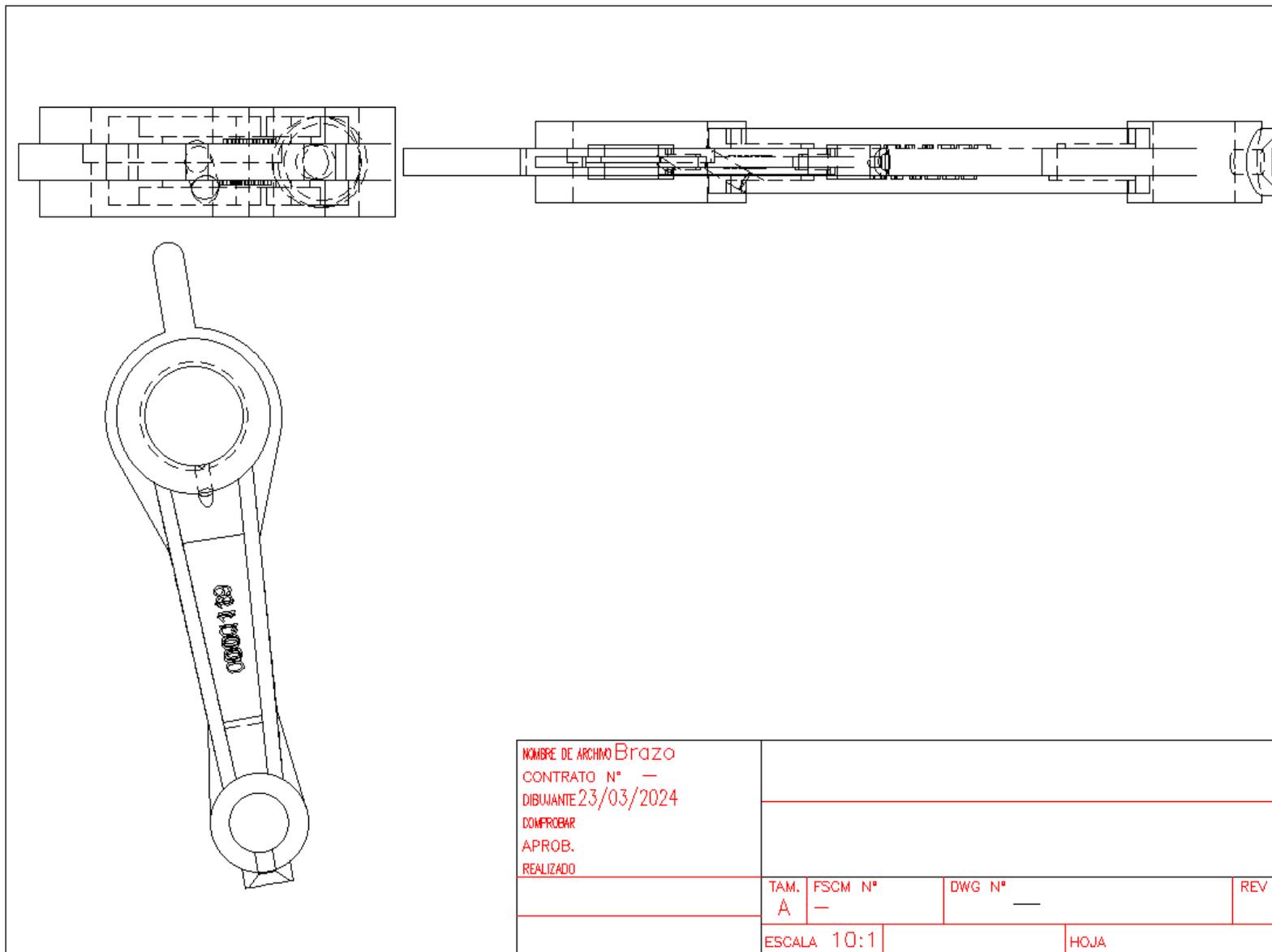
A pesar de estas posibles limitaciones, se ha generado en modelo en 3D en AutoCAD 2024 como se muestra en varias figuras del proyecto, siendo una herramienta poderosa y ampliamente utilizada en el diseño y la ingeniería. La escala que se muestra en los planos es de 10:1.

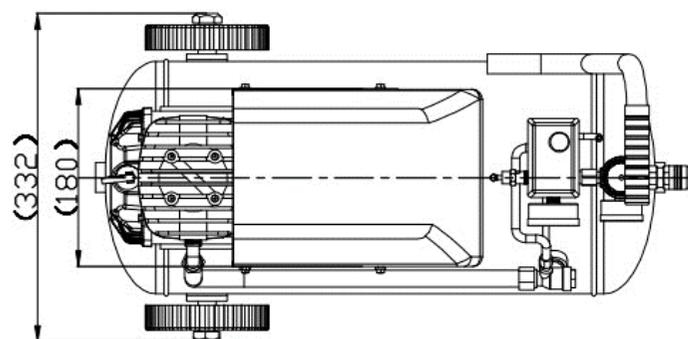
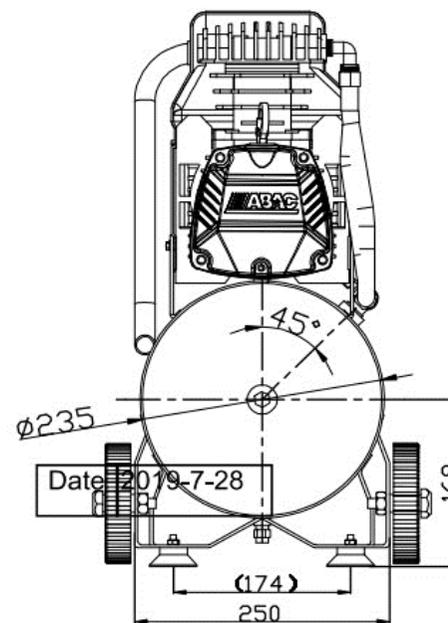
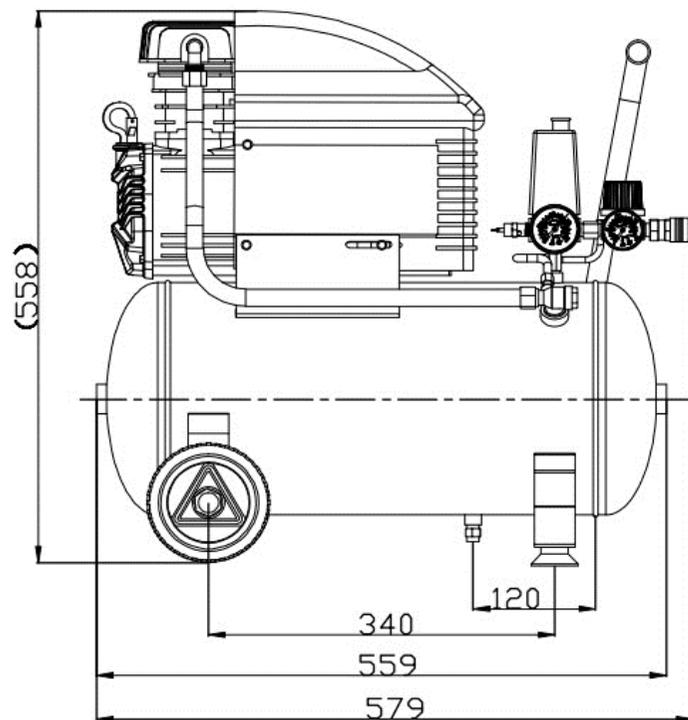


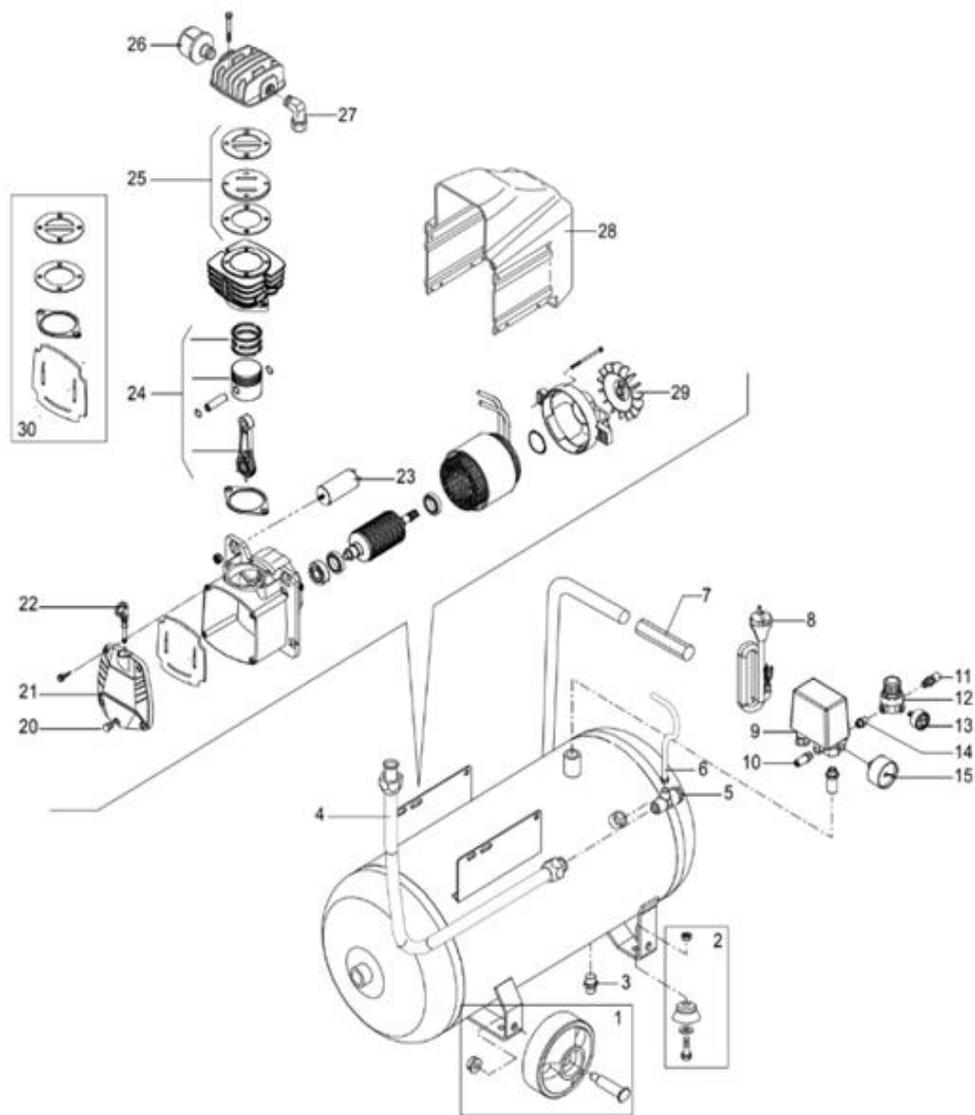
PROYECTO DE ARMA Cámara	TABLA / FOLIO N°	UNO N°	REV
FECHA 23/03/2024	B	—	—
REALIZADO	ESCALA 10:1		HOJA











1. Rueda
2. Pies de apoyo del compresor
3. Válvula de drenaje
4. Tubería
5. Válvula antirretorno
6. Tubería de descarga
7. Mango de goma
8. Cable de alimentación
9. Presostato
10. Válvula de seguridad
11. Acoplamiento
12. Regulador de presión
13. Manómetro
14. Boquilla
15. Manómetro
20. Tapón del aceite
21. Tapa del cárter
22. Varilla del aceite
23. Capacitor
24. Pistón-biela
25. Placas de válvula/juntas
26. Filtro de aire
27. Accesorio L
28. Cubierta
29. Ventilador
30. Juntas

## Ficha Técnica


[www.abacaircompressors.com](http://www.abacaircompressors.com)

## COMPRESOR DE PISTÓN

<b>MODELO</b>	<b>POLE POSITION L20</b>
<b>CÓDIGO</b>	<b>1129100021</b>

SERIE LINE

COAXIAL LUBRICADO



<b>Depósito (Its)</b>	<b>24 Litros</b>
<b>Aire Aspirado (Its/min)</b>	<b>220 Litros minuto</b>
<b>Potencia</b>	<b>2 hp / 1,5 kw</b>
<b>Alimentación</b>	<b>230/1/50</b>
<b>Nivel Sonoro (dB)</b>	<b>70 – 95 dB</b>
<b>Presión (bar)</b>	<b>10 bar</b>
<b>Dimensiones</b>	<b>610 x 310 x 580</b>
<b>Peso (Kg)</b>	<b>25 Kilos</b>



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] «<https://aeromaquinados.com/compresor-de-aire-como-funciona/>,» [En línea]. Available: <https://aeromaquinados.com/compresor-de-aire-como-funciona/>.
- [2] «<https://es.scribd.com/document/351837944/Compresores>,» [En línea].
- [3] «<https://safetyculture.com/es/temas/que-es-el-mantenimiento-predictivo/>,» [En línea].
- [4] «<https://www.guilcor.es/capteurs-de-pression-capacitifs/3779-capteur-de-pression-d-huile-pour-transmission-automobile.html>,» [En línea]. Available: <https://www.guilcor.es/capteurs-de-pression-capacitifs/3779-capteur-de-pression-d-huile-pour-transmission-automobile.html>.
- [5] «[https://www.tme.eu/es/details/b57500k0103a001/sensores-de-temp-termistores-ntc/epcos/?brutto=1&currency=EUR&gad\\_source=1&gclid=EAlaIQobChMIuePvh7H9gwMVtJhQBh3RCgn7EAQYESABEgJsSPD\\_BwE](https://www.tme.eu/es/details/b57500k0103a001/sensores-de-temp-termistores-ntc/epcos/?brutto=1&currency=EUR&gad_source=1&gclid=EAlaIQobChMIuePvh7H9gwMVtJhQBh3RCgn7EAQYESABEgJsSPD_BwE),» [En línea].
- [6] «<https://descargas.cetronic.es/C-7232.pdf>,» [En línea]. Available: <https://descargas.cetronic.es/C-7232.pdf>.
- [7] «<https://es.aliexpress.com/i/1005005899094952.html>,» [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/i/1005005899094952.html>.
- [8] «[https://www.disumtec.com/es/accesorios-hidraulicos/49060023-nivel-aceite-electrico-con-brida.html?gad\\_source=1&gclid=EAlaIQobChMI14T\\_-sr9gwMVZK9oCR06oAKXEAKYAiABEgJtxvD\\_BwE](https://www.disumtec.com/es/accesorios-hidraulicos/49060023-nivel-aceite-electrico-con-brida.html?gad_source=1&gclid=EAlaIQobChMI14T_-sr9gwMVZK9oCR06oAKXEAKYAiABEgJtxvD_BwE),» [En línea]. Available: [https://www.disumtec.com/es/accesorios-hidraulicos/49060023-nivel-aceite-electrico-con-brida.html?gad\\_source=1&gclid=EAlaIQobChMI14T\\_-sr9gwMVZK9oCR06oAKXEAKYAiABEgJtxvD\\_BwE](https://www.disumtec.com/es/accesorios-hidraulicos/49060023-nivel-aceite-electrico-con-brida.html?gad_source=1&gclid=EAlaIQobChMI14T_-sr9gwMVZK9oCR06oAKXEAKYAiABEgJtxvD_BwE).
- [9] «<https://www.te.com/usa-en/product-HPP805A031.datasheet.pdf>,» [En línea]. Available: <https://www.te.com/usa-en/product-HPP805A031.datasheet.pdf>.
- [10] «<https://pneumatig.eu/es/sensor-posicion-piston-aguac-001k.html>,» [En línea]. Available: <https://pneumatig.eu/es/sensor-posicion-piston-aguac-001k.html>.
- [11] «<https://www.plm.automation.siemens.com/global/fr/webinar/rotating-machines-structural-integrity/96565>,» [En línea]. Available: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/fr/webinar/rotating-machines-structural-integrity/96565>.
- [12] «<https://easychair.org/publications/open/4TZh>,» [En línea]. Available: <https://easychair.org/publications/open/4TZh>.
- [13] «<https://www.analyzer-cae.com/fea-of-pumps/>,» [En línea]. Available: <https://www.analyzer-cae.com/fea-of-pumps/>.

- [14] «<https://8020engineering.com/rocket-turbopump-compressor-design/>,» [En línea]. Available: <https://8020engineering.com/rocket-turbopump-compressor-design/>.
- [15] «<https://ansyskm.ansys.com/forums/topic/discovery-live-thermal-stress-multiphysics-simulation-of-an-engine/>,» [En línea]. Available: <https://ansyskm.ansys.com/forums/topic/discovery-live-thermal-stress-multiphysics-simulation-of-an-engine/>.
- [16] «<https://tecnologiaparalaindustria.com/monitoreo-de-sistemas-de-aire-comprimido-para-incrementar-el-rendimiento/>,» [En línea].
- [17] «<https://aeromaquinados.com/compresor-de-aire-como-funciona/>,» [En línea].
- [18] «<https://aeromaquinados.com/compresor-de-aire-como-funciona/>,» [En línea].
- [19] «<https://aeromaquinados.com/compresor-de-aire-como-funciona/>,» [En línea].
- [20] «<https://aeromaquinados.com/compresor-de-aire-como-funciona/>,» [En línea].
- [21] R. K. Mobley, «Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring,» de *Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring*.
- [22] K. Wicks, «Handbook of Condition Monitoring,» de *Techniques and Methodology*.
- [23] M. A. C. S. (MACS), «Compressed Air Operations Manual,» de *Compressed Air Operations Manual*.
- [24] A. K. Heng, «Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management,» de *Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*.
- [25] R. K. Mobley, «Maintenance Planning and Scheduling Handbook,» de *Maintenance Planning and Scheduling Handbook*.
- [26] P. J. y. P. J. Tavner, «Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines,» de *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*.
- [27] J. Mohan, «Predictive Maintenance Management,» de *Predictive Maintenance Management*.
- [28] J. Moubray, «Reliability Centered Maintenance,» de *Reliability Centered Maintenance*.
- [29] J. E. Brumbaugh, «Predictive Maintenance Techniques in HVACR Systems,» de *Predictive Maintenance Techniques in HVACR Systems*.
- [30] M. e. a. Ben-Daya, «Handbook of Maintenance Management and Engineering,» de *Handbook of Maintenance Management and Engineering*.