

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LAS PRÁCTICAS  
EXPERIMENTALES DE UN BANCO PARA EL ANÁLISIS DE COMPRESORES  
DE 2 ETAPAS PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS  
ALTERNATIVAS  
FASE 2**

**MAGDA ROCÍO PINZÓN ARIZA  
TANIA CAROLINA PINZÓN ACELAS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2017**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LAS PRÁCTICAS  
EXPERIMENTALES DE UN BANCO PARA EL ANÁLISIS DE COMPRESORES  
DE 2 ETAPAS PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS  
ALTERNATIVAS  
FASE 2**

**MAGDA ROCÍO PINZÓN ARIZA  
TANIA CAROLINA PINZÓN ACELAS**

**Trabajo de grado como requisito para optar al título de  
INGENIERO MECÁNICO**

**Director  
JORGE LUIS CHACÓN VELASCO  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darnos la oportunidad de culminar nuestro proyecto de grado y permitirnos obtener el título como ingenieras mecánicas.

A nuestro director de proyecto de grado el ingeniero Jorge Luis Chacón Velazco por su colaboración, paciencia y sobre todo por haber creído en nosotras.

A los profesores de la Escuela Ingeniería Mecánica por brindarnos su conocimiento para afrontar nuestra vida profesional.

A Julio Cesar Gómez paredes por su valiosa colaboración y asesoría en la etapa constructiva del proyecto.

A nuestra familia y amigos por apoyarnos incondicionalmente durante nuestra formación académica.

**TANIA CAROLINA PINZÓN ACELAS**  
**MAGDA ROCÍO PINZÓN ARIZA**

## **DEDICATORIA**

*A Dios por darme las fuerzas para no desfallecer a pesar de todos los obstáculos que se me presentaron a través de mi carrera.*

*A mi Hijo Nicolás Andrés por ser la razón de mi vida y mí despertar cada día.*

*A mi mamá y mi nona que desde el cielo siempre me han guiado para no desviar mi camino.*

*A mis hermanos Fabio Alberto, Magda Rocío y Dina Marcela porque somos el equipo perfecto.*

*A mis segundos padres Álvaro y Graciela por su infinita paciencia.*

*A mi papá, a mis tíos y toda mi familia por su apoyo y confianza.*

*Al Ingeniero Juan Carlos, la Arquitecta Yamile y el Doctor Giovany por abrirme camino y enseñanza en mi vida profesional.*

*A todos mis amigos por impulsarme y acompañarme en este camino.*

**TANIA CAROLINA PINZÓN ACELAS**

## DEDICATORIA

*A Dios por brindarme la oportunidad de emprender este camino y por ayudarme a culminarlo.*

*A mi hija Julieta por llenar de felicidad mi vida y tocar mi corazón cada uno de mis días.*

*A mi compañero y amigo German Yesid por su amor y comprensión.*

*A mis padres Alberto y Amparo por inculcarme la responsabilidad, el compromiso y la entereza para cada aspecto de mi vida.*

*A mis hermanos Dina y Fabio porque el cariño, apoyo y compañía dentro del campo fueron determinantes para seguir en mi carrera.*

*A mis sobrinos Nicolás y Jorge Camilo por brindarme los momentos más divertidos.*

*A mi compañera y hermana Tania porque en el proceso aprendimos la una de la otra el trabajo en equipo, el ánimo para continuar y nunca desistir.*

*A mi familia quienes me apoyaron en cada momento de mi proceso de aprendizaje.*

*A mis amigos por creer en mí y en mi proceso académico.*

**MAGDA ROCÍO PINZÓN ARIZA**

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN.....  | 23 |
| 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....   | 25 |
| 1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....  | 25 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN.....   | 26 |
| 1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO.....   | 27 |
| 1.3.1. Objetivo General.....   | 27 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos.....  | 27 |
| 2. GENERALIDADES.....  | 28 |
| 2.1. COMPRESORES RECIPROCANTES.....  | 28 |
| 2.1.1. Componentes principales del compresor alternativo.....                              | 29 |
| 2.1.2. Clasificación de los compresores alternativos.....                                  | 30 |
| 2.1.3. Ciclo de compresión ideal.....  | 33 |
| 2.1.4. Compresión en múltiples etapas.....   | 36 |
| 2.1.5. Cinemática del compresor.....   | 38 |
| 2.1.6. Operación del compresor alternativo.....  | 40 |
| 2.1.7. Diagnóstico en los compresores alternativos.....                                    | 40 |
| 2.2. NORMAS DE SEGURIDAD PARA BANCOS DE PRUEBA.....  | 42 |
| 2.2.1. Señalización para instalaciones.....  | 42 |
| 3. DIAGNÓSTICO DE FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS DE<br>COMPRESORES DE DOS ETAPAS..... | 44 |
| 3.1. IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS.....  | 45 |
| 3.1.1. Observación del equipo de trabajo.....  | 45 |
| 3.1.2. Apreciación de estudiantes.....   | 47 |
| 3.1.3. Conclusión de los calificadores de la Fase I.....                                   | 47 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 3.1.4. | Estados de los componentes del banco .....  | 47 |
| 3.2.   | ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS .....   | 49 |
| 3.2.1. | Descripción de los problemas presentes en el banco. ....  | 49 |
| 3.2.2. | Árbol de problemas. ....  | 50 |
| 3.2.3. | Matriz DOFA para estructurar las soluciones. ....   | 51 |
| 3.3.   | SOLUCIONES CONCLUIDAS DE ACUERDO AL ANÁLISIS DE LA MATRIZ DOFA .....  | 52 |
| 3.3.1. | Implementación de un software para la simulación de un sistema de compresión de 2 etapas utilizando la herramienta de Matlab..... | 53 |
| 3.3.2. | Selección de una red neumática con compresores alternativos para una instalación de aire industrial.....                          | 53 |
| 3.3.3. | Vibraciones.. ....  | 54 |
| 3.3.4. | Implementación de un sistema de protección y seguridad del banco.....   | 54 |
| 3.3.5. | Mantenimiento del banco de pruebas. ....  | 54 |
| 4.     | SIMULACIÓN DEL DIAGRAMA PV DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN DE DOS ETAPAS EN MATLAB.....   | 55 |
| 4.1.   | DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA TOMA DE DATOS ....  | 55 |
| 4.2.   | ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE COMPRESIÓN IDEAL... ..  | 56 |
| 4.3.   | AHORRO DE POTENCIA .....  | 58 |
| 4.4.   | MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN DE DOS ETAPAS BASADAS EN UN MODELO CINEMÁTICO .....                                      | 61 |
| 4.4.1. | Presión en el cilindro. ....  | 61 |
| 4.5.   | DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO EN DIAGRAMA DE FLUJO .....  | 64 |
| 4.6.   | INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR DEL DIAGRAMA P-V .....   | 68 |
| 5.     | DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA DE SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN EN 2 ETAPAS QUE PERMITA LA SELECCIÓN DE           |    |

|  |     |
|--|-----|
| COMPRESORES ALTERNATIVOS PARA UNA INSTALACIÓN DE AIRE INDUSTRIAL .....   | 71  |
| 5.1. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS Y POTENCIA DE LA RED NEUMÁTICA .....  | 72  |
| 5.2. SELECCIÓN DE LOS DIÁMETROS DE LOS CILINDROS .....   | 80  |
| 5.3. PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DEL SIMULADOR DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN DE DOS ETAPAS. ....                                   | 82  |
| 5.4. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DEL SIMULADOR DE SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN EN 2 ETAPAS POR MEDIO DE DIAGRAMA DE FLUJO ..... | 83  |
| 5.5. INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR DE LA SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN EN DOS ETAPAS .....                                    | 86  |
| <br>   |     |
| 6. MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN EN DOS ETAPAS .....                                     | 88  |
| 6.1. DESARTICULACIÓN DEL BANCO.....  | 88  |
| 6.1.1. Reparación y mantenimiento de las partes del banco de compresión.....   | 89  |
| 6.1.2. Cambios, correcciones y mejoras generales del banco de pruebas. ....  | 96  |
| 6.2. IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE SEGURIDAD PARA EL BANCO DE PRUEBAS .....   | 100 |
| 6.2.1. Instalación de una malla de seguridad. ....   | 100 |
| 6.2.2. Dispositivos para la protección personal del operario. ....   | 102 |
| 6.2.3. Etiquetado del banco. ....  | 103 |
| 6.2.4. Herramienta útil para el uso, manejo y mantenimiento del banco. ....  | 106 |
| 6.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES DEL BANCO .....   | 106 |
| 6.3.1. Componentes principales para el análisis .....  | 107 |
| 6.3.2. Relación de adquisición de datos para determinar el grado de severidad de las vibraciones .....                                 | 109 |
| 6.3.3. Adecuaciones para eliminar condición de vibración excesiva del banco. ....  | 114 |
| 6.3.4. Análisis final de vibraciones mecánicas del motor eléctrico.....  | 115 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 7. CONCLUSIONES.....    | 117 |
| 8. RECOMENDACIONES..... | 119 |
| BIBLIOGRAFÍA.....       | 121 |
| ANEXOS .....            | 124 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Banco de pruebas de compresores de dos etapas. ....                                      | 25 |
| Figura 2. Evidencia de problemas de seguridad. ....  | 26 |
| Figura 3. Esquema de funcionamiento de compresor alternativo.....                                  | 29 |
| Figura 4. Componentes del compresor alternativo.....   | 30 |
| Figura 5. Formas de trabajar del pistón. ....  | 32 |
| Figura 6. Descripción general del diagrama PV .....  | 34 |
| Figura 7. Compresión politrópica del fluido en el diagrama PV .....                                | 34 |
| Figura 8. Expulsión de aire en el diagrama PV .....  | 35 |
| Figura 9. Proceso de expansión politrópica en el diagrama PV .....                                 | 35 |
| Figura 10. Admisión del fluido en el diagrama PV .....   | 36 |
| Figura 11. Diagrama P-V de la compresión en dos etapas .....                                       | 37 |
| Figura 12. Esquema del sistema biela- manivela.....  | 38 |
| Figura 13. Banco de pruebas de compresores de dos etapas. ....                                     | 45 |
| Figura 14. Medidores instalados sobre los compresores .....  | 46 |
| Figura 15. Panel de manejo del banco y estructura .....  | 48 |
| Figura 16. Árbol de problemas.....   | 51 |
| Figura 17. Representación gráfica del banco de pruebas .....                                       | 55 |
| Figura 18. Ejemplo de la compresión de dos etapas ideal. ....                                      | 58 |
| Figura 19. Diagrama de flujo para el simulador del diagrama PV.....                                | 66 |
| Figura 20. Diagrama de flujo para el simulador del diagrama PV (continuación) ..                   | 67 |
| Figura 21. Panel de control del banco de pruebas de compresión en dos etapas.                      | 69 |
| Figura 22. Curva de la potencia requerida en relación a $R_c$ y $K$ . ( $R_c = [1-3,5]$ ) .....    | 76 |
| Figura 23. Curva de la potencia requerida en relación a $R_c$ y $K$ . ( $R_c = [3,5-6]$ ) .....    | 77 |
| Figura 24. Diagrama de flujo del simulador de la red neumática.....                                | 84 |
| Figura 25. Diagrama de flujo del simulador de la red neumática.....                                | 85 |
| Figura 26. Figura del simulador que selecciona la red neumática, los compresores y cilindros ..... | 87 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 27. Desmantelamiento del banco.....  | 88  |
| Figura 28. Mantenimiento al motor trifásico .....   | 90  |
| Figura 29. Estructura del banco .....   | 91  |
| Figura 30. Placa de montaje .....   | 92  |
| Figura 31. Manómetros sobre el panel lleno de glicerina .....                             | 93  |
| Figura 32. Radiador, parte trasera del banco .....  | 93  |
| Figura 33. Operación de lubricación y mantenimiento, Grupo KTC.....                       | 94  |
| Figura 34. Drenaje de los compresores y reemplazo de aceite.....                          | 95  |
| Figura 35. Compresores después del mantenimiento .....                                    | 95  |
| Figura 36. Tornillos reemplazados .....   | 96  |
| Figura 37. Tuercas y tornillos de reemplazo .....   | 97  |
| Figura 38. Ruedas dañadas y de seguridad de la estructura .....                           | 97  |
| Figura 39. Caja protectora del cableado del motor trifásico .....                         | 98  |
| Figura 40. Medidores instalados finalmente.....   | 99  |
| Figura 41. Instalación de la reja protectora del banco .....                              | 101 |
| Figura 42. Enrejado del banco final .....   | 102 |
| Figura 43. Dispositivos de seguridad .....  | 103 |
| Figura 44. Panel de cableado con placa de seguridad.....                                  | 103 |
| Figura 45. Etiquetas de los compresores y motor eléctrico. ....                           | 104 |
| Figura 46. Etiquetas de los puntos de toma de datos. ....                                 | 104 |
| Figura 47. Etiquetas de los botones de encendido/apagado.....                             | 105 |
| Figura 48. Etiquetas para marcar e identificar el banco. ....                             | 105 |
| Figura 49. Poleas acopladas al eje y a los compresores .....                              | 108 |
| Figura 50. Ubicación sensor aceleración sobre motor eléctrico .....                       | 110 |
| Figura 51. Análisis velocidad sensor ubicado en la posición radial A.....                 | 111 |
| Figura 52. Análisis velocidad sensor ubicado en la posición axial A .....                 | 111 |
| Figura 53. Severidad de la vibración según la norma ISO 10816-3 .....                     | 113 |
| Figura 54. Alineador de ejes SKF TKSA 20 .....  | 114 |
| Figura 55. Soportes de amortiguación utilizados en el motor eléctrico y compresores ..... | 115 |

Figura 56. Análisis velocidad sensor ubicado en la posición radial A ..... 115  
Figura 57. Análisis velocidad sensor ubicado en la posición axial A ..... 116

## LISTA DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1. Especificaciones del compresor de primera etapa        | 63  |
| Tabla 2. Especificaciones del compresor de segunda etapa        | 63  |
| Tabla 3. Valores estimados de eficiencia a condiciones estándar | 74  |
| Tabla 4. Toma de temperatura en los puntos 2, 3 y 4.            | 99  |
| Tabla 5. Datos técnicos nominales del motor trifásico           | 107 |
| Tabla 6. Relaciones de velocidad obtenidas con las poleas       | 109 |

## LISTA DE CUADROS

|  |    |
|--|----|
| Cuadro 1. Cuadro técnico de síntomas de funcionamiento anormal, causas y corrección. | 41 |
| Cuadro 2. Señalización de locales para prevención de accidentes                      | 43 |
| Cuadro 3. Descripción de los problemas   | 50 |
| Cuadro 4. Cuadro de la matriz DOFA   | 52 |
| Cuadro 5. Seudocódigo para la ecuación diferencial de la ecuación 26.                | 64 |
| Cuadro 6. Relación para mantenimiento de los motores trifásicos                      | 89 |

## LISTA DE ANEXOS

Nota: Los anexos se entregan en la carpeta con nombre ANEXOS que contiene el CD-ROM en la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander y contiene los siguientes documentos:

Anexo A. Prácticas para el Laboratorio de Térmicas Alternativas (LMTA).

Anexo B. Manual de mantenimiento para el banco de pruebas.

Anexo C. Material requerido para la elaboración de las prácticas.

Anexo D. Gas Processors Suppliers Association. Section 13. Compressors and Expanders.

Anexo E. Tablas de Charlotte para diagnóstico de vibraciones.

## LISTA DE SÍMBOLOS

Los siguientes símbolos fueron empleados en el desarrollo de las ecuaciones del proyecto:

|                   |  |
|-------------------|--|
| P                 | Presión  |
| V                 | Volumen  |
| n                 | Constante poli trópica   |
| l                 | Longitud de la biela   |
| r                 | Radio de la manivela   |
| X                 | Posición del pistón referida al punto muerto superior          |
| $\Theta$          | Ángulo de giro por el cigüeñal                                 |
| $\beta$           | Ángulo que forma la biela con el eje del cilindro.             |
| R                 | Constante de los gases   |
| CL1               | Volumen muerto para el primer compresor                        |
| CL2               | Volumen muerto para el segundo compresor                       |
| $Q_{real-etapa}$  | Caudal real por etapa  |
| $\eta_{descarga}$ | Eficiencia de descarga   |
| $HP_{real}$       | Potencia real de consumo                                       |
| $\vartheta$       | Velocidad del flujo de aire                                    |
| $A_{ane}$         | Área transversal del anemómetro                                |
| $P_{cil}$         | Presión en el cilindro   |
| $\gamma$          | Relación de calores específicos                                |
| $v_{o_{cil}}$     | Volumen de holgura o el espacio libre del cilindro             |
| $S_{cil}$         | Área de la sección transversal del cilindro                    |
| d                 | Diámetro del pistón  |
| $x_{pis}$         | Desplazamiento del pistón                                      |
| $x_0$             | Distancia de separación entre el pistón y la cabeza del pistón |

|                |   |
|----------------|---|
| $\omega$       | Velocidad angular de rotación del compresor.              |
| N              | Número de etapas.   |
| Ri             | Relación de presión en la etapa.                          |
| Rc             | Relación de compresión total.                             |
| $T_{succion}$  | Temperatura de succión o admisión                         |
| $P_{descarga}$ | Presión de descarga o final de operación                  |
| $BHP_{req}$    | Potencia de freno requerida en caballos de potencia       |
| MMPCD          | Capacidad volumétrica en millones de pies cúbicos por día |
| $\eta_v$       | Eficiencia del cilindro                                   |
| Ac             | Área efectiva (área del pistón – área de la barra)        |
| Ap             | Área del pistón   |

## RESUMEN

**TITULO: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LAS PRÁCTICAS EXPERIMENTALES DE UN BANCO PARA EL ANÁLISIS DE COMPRESORES DE 2 ETAPAS PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS ALTERNATIVAS, FASE 2\***

**AUTORES:** TANIA CAROLINA PINZÓN ACELAS\*\*  
MAGDA ROCÍO PINZÓN ARIZA

**PALABRAS CLAVE:** Compresores Reciprocantes, Matlab, Protocolos de seguridad, Vibraciones, Red Neumática.

### DESCRIPCIÓN:

La compresión de aire para redes neumáticas es el propósito en múltiples áreas de la industria, los compresores alternativos son la mejor solución, por su bajo costo en relación a sus beneficios. En este documento se especifica como comprimir aire en diferentes etapas haciendo uso de un banco que simula su proceso con dos compresores alternativos y una fase de interenfriamiento.

Como primera medida se le realiza mantenimiento y mejoras al banco con el fin de explorar las fortalezas de la instalación para uso de los estudiantes del Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA). También, se diseñaron herramientas informáticas con el fin de explicar el proceso de compresión para que el estudiante aprenda como se selecciona una red neumática por intermedio de la interfaz de programación, Matlab. El estudio de las vibraciones mecánicas puestas a prueba en el banco, resultó provechoso ya que se detectó cual era la falencia y cuál era el factor que provoca las vibraciones, esto permitió realizar las respectivas correcciones. Por último, se diseñó una estrategia para implementar un esquema de seguridad para el operario del banco de pruebas.

El banco se realizó con la intención de que el estudiante de Ingeniería Mecánica, a través de las prácticas y la interacción con él, entienda como se gestiona una red de aire comprimido en la industria y como se pueden aprovechar las plataformas informáticas para implementar estrategias de selección de redes reales.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico- mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniero Jorge Luis Chacón Velasco

## ABSTRACT

**TITLE: DESIGN, CONSTRUCTION AND IMPLEMENTATION OF THE EXPERIMENTAL PRACTICES OF A BENCH FOR THE ANALYSIS OF 2-STAGE COMPRESSORS FOR THE ALTERNATIVE THERMAL MACHINES LABORATORY, PHASE 2 \***

**AUTHORS: TANIA CAROLINA PINZÓN ACELAS \*\*  
MAGDA ROCÍO PINZÓN ARIZA**

**KEYWORDS:** Alternative Compressors, Matlab, Security Protocols, Vibrations, Pneumatic net.

### **DESCRIPTION:**

Air compression for pneumatic networks is the purpose in multiple Industry area's, the alternative compressors are the best choice, because their low price in relation with their benefits. In this document the way to compress air in different stages is specified by using a bench to simulate the process with two alternative compressors and an intercooling phase.

The first step is to perform a maintenance and improve the bench expecting to use in a better way the installation in the Alternative Thermal Machines Laboratory (LMTA). Informatic tools were also designed to explain the compression process in order to make that the student learn how to select a pneumatic network by using the programming interface, MATLAB. The study of the mechanical vibrations tested on the bench was useful, detecting with this that failures and the reason for the vibrations, completing with this the respective corrections. Finally, a strategy was designed in order to implement a security scheme for the test bench operary.

The bench was made to allow the mechanical engineer, using the practices and the interaction with it, to understand how the air compression tasks in the industry are developed and how to use the informatic platforms to implement selection strategies of real networks.

---

\* undergraduate work

\*\* Faculty of Physical – Mechanical. Engineering School of Mechanical Engineering Jorge Luis Chacón Velasco

## INTRODUCCIÓN

Los compresores reciprocantes son de las máquinas más usadas en la industria debido a sus múltiples ventajas; alcanzan grandes presiones con un caudal menor, son menos sensitivos a los gases y a los cambios de las propiedades, tienen una alta eficiencia y bajo consumo de potencia, son máquinas que tienen múltiples usos en los que se pueden emplear, como la transferencia de gas desde pozos productores hacia las plantas, comprimir gas en las petroleras y otros, para esto se hace necesario diseñar redes de compresión del fluido en múltiples etapas.

Para obtener los resultados que requiera el sistema, en los escenarios donde se necesita comprimir a gran escala se puede necesitar entre 4 y 5 etapas según corresponda el caso. Para el estudio de este tipo de situaciones el laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA) brinda al estudiante la oportunidad de aprender el funcionamiento de dichos sistemas de compresión mediante un banco de pruebas donde se elaboran prácticas para que el estudiante comprenda cuales son las ventajas de utilizar un sistema de compresión multi – etapa.

El banco de pruebas permite al estudiante que se diseñen estrategias académicas para el estudio del método de compresión de gases y renovar el protocolo de las prácticas a través de herramientas informáticas, también se debe realizar constante mantenimiento a estos aparatos situados en las instalaciones del laboratorio.

En el primer capítulo del desarrollo del tema se implementan estrategias para realizar un diagnóstico que enseñe el estado real del banco y donde se puedan aprovechar las debilidades del mismo para luego plantear las soluciones a los problemas y que ayuda a discernir para realizar el mantenimiento del mismo.

En el segundo y tercer capítulo se desarrollan programas donde el estudiante por medio de una plataforma informática MATLAB, interactúe con el análisis térmico y con el diseño de redes neumáticas de aire industrial y que permita aprender a seleccionar los equipos. En el primer programa se estudian las ventajas y el ahorro de potencia cuando se realiza la compresión en múltiples etapas comparando con el comportamiento termodinámico para una compresión politrópica; en el segundo programa se le plantea al estudiante la posibilidad de diseñar una red neumática para aire industrial en donde se selecciona los cilindros de los compresores para 2 etapas.

En el cuarto capítulo se desarrolla el mantenimiento del banco, se realiza su desmantelamiento para revisar y corregir las falencias que puedan tener los elementos y mejorar instalando protocolos de seguridad.

## 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Los compresores son considerablemente manejados en la actualidad en varios campos de la ingeniería y por esto hacen posible el actual modo de vida. Este tipo de elementos se pueden encontrar en muchos sistemas de refrigeración, como los refrigeradores caseros, en los pozos petroleros para extracción de sus derivados, a su vez se encuentran también en sistemas de generación de energía eléctrica, en el interior de muchos motores de avión como lo son los turborreactores, en sistemas neumáticos, etc.

En la Universidad Industrial de Santander en la Escuela de Ingeniería Mecánica se han realizado estudios y se han desarrollado diseños y construcciones de banco de pruebas en el Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA) que buscan ayudar al estudiante a fortalecer sus conocimientos teóricos con la práctica de la misma.

Figura 1. Banco de pruebas de compresores de dos etapas..



Fuente: Laboratorio de Maquinas Alternativas (LMTA). Salón 156 Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

En la realización de estas prácticas se ha podido evidenciar algunas fallas en las mediciones y detectado errores del diseño básico del banco, por lo tanto, el estudiante hace un análisis erróneo y basa sus conclusiones en datos incorrectos por lo cual se hace necesario una mejora y actualización del mismo.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN

Aunque en la actualidad existe un banco de pruebas en el laboratorio de Máquinas Terminas Alternativas, este presenta fallas en la toma de datos de los medidores, problemas de vibraciones mecánicas, falta de normas de seguridad, etc. Por lo tanto, la realización de este proyecto tiene como propósito encontrar un sistema de amortiguación para reducir las vibraciones, implementar reglas de seguridad, reparar y/o mejorar los sistemas de medición, realizar un soporte informático para el estudio de los sistemas de compresión de dos etapas, esto permitirá que los estudiantes tengan un concepto apropiado del estudio de los sistemas de máquinas alternativas en el tema de compresores.

Figura 2. Evidencia de problemas de seguridad.



Fuente: Laboratorio de Maquinas Alternativas (LMTA). Salón 156 Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

### **1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO**

**1.3.1. Objetivo General.** Actualizar y mejorar un banco de compresores que fortalezca la práctica de los estudiantes en el laboratorio de máquinas térmicas alternativas cumpliendo con la misión de la universidad en la formación de personas de alta calidad ética y profesional.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Realizar un diagnóstico del funcionamiento del banco de pruebas y determinar las falencias y debilidades del mismo.
- Seleccionar un modelo apropiado para la simulación en Matlab de un sistema de compresión de 2 etapas.
- Diseñar una herramienta informática y la simulación de un sistema de compresión en 2 etapas que permita la selección de compresores alternativos para una instalación de aire industrial.
- Renovar y mejorar los protocolos de prueba del banco, renovar e implementar los siguientes sistemas:
  - Reparar el sistema de medición de Presión y Temperatura.
  - Implementación de un sistema de protección en normas de seguridad.
  - Evaluar el estado del banco a través de medición de las vibraciones, adecuar los componentes para resolver los problemas detectados según el análisis.

## 2. GENERALIDADES

### 2.1. COMPRESORES RECIPROCANTES

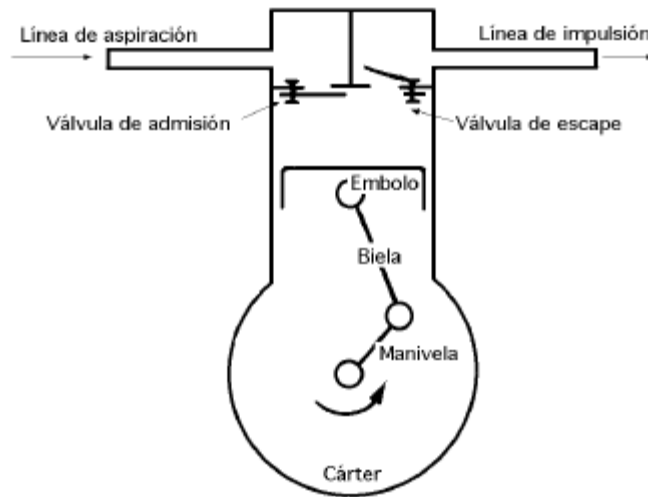
Los compresores son máquinas que tienen por finalidad suministrar una energía a los fluidos compresibles (gases y vapores) sobre los que operan, para hacerlos fluir aumentando al mismo tiempo su presión. En esta última característica precisamente, se distinguen de las soplantes y ventiladores que manejan grandes cantidades de fluidos compresibles (aire, por ejemplo) sin modificar sensiblemente su presión, con funciones similares a las bombas de fluidos incompresibles.<sup>1</sup>

Un compresor reciprocante es un dispositivo de desplazamiento positivo, el cual durante su operación normal admitirá una cantidad de gas o vapor de su línea de succión a una presión  $P_1$  dada, y lo comprimirá por medio de un pistón que se mueve alternativamente en el interior del cilindro, según las necesidades del sistema para moverlo a través de su línea de descarga a una presión  $P_2$  superior, véase Figura 3. Por medio de un motor eléctrico o en su efecto una turbina de vapor le es suministrada la energía necesaria para efectuar este trabajo.

---

<sup>1</sup> : FERNÁNDEZ, Pedro. Compresores. Universidad de Cantabria. España. p. I-1

Figura 3. Esquema de funcionamiento de compresor alternativo.

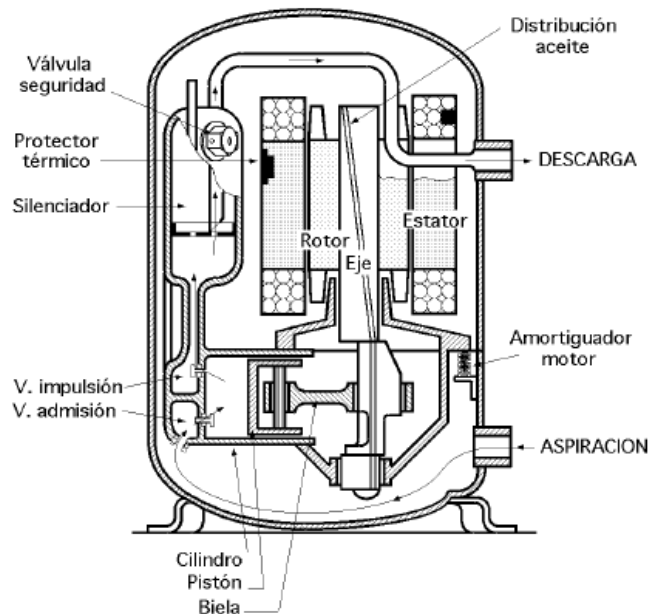


Fuente: FERNÁNDEZ, Pedro. Compresores. Universidad de Cantabria.  
España. p. 1-2

**2.1.1. Componentes principales del compresor alternativo:** Dentro de las partes básicas del compresor alternativo se tienen:

- Mecanismo motor (cigüeñal y biela)
- Cruceta o mecanismo de deslizamiento
- Pistón y anillos de pistón
- Cilindro o cabezal
- Sistema de enfriamiento
- Válvulas (admisión, escape, seguridad)

Figura 4. Componentes del compresor alternativo



Fuente: FERNÁNDEZ, Pedro. Compresores. Universidad de Cantabria. España. p. 1-2

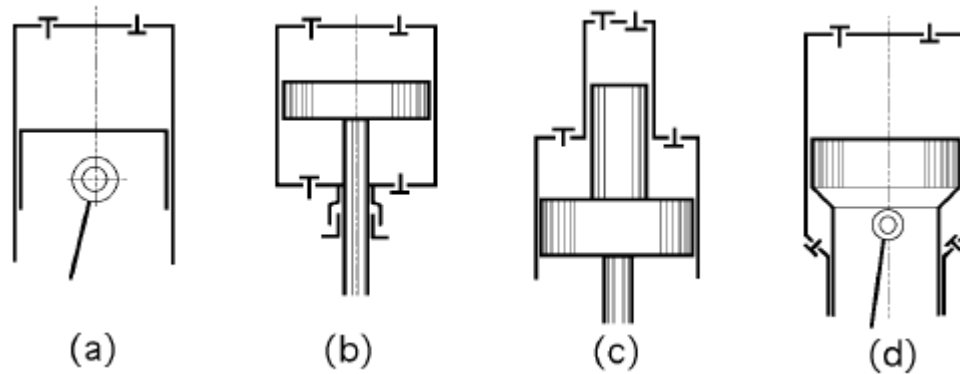
### 2.1.2. Clasificación de los compresores alternativos

- **POR EL NÚMERO DE ETAPA:** Los compresores se pueden clasificar, atendiendo al estilo de actuar la compresión, de una o dos etapas.
- **Compresores de una etapa:** Se componen básicamente de un cárter con cigüeñal, pistón y cilindro. Para su refrigeración llevan, en la parte exterior, aletas que evacúan el calor por radiación y convección; se utilizan en aplicaciones en donde el caudal está limitado y en condiciones de servicio intermitente, ya que son compresores de pequeñas potencias. En estos compresores, la temperatura de salida del aire comprimido se sitúa alrededor de los 180°C con una posible variación de  $\pm 20^{\circ}\text{C}$ .

- **Compresores de dos etapas:** El aire se comprime en dos etapas; en la primera (de baja presión BP) se comprime hasta una presión intermedia  $p_i = 30$  a  $45$  PSI, y en la segunda (de alta presión AP), se comprime hasta una presión de  $120$  PSI. Estos compresores son los más empleados en la industria cubriendo sus caudales una extensa gama de necesidades. Pueden estar refrigerados por aire o por agua. El aire comprimido sale a unos  $130^\circ\text{C}$  con una variación de  $\pm 15^\circ\text{C}$ .
- **POR EL MODO DE TRABAJAR EL PISTÓN:**
  - **De simple efecto:** Cuando un pistón es de simple efecto, Figura 5(a), trabaja sobre una sola cara del mismo, que está dirigida hacia la cabeza del cilindro. La cantidad de aire desplazado es igual a la carrera por la sección del pistón.
  - **De doble efecto:** El pistón de doble efecto trabaja sobre sus dos caras y delimita dos cámaras de compresión en el cilindro, Figura 5(b). El volumen engendrado es igual a dos veces el producto de la sección del pistón por la carrera. Hay que tener en cuenta el vástago, que ocupa un espacio obviamente no disponible para el aire y, en consecuencia, los volúmenes creados por las dos caras del pistón no son iguales.
  - **De etapas múltiples:** Un pistón es de etapas múltiples, si tiene elementos superpuestos de diámetros diferentes, que se desplazan en cilindros concéntricos. El pistón de mayor diámetro puede trabajar en simple o doble efecto, no así los otros pistones, que lo harán en simple efecto. Esta disposición es muy utilizada por los compresores de alta presión, Figura 5(c).
  - **De pistón diferencial:** El pistón diferencial es aquel que trabaja a doble efecto, pero con diámetros diferentes, para conseguir la compresión en dos

etapas, Figura 5(d). Su utilidad viene limitada y dada la posición de los pistones está cayendo en desuso.

Figura 5. Formas de trabajar del pistón.



Fuente: FERNÁNDEZ, Pedro. Compresores. Universidad de Cantabria. España. p. I-16

- **POR EL NÚMERO Y DISPOSICIÓN DE LOS CILINDROS:** En los compresores de cilindros, o a pistón, los fabricantes acostumbran a utilizar diversas formas de montaje para éstos, siendo las más frecuentes la disposición vertical, la horizontal, en L o en ángulo a 90°, y de dos cilindros opuestos, debiendo también incluir la colocación en V muy adoptada para los compresores pequeños.
- **Los compresores verticales:** sólo se utilizan para potencias pequeñas, ya que los efectos de machaqueo, relativamente importantes producidos por esta disposición, conducen al empleo de fundaciones pesadas y voluminosas, en contraposición de las disposiciones horizontales o en ángulo, que presentan otras cualidades de equilibrio tales que, el volumen de las fundaciones, se reduce.

- **Compresores pequeños:** la forma en V es la más empleada.
- **Compresores grandes de doble efecto:** se recurre al formato en L o en ángulo, con el cilindro de baja presión vertical y el de alta presión horizontal. Estos compresores deben trabajar a una presión comprendida entre 6 y 7 bar, inferior a la presión máxima establecida del orden de (120, 150) PSI, que indica la presión límite a la que puede trabajar, no siendo recomendable el que un compresor trabaje constantemente a su presión máxima.

**2.1.3. Ciclo de compresión ideal.** El ciclo de compresión ideal en un compresor alternativo se puede explicar de manera sencilla en el diagrama P-V (presión con respecto al volumen) que mostrará a continuación; teniendo en cuenta alguna consideración para hacer el estudio en un ciclo ideal.

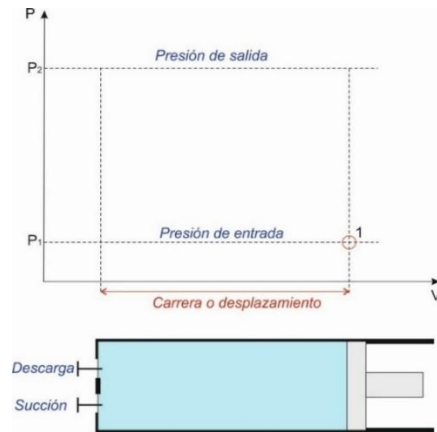
- **Espacio muerto:** hay espacios que permanecen llenos del fluido a comprimir como el espacio residual entre el pistón y el fondo del cilindro, también hay un espacio en las válvulas que hace que el sistema no comience a hacer su admisión desde un volumen completamente en cero.
- **Compresión poli trópica:** en el proceso de compresión y expansión se supone constante y se relaciona según la ecuación:

$$PV^n = C \quad (1)$$

Donde P es la presión, V el volumen, n la constante poli trópica y C una constante.

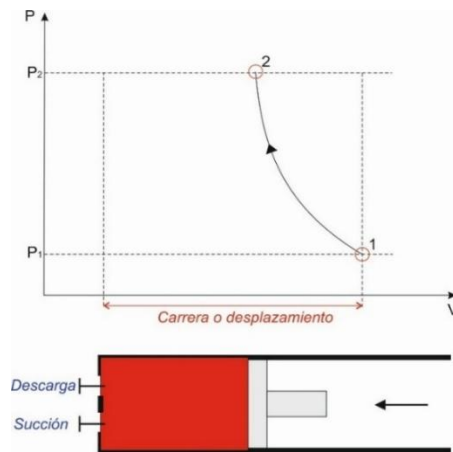
Para empezar con el ciclo se ilustra en la Figura 6 cuando el cilindro se encuentra lleno de gas a presión atmosférica. Ambas válvulas se encuentran cerradas.

Figura 6. Descripción general del diagrama PV



Una vez inicie el movimiento del pistón aun con las válvulas cerradas, se reduce el volumen hasta la presión 2 llegando al punto 2 del diagrama PV en la Figura 7. En este proceso se presenta una compresión politrópica supuesta en sistemas ideales.

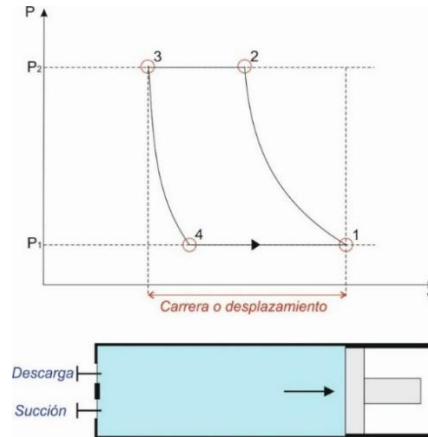
Figura 7. Compresión politrópica del fluido en el diagrama PV





Luego la válvula de succión se abre para dejar entrar de nuevo fluido a condiciones iniciales (punto 1) que será sometido a los demás procesos para ser comprimido y volver a hacer el mismo comportamiento en el ciclo, Figura 10.

Figura 10. Admisión del fluido en el diagrama PV



La válvula de admisión abre cuando en el cilindro hay menor presión que en la tubería de admisión (que puede ser presión atmosférica), mientras que la válvula de descarga abre sólo cuando la presión dentro del cilindro es mayor que la de la tubería de descarga.<sup>2</sup>

**2.1.4. Compresión en múltiples etapas.** Cuando la demanda de presión y capacidad es grande para ser realizada en una única etapa es necesario realizar la compresión en otra etapa adicional o más dependiendo de la relación de compresión.

El número de etapas está determinado por distintos factores, económicos debido a la selección de un compresor de mayor capacidad volumétrica, de presión de

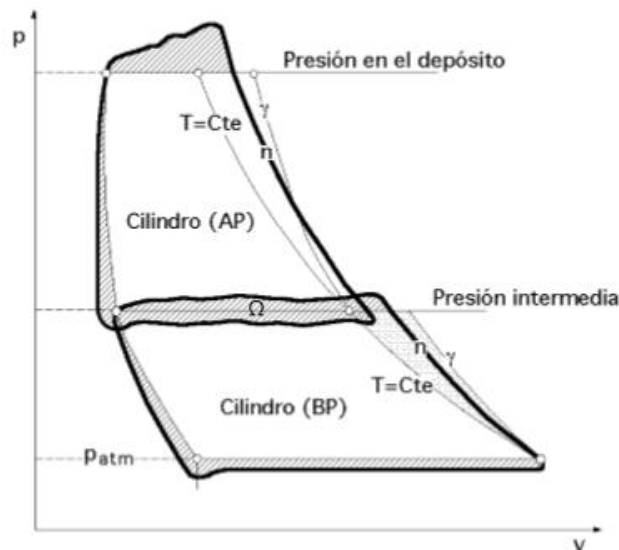
<sup>2</sup> Brown, Royce N. Compressors Selection and Sizing. Gulf Publishing Company. 1986.

acuerdo a la relación de compresión entre la succión y la presión necesaria para la operación, de temperatura ya que la temperatura de descarga en la compresión no debe exceder los 150 °C del aire, etc.

En medio de las etapas de compresión existe un enfriamiento del fluido comprimido para evitar que los cilindros lleguen a una temperatura no permitida y no alterar la eficiencia de la máquina o dañe las válvulas o el aceite.

En la Figura 11 se muestra el comportamiento de la compresión en una gráfica de la presión respecto al volumen comprimido, allí se encuentra la compresión con el cilindro de baja presión, que es el que comprime el aire aspirado hasta una presión aproximada de 30 a 45 PSI, y al de alta presión, que comprime el aire recibido hasta la presión de descarga, indica que la energía que requiere el conjunto de cilindros es menor a la que se requeriría si se hiciera con un solo compresor.

Figura 11. Diagrama P-V de la compresión en dos etapas

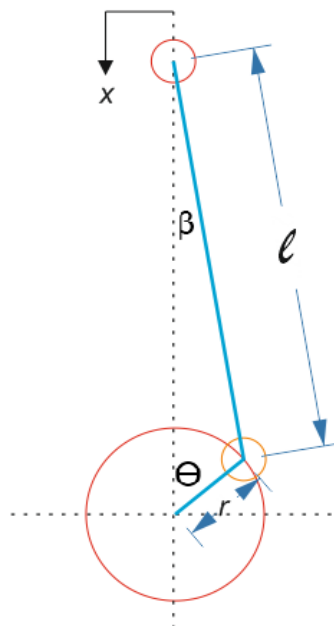


Fuente: FERNÁNDEZ, Pedro. Compresores. Universidad de Cantabria. España. p. I-

El área rayada  $\Omega$  es el trabajo perdido que se realiza dos veces sobre el aire, en la expulsión del cilindro de baja presión y en la compresión del cilindro de alta presión.<sup>3</sup>

**2.1.5. Cinemática del compresor.** El movimiento del pistón se puede describir en un movimiento circular del cigüeñal que a su vez mueve un sistema de biela manivela que hace el desplazamiento alternativo del pistón. Para determinar la velocidad y el desplazamiento del pistón en función del ángulo de giro del cigüeñal se puede obtener realizando un estudio cinemático del sistema biela – manivela que se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Esquema del sistema biela- manivela



Donde:

l: longitud de la biela.

r: radio de la manivela.

---

<sup>3</sup> FERNÁNDEZ, Pedro. Compresores. Universidad de Cantabria. España. p. I-13

$x$ : la posición del pistón referida al punto muerto superior.

$\Theta$ : ángulo girado por el cigüeñal contado desde el punto muerto superior.

$\beta$ : ángulo que forma la biela con el eje del cilindro.

De la gráfica se tiene:

$$x = r * (1 - \sin \theta) - l * (1 - \cos \beta) \quad (2)$$

La ecuación 2 muestra el desplazamiento en función de ambos ángulos, esta expresión se reduce al ángulo de giro del cigüeñal, hallando una relación de ángulos con el triángulo formado, expresándose así:

$$r * \sin \theta = l * \sin \beta \rightarrow \sin \beta = \frac{r * \sin \theta}{l} \quad (3)$$

$$\sin \beta = \frac{r}{l} * \sin \theta \rightarrow \beta = \sin^{-1} \left( \frac{r}{l} \sin \theta \right) \quad (4)$$

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \left( \frac{r}{l} \right)^2 * \sin^2 \theta} \quad (5)$$

Con estas ecuaciones se puede expresar (ecuación 6) únicamente en el ángulo del cigüeñal y las distancias de las partes.

$$x = x_0 + r * (1 - \cos \theta) + l * \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{r}{l} \right)^2 * (\sin \theta)^2} \right) \quad (6)$$

De la ecuación 6 se puede reducir la ecuación de la velocidad que lleva el pistón, así:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\theta} * \frac{d\theta}{dt} \quad (7)$$

$$\dot{x} = \omega * r * (\sin \theta + \frac{r}{2} * \sin 2\theta) \quad (8)$$

**2.1.6. Operación del compresor alternativo.** Los modos de operar de todos los compresores tienen una secuencia lógica para empezar a desarrollar su propósito de compresión, de manera general se expone la puesta en marcha de los compresores y la parada.

1) Puesta en marcha:

- Se debe verificar que todos los componentes del compresor estén alineados, circuitos de refrigeración y lubricación, llenos y venteados.
- Abrir las válvulas de aspiración e impulsión del compresor.
- Poner la capacidad del compresor al 0% para que el motor de arranque empiece en el mínimo. Subir poco a poco hasta que el compresor se estabilice.

2) Parada del compresor:

- Reducir la carga de forma escalonada.
- Parar el compresor.
- Drenar el compresor.
- Si está en “stand by” dejar los sistemas en funcionamiento.

**2.1.7. Diagnóstico en los compresores alternativos.** Es conveniente observar el comportamiento en operación de los compresores para detectar posibles fallas de estos y tener una idea de que es lo que está funcionando mal o donde está la falla y cual sería una alternativa de solución, a continuación, se muestra el Cuadro 1 que tiene una relación de síntomas de mal funcionamiento y cuáles serían las causas y las posibles soluciones.

Cuadro 1. Cuadro técnico de síntomas de funcionamiento anormal, causas y corrección.

| Anomalía   | Causa  | Corrección                                   |
|--|--|--|
| <b>No arranca el compresor</b>                     | Falta de aceite  | Llenar de aceite al nivel.                   |
|  | Falta de agua  | Abrir la llave de entrada o dar mayor caudal |
| <b>Dispara la válvula de seguridad entre fases</b> | Válvula de seguridad mal (Destarada)   | Repararla o reponerla                        |
|  | Membranas o tórica de regulación mal (Pasa aire de regulación a la 1ª etapa) | Reponer                                      |
| <b>Aceite en filtro de aspiración</b>              | Demasiado engrase (Al trabajar en vacío expulsa por la aspiración)           | Ajustar el engrase y revisar                 |
| <b>Consumo excesivo de aceite del cárter</b>       | Empaquetadura deteriorada o floja  | Reapretar o reponer                          |
|  | Nivel de aceite muy bajo   | Revisar                                      |
| <b>No sube la presión de aceite</b>                | Giro inverso de la bomba   | Cambiar la polaridad del motor               |
|  | Falta de aceite  | Llenar de aceite el nivel                    |
|  | Bomba descebada  | Cebarla                                      |
|  | Manómetro o tubería averiada   | Reponer o reparar tubería                    |
| <b>Caudal del compresor disminuido</b>             | Válvulas de admisión o escape mal  | Revisar válvulas                             |
|  | Filtro aspiración sucio  | Limpiar el filtro                            |
|  | Desgaste segmentos   | Reponer                                      |
| <b>Inconvenientes en el suministro de aire</b>     | Tubería de admisión obstruida. Filtro sucio.                                 | Limpiar                                      |
| <b>Sube la presión final</b>                       | Presostato averiado.   | Reponer                                      |
|  | Tubería presostato rota  | Arreglar                                     |
|  | Electroválvula averiada, no abre, queda agarrada                             | Revisar funcionamiento o reponer.            |
|  | Tubería regulación rota.   | Arreglar tubería                             |
|  | Pistón descargador bloqueado en posición alta (No abre válvula)              | Aligerar pistón descargador                  |
| <b>Baja la presión entre fases (en vacío)</b>      | Válvula escape 1ª etapa mal (Fuga.)  | Revisar válvulas                             |

Cuadro 1. Cuadro técnico de síntomas de funcionamiento anormal, causas y corrección. (Continuación)

| Anomalía   | Causa  | Corrección                                |
|--|--|---|
| <b>La máquina se para</b>                              | Falta de aceite  | Comprobar seguridad y circuito de engrase |
|  | Falta de agua  | Comprobar seguridad y circuito de agua    |
|  | Alta temperatura en escape (Funcionando termostato)      | Refrigerador final sucio o poca agua.     |
|  | Fallo eléctrico  | Revisar maniobra                          |
| <b>Baja la presión entre fases (en carga)</b>          | Válvula admisión 1ª etapa mal                            | Revisar válvulas                          |
|  | Válvula de escape 1ª etapa mal (Baja un poco la presión) | Revisar válvulas                          |
| <b>Baja la presión final</b>                           | Consumo excesivo en red                                  | No es ningún fallo del compresor          |
|  | Presostato mal tarado o averiado                         | Tarar bien o reponerlo                    |
| <b>Aire caliente a la salida de los refrigeradores</b> | Falta de agua, si el agua sale caliente                  | Aportar más caudal de agua                |
|  | Sucios los refrigeradores. (Agua sale fría)              | Limpiarlos                                |
| <b>Calentamiento del compresor</b>                     | Válvulas en malas condiciones                            | Revisar                                   |
|  | Presión de descarga excesiva.                            | Controlar                                 |
|  | Lubricación insuficiente.                                | Vigilar el aceite                         |

Fuente: FERNÁNDEZ, P. Compresores. Universidad de Cantabria. España. p.






I-19

## 2.2. NORMAS DE SEGURIDAD PARA BANCOS DE PRUEBA

### 2.2.1. Señalización para instalaciones

En los lugares de trabajo en general y en los talleres mecánicos y de máquinas térmicas en particular, la señalización contribuye a indicar aquellos riesgos que por su naturaleza y características no han podido ser eliminados. Considerando los riesgos más frecuentes en estos locales, las señales a tener en cuenta son las mostradas en el siguiente cuadro:

Cuadro 2. Señalización de locales para prevención de accidentes

| Señal                                       | Descripción  | Ilustración   |
|---|--|---|
| <b>Señales de advertencia de un peligro</b> |  |   |
| <b>Riesgo eléctrico</b>                     | Esta señal debe situarse en todos los armarios y cuadros eléctricos del taller   | <br>Riesgo eléctrico                     |
| <b>Riesgo de caídas al mismo nivel.</b>     | Cuando existan obstáculos por el suelo difíciles de evitar, se colocará en lugar bien visible la señal correspondiente   | <br>Riesgo de tropezar                   |
| <b>Señales de prohibición</b>               |  |   |
| <b>Prohibición</b>                          | De forma redonda con pictograma negro sobre fondo blanco. Presentan el borde del contorno y una banda transversal descendente de izquierda a derecha de color rojo, formando ésta con la horizontal un ángulo de 45°                       | <br>Prohibido fumar y encender fuego     |
| <b>Señales de obligación</b>                |  |   |
| <b>Protección obligatoria de la vista</b>   | Se utilizará siempre y cuando exista riesgo de proyección de partículas a los ojos, en operaciones con esmeriladoras, radiales, etc.   | <br>Protección obligatoria de la vista |
| <b>Protección obligatoria del oído.</b>     | Esta señal se colocará en aquellas áreas de trabajo donde se lleguen a superar los 85 dB(A) de nivel de ruido equivalente o los 137 dB(C) de pico, de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 7 del Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo. | <br>Protección obligatoria del oído    |
| <b>Protección obligatoria de los pies</b>   | De uso en aquellos casos en que exista riesgo de caída de objetos pesados, susceptibles de provocar lesiones de mayor o menor consideración en los pies y sea necesaria la utilización de calzado de seguridad.                            | <br>Protección obligatoria de los pies |

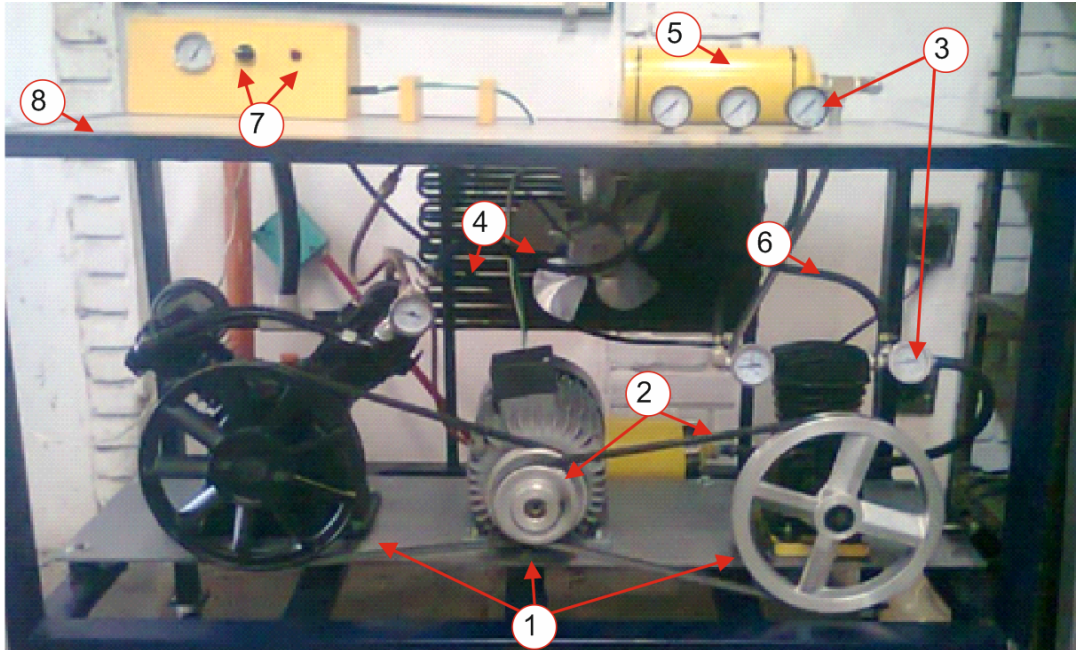
### 3. DIAGNÓSTICO DE FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS DE COMPRESORES DE DOS ETAPAS

En un primer plano se realizó una inspección visual al banco (ver *Figura 13*) que se encuentra en las instalaciones del Laboratorio De Máquinas Térmicas Alternativas; con la ayuda del auxiliar del laboratorio se procedió a verificar y revisar los componentes del banco y sus instalaciones.

Los sistemas que componen el banco son los siguientes:

- Sistema de compresión (1): consta de un motor trifásico y dos compresores.
- Sistema de transmisión de potencia (2): consta de ocho poleas (de las cuales 2 están instaladas y 6 son para instalación e intercambio) y dos bandas.
- Elementos de medición (3): temperatura, presión, caudal y potencia.
- Sistema de refrigeración (4): consta de un intercambiador y un ventilador.
- Sistema de almacenamiento (5): consta de dos tanques.
- Conexiones neumáticas (6): compuesta por tuberías y mangueras.
- Sistema eléctrico (7): consta de un contador, dos interruptores y conexiones eléctricas.
- La estructura (8).

Figura 13. Banco de pruebas de compresores de dos etapas.



Fuente: Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas. Salón 156. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

### 3.1. IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS

**3.1.1. Observación del equipo de trabajo.** De las observaciones hechas al banco se destacan varios aspectos importantes para realizar una mejora o un posible cambio para complementar el estudio de los fenómenos de los compresores recíprocos, así:

- a. El operario del banco puede estar en un potencial peligro cuando el banco está en funcionamiento ya que el sistema de transmisión de potencia está descubierto. Cuando esté puesto en marcha el sistema, puede ocurrir que las bandas se atasquen con la ropa del operario o el cabello de algún compañero(a) cuando se acerquen a realizar la toma de datos de los medidores ya que los medidores están ubicados encima de los compresores

dentro de la estructura del banco y es obligatorio hacer una aproximación para la lectura de los medidores. Ver en la Figura 14.

- b. Debido a la falta de protección que generan problemas (ver punto a), las conexiones neumáticas están expuestas a posibles golpes internos por sobre-presiones que hace que la manguera salte abruptamente, o el calentamiento superficial de la manguera de cobre, que pone en riesgo la integridad del operario o de los participantes de la práctica.
- c. Sistema de medición. Manómetros de glicerina, Manómetro lleno de glicerina con caja de acero inoxidable diseñado para ser instalado en ambientes donde existan agentes corrosivos, gran cantidad de polvo, vibración excesiva, los medidores tienen la glicerina regada.
- d. El banco muestra un comportamiento vibratorio que no permite la buena lectura de los medidores, y se deberá realizar una inspección de medidas de las vibraciones para determinar si son aceptables o no son permisibles. Ver ítem 6.3 donde se aprecian medidas de vibraciones

Figura 14. Medidores instalados sobre los compresores



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

**3.1.2. Apreciación de estudiantes.** Los estudiantes de la asignatura de Máquinas Térmicas Alternativas que aprovechan de las prácticas del laboratorio participaron con algunas opiniones para el mejoramiento del banco de pruebas para las prácticas de compresores recíprocos:

*“Los medidores son difíciles de leer ya que se encuentran muy escondidos y encima de la maquinaria”.* Estudiante 1.

*“El banco presentan vibraciones que no sabemos si sean los permitidos”.* Estudiante 2.

*“Cuando realizamos las prácticas, se nos dificulta acercarnos ya que las transmisiones en las bandas andan a una velocidad alta y corremos riesgo”.* Estudiante 3.

**3.1.3. Conclusión de los calificadores de la Fase I.** Dentro de la revisión a las posibles fallencias que hayan dejado el banco en la fase 1, se buscó la apreciación de uno de los calificadores en este caso el profesor Néstor Raúl D`Croz, quien concluyó que se debía mejorar la estructura del banco con el fin de reducir las vibraciones e implementar una simulación para explicar el procedimiento o el proceso térmico que se da en un sistema de compresión de 2 etapas.

#### **3.1.4. Estados de los componentes del banco**

- **Motor eléctrico:** el motor trabaja normal en cuanto a su rango de operación se refiere, no se le deberá hacer cambios al motor.
- **Compresores:** a los compresores se les realizó una inspección que determinó que el lubricante se había emulsionado y es necesario realizar un cambio de aceite, y revisar los empaques, ya que al haber funcionado un tiempo con el aceite en esas circunstancias es posible que presenten daños los compresores.

- **Sistema de enfriamiento:** hasta el último momento en que se usó el banco, el sistema de enfriamiento mostro una eficiencia del mismo rango que al principio, es decir, la temperatura sale en el rango de temperatura aceptable o necesario para la segunda etapa. De manera general el único problema visible es suciedad.
- **Correas:** las correas no tienen fisuras, cortaduras, punzadas o desgastes aparentes. Están en buen estado.
- **Estructura:** la estructura se encuentra en buen estado, en cuanto a la rigidez de la estructura se trata, hace falta instalar dos ruedas que no están y pulir la estructura para volver a pintar y quede prolijo. En cuanto al tema de seguridad habrá que evaluar la posibilidad de instalar un sistema de rejillas en donde están instalados los motores y los compresores para evitar y prevenir posibles accidentes. Además, el panel de manipulación se encuentra en mal estado debido a la humedad (posible factor) la madera está podrida. Ver Figura 15.

Figura 15. Panel de manejo del banco y estructura



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

- **Medidores:** para los medidores habrá que estudiar la posibilidad de buscar un nuevo lugar de instalación donde sea más provechosa la manera de tomar medidas y que no sea tan riesgosa para el estudiante. Los medidores de presión debido al traslado de la máquina tienen derrame la glicerina. Los medidores de temperatura están en buen estado.
- **Tanques:** los tanques no presentan daños aparentes, las abrazaderas son débiles y algunas están rotas.
- **Válvula de escape:** la válvula de escape que está en funcionamiento no es la misma que dejaron instalada los estudiantes responsables de la fase 1, esta válvula fue cambiada por una nueva válvula de alivio de asiento y bola, por petición del profesor responsable del Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas, Prof. Jorge Luis Chacón y fue cambiada por el estudiante encargado de la práctica Ilexon Barajas.

### 3.2. ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS

El proceso anterior sirve para tener un conocimiento de los problemas que se presentan en el banco para ponerlos en prioridad y definir su importancia para llegar a una posible solución de una manera organizada.

**3.2.1. Descripción de los problemas presentes en el banco.** En el siguiente cuadro se resumen los problemas específicos del banco y cuál será el parámetro a evaluar para llegar a una solución.

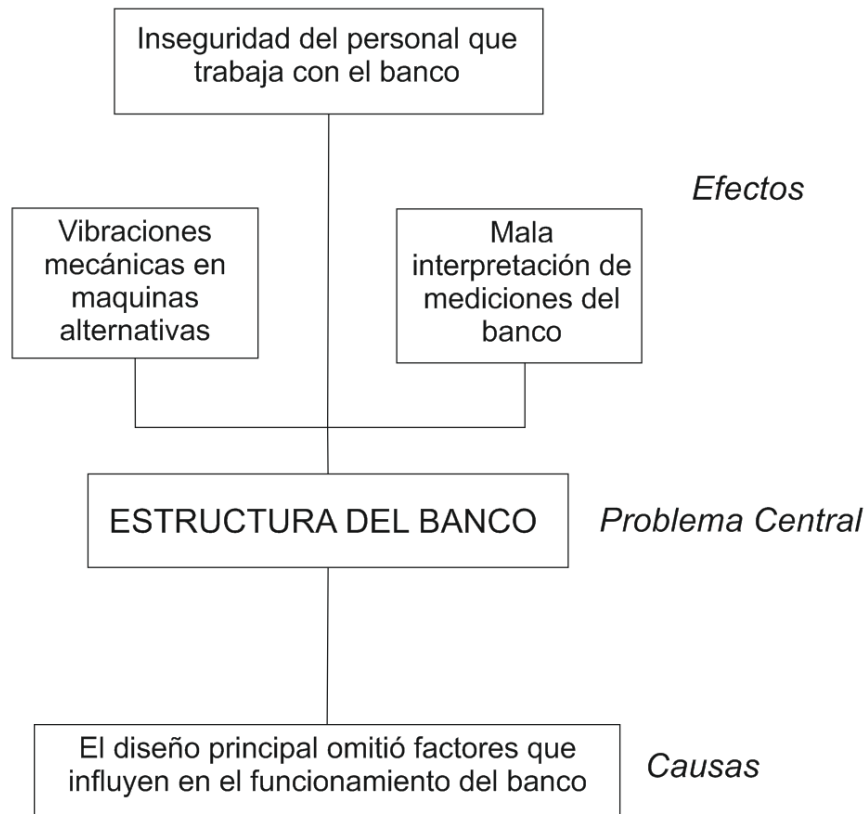
Cuadro 3. Descripción de los problemas

| Problemas observados  | Parámetros a evaluar                        |
|---|---|
| Seguridad y protección de la integridad de los estudiantes y del auxiliar que interactúen con el banco. | Estructura del banco                        |
| Lectura interrumpida o difícilmente visible de los sensores.  | Estructura del banco<br>Sistema de medición |
| Calibración de los sistemas de medición debido a las vibraciones.<br>Manómetros con glicerina regada.   | Manómetros<br>Termómetros                   |
| Vibraciones inaceptables.   | Amortiguadores                              |
| Aceite emulsionado.   | Mantenimiento de componentes                |

### 3.2.2. Árbol de problemas.

Se definió que el parámetro que más influencia en los problemas hallados en el banco es la estructura ya que está ejerce una fuerte influencia en los otros posibles factores, en el árbol de problemas se define como el problema central, ver Figura 16, que sirve para estructurar las causas y efectos para el análisis del problema.

Figura 16. Árbol de problemas



**3.2.3. Matriz DOFA para estructurar las soluciones.** La matriz DOFA permite conocer mejor la realidad, la existencia de debilidades y fortalezas, entender las relaciones entre los distintos factores que se desarrollan en un determinado proyecto y prever posibles soluciones dentro del sistema para intervenir o bien, hacer cambios en algún aspecto del proyecto bajo estudio. También permite definir problemas, profundizar en los mismos y establecer órdenes de importancia o prioridades, así como también, que problemas son causa de otros y cuáles son sus consecuencias y por último permite diseñar estrategias, identificar alternativas y decidir acerca de acciones a realizar.

Cuadro 4. Cuadro de la matriz DOFA

|        |         | Positivos  | Negativos  |
|--------|---------|--|--|
| Origen | interno | <b>Fortalezas:</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El banco cuenta con buenos componentes y de muy buena calidad.</li> </ul>   | <b>Debilidades:</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El banco presenta grandes vibraciones.</li> <li>✓ Sistema de medición sobre los equipos en vibración.</li> </ul> |
|        | externo | <b>Oportunidades:</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Posible implementación de un sistema informático.</li> <li>✓ El banco es versátil y sujeto a cambios.</li> </ul> | <b>Amenazas:</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Manipulación externa con posibilidad de riesgo de operación.</li> </ul>   |

### 3.3. SOLUCIONES CONCLUIDAS DE ACUERDO AL ANÁLISIS DE LA MATRIZ DOFA

La matriz DOFA en el ítem anterior permite resaltar los problemas a atacar en el proyecto y también las posibles mejoras para que el estudiante tenga un mayor aprovechamiento.

Para el mejoramiento del banco se plantearon las siguientes sugerencias y futuras adaptaciones:

**3.3.1. Implementación de un software para la simulación de un sistema de compresión de 2 etapas utilizando la herramienta de Matlab.** Una de las razones principales por las que se realizó el diseño y la construcción de este banco fue para que el estudiante comprendiera y estudiara como se da el proceso de compresión en múltiples etapas afianzando la teoría vista en la cátedra de Maquinas Térmicas Alternativas con trabajos prácticos hechos en el laboratorio. Dentro de las practicas realizadas en el banco el estudiante puede realizar la comparación del comportamiento termodinámico de una etapa y múltiples etapas haciendo uso de los datos obtenidos y de su ingenio en el desarrollo de la práctica. Con el fin de diferenciar su ahorro en potencia que es el fin de este proceso multietapa en procesos reales que se encuentran en la industria.

En esta etapa del proyecto se quiere que el estudiante cuente con una herramienta informática que le permita apreciar de manera directa como se comporta un sistema de compresión de 2 etapas haciendo uso de un programa de computación y que la comparación y el estudio de estos sistemas sean completo.

**3.3.2. Selección de una red neumática con compresores alternativos para una instalación de aire industrial.** Es fundamental que el estudiante de ingeniería mecánica tenga claro cómo funcionan los compresores, en el caso particular de este proyecto, el funcionamiento correcto de un compresor reciprocante y sus alcances. Para esto se considera importante dentro de las oportunidades que se presentaron en la matriz DOFA que el estudiante cuente con una herramienta informática para la selección de compresores para aire industrial en un entorno que se asemeje al que encontrará en su carrera como profesional.

**3.3.3. Vibraciones.** Se hará un análisis de vibración para encontrar cuanto esta por fuera de las características optimas de funcionamiento de vibración, si lo está, permitido para las maquinas reciprocantes y buscar un sistema de amortiguamiento de ser necesario, que permita reducir las vibraciones al mínimo permitido instalando las mejoras al banco de pruebas, luego tendrá que comprobarse si las vibraciones se redujeron con las mejoras hechas con un procedimiento igual al primero.

**3.3.4. Implementación de un sistema de protección y seguridad del banco.** Estudiantes y maestros que tuvieron la oportunidad de manipular el banco coincidieron en que este banco presenta problemas de seguridad ya que no adopta ninguna medida para impedir que alguna prenda o el cabello de operadores mujeres se interpongan en el camino del sistema de transmisión por correas, esto se da debido a que el estudiante se tiene que aproximar a ver los datos para recopilarlos para sus respectivos informes, para esto se va a proteger el operario instalando unas rejillas al banco, cambiando los medidores de puesto, arreglar el tablero de manipulación.

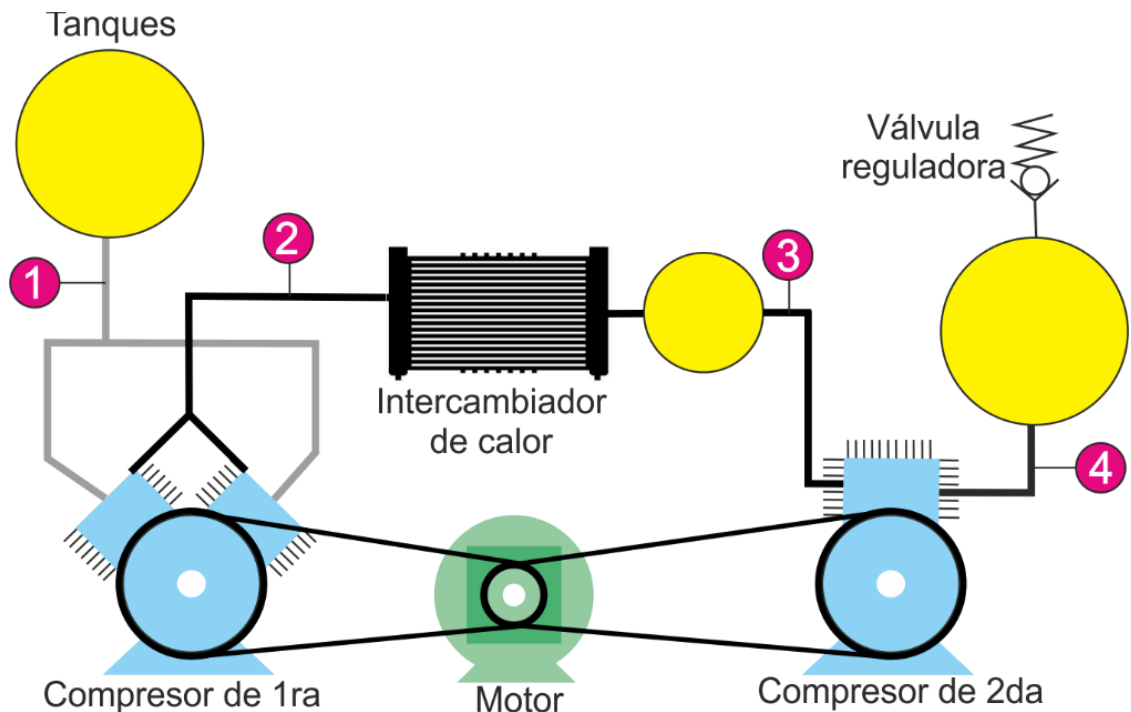
**3.3.5. Mantenimiento del banco de pruebas.** La probabilidad que hay de daños en los componentes en el banco debido a las exposiciones o debido a los efectos provocados por las vibraciones en los compresores, hace que sea imperativo realizar un mantenimiento detallado del banco en general y de los componentes por aparte, en el apartado 3.1.4 se aprecia el estado en que están y de ahí partir para realizar un exhaustivo mantenimiento.

## 4. SIMULACIÓN DEL DIAGRAMA PV DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN DE DOS ETAPAS EN MATLAB

### 4.1. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA TOMA DE DATOS

Para la simulación del diagrama PV se utiliza la siguiente ilustración (Figura 17) en donde se especifican los estados es los puntos del sistema que van a servir para realizar el diagrama, estos estados son medidos por termómetros analógicos y manómetros que están instalados en el banco de pruebas disponible en el laboratorio.

Figura 17. Representación gráfica del banco de pruebas



En la gráfica se muestran los componentes básicos del banco además de las posiciones en donde se ubican los medidores que son:

- 1- Entrada al compresor de primera etapa, condiciones ambientales.
- 2- Salida del compresor de primera etapa (después de la compresión).
- 3- Salida del inter-enfriamiento y entrada al compresor de segunda etapa.
- 4- Salida del compresor de segunda etapa, condiciones finales del fluido.

En este caso las tomas de presión y temperatura se hacen en las entradas y las salidas de los compresores, es decir, se muestran los datos del resultado de la compresión final en cada compresor y no dentro del compresor para ver como varían las presiones gracias a las fluctuaciones que existen durante todo el proceso.

#### **4.2. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE COMPRESIÓN IDEAL**

Como el banco arroja los valores de presión y temperatura es posible usar la ecuación de los gases ideales que relaciona la presión y la temperatura con el volumen<sup>4</sup>, como se muestra en la ecuación 9;

$$V(T, P) = \frac{R*T}{P} \quad (9)$$

Donde R es la constante de los gases que equivale a:

$$R = 0,2869 \frac{KJ}{Kg*K} \quad (10)$$

---

<sup>4</sup> BLOCH, Heinz P, Majumdar, S. R. Guía Práctica para la tecnología de los compresores. Mexico. Mc. Graw Hill, 1998. p. 40-50.

Para el proceso de compresión y expansión se asume un proceso politrópico que se relaciona con la ecuación 10 con el propósito de hallar la reducción o aumento del volumen:

$$V_a(P, V_o, P_o, n) = \left(\frac{P_o * V_o^n}{P}\right)^{1/n} \quad (11)$$

Con esta relación en la ecuación 11, se calcula la constante politrópica de la manera que se muestra en la ecuación 12:

$$n = \frac{\log_{10}\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{\log_{10}\left(\frac{V_1}{V_2}\right)} \quad (12)$$

En el caso de los estados 1, 2 3 y 4 están dados por los medidores en el banco, para el volumen 5 y 6 se debe tener en cuenta el volumen muerto o volumen libre que viene especificado en la ficha técnica de los compresores en tal caso son así:

CL1= 5% “Volumen muerto para el primer compresor”

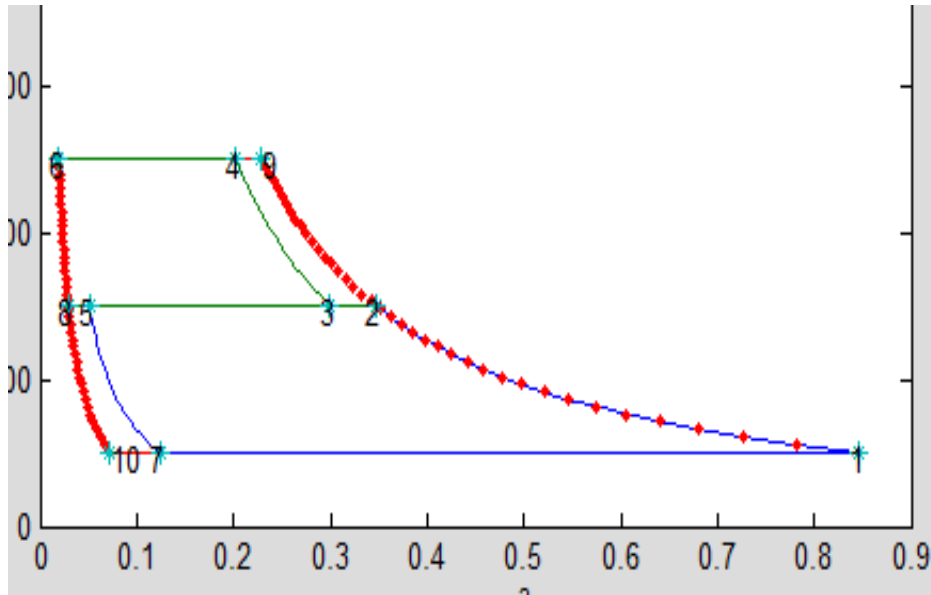
CL2= 6,5% “Volumen muerto para el segundo compresor”

Los estados anteriores están especificados en Figura 18, que es un ejemplo del resultado final de la programación para la compresión ideal.

En la Figura 18 se traza la gráfica de un ejemplo con los datos suministrados en el laboratorio, esta figura representa el diagrama PV de un ciclo de compresión ideal en dos etapas, la etapa 1 representada con una línea azul (puntos 1-2-5-7), es la compresión hecha por el primer compresor, la gráfica representada con la línea verde (puntos 3-4-6-8) es la compresión que se realiza en el segundo compresor, después del enfriamiento; estas dos gráficas representan el ciclo completo en dos

etapas, la gráfica que se traza con los puntos rojos (puntos 1-9-6-10), representa una compresión cuando se hace en una única etapa.

Figura 18. Ejemplo de la compresión de dos etapas ideal.



**Primera etapa:** líneas azules, puntos 1-2-5-7.

**Segunda etapa:** líneas verdes, puntos 3-4-6-8.

**Única etapa:** puntos rojos, puntos 1-9-6-10.

La región comprendida por los puntos 2, 3, 4 y 9 es el área que representa el ahorro de potencia cuando la compresión se hace en dos etapas.

### 4.3. AHORRO DE POTENCIA

Siguiendo la misma línea de cálculos que en la fase 1, se incluye en el panel del guide cuanto se ahorraría si se estuviera usando un sistema de dos etapas en comparación con una única etapa, para esto se realiza el siguiente desarrollo:

$$\%Ahorro = \frac{POT/Q_{real\ 1\ etapa} - POT/Q_{real\ 2\ etapas}}{POT/Q_{real\ 1\ etapa}} * 100 [\%] \quad (13)$$

El cálculo de la potencia se hace en caballos de potencia por cada CFM, así:

$$POT/Q_{real\ etapa} = \frac{HP_{real}}{Q_{real}} * \eta_{descarga} \text{ [HP/CFM]} \quad (14)$$

Las potencias 1 y 2 son las potencias tomadas en el laboratorio con la pinza piezoeléctrica, véase el procedimiento de la práctica (Anexo A. Prácticas para el Laboratorio de Térmicas Alternativas).

$$HP_{real} = (HP_1 + HP_2) * 1,34 * \frac{HP}{KW} \quad \text{[HP]} \quad (15)$$

El caudal real se halla con la velocidad del aire tomada con el anemómetro en la práctica y con el área transversal del respiradero que tiene el banco.

$$Q_{real} = \vartheta * A_{ane} \text{ [FT}^3\text{/MIN]} \quad (16)$$

La velocidad usada en la ecuación 17 es un promedio de las velocidades tomadas a la entrada y la salida del fluido.

$$\vartheta = \frac{v_{1-2} + v_{2-2}}{2} \quad \text{[FT/MIN]} \quad (17)$$

Para la eficiencia volumétrica de descarga real del sistema es necesario conocer las velocidades a la entrada y salida del aire comprimido y se calculan los caudales para hallar la eficiencia.

$$\eta = \frac{Q_{s2}}{Q_{e2}} \quad (18)$$

$Q_{s2}$ : Caudal de salida para la compresión en 2 etapas

$Q_{e2}$ : Caudal de entrada para la compresión en 1 etapa

Los caudales reales para hallar la eficiencia de descarga se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$Q_{s2} = V_{2-2} * A_{ane} * 35,35 * \frac{Z_{st}}{Z} * \frac{P_1}{T_2 * 1,8 + 491,67 [R]} \quad [CFM] \quad (19)$$

$$Q_{e2} = V_{1-2} * A_{ane} * 35,35 * \frac{Z_{st}}{Z} * \frac{P_1}{T_1 * 1,8 + 491,67 [R]} \quad [CFM] \quad (20)$$

$P_1$ : Presión de admisión, es la presión atmosférica del local.

$T_1$ : Temperatura inicial o de succión, es la temperatura atmosférica del local

$T_2$ : Temperatura de descarga, al finalizar el ciclo.

$Z$ : Factor de compresibilidad a condiciones de succión.

$Z_{st}$ : Factor de compresibilidad a condiciones estándar.

Donde las velocidades son respectivamente  $V_{2-2}$  [FT/MIN] la velocidad 1 de entrada en dos etapas y  $V_{1-2}$  [FT/MIN] la velocidad 2 de salida en dos etapas.

En el cuadro de manejo de datos se deberá ingresar los valores de potencias eléctricas consignadas en el laboratorio y las velocidades del aire tomado con el anemómetro. Ver Anexo A.

#### 4.4. MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN DE DOS ETAPAS BASADAS EN UN MODELO CINEMÁTICO<sup>5</sup>

En esta sección se plantea el mismo estudio el proceso termodinámico visto anteriormente, pero teniendo en cuenta el movimiento dinámico del cigüeñal y el pistón. En este caso, no se tendrá en cuenta el fluido que pasa a través de la válvula debido a que para esto se deberá contar con un estudio mucho más amplio y experimental.

Se simulará también un proceso politrópico y asumiendo que es un gas ideal; la diferencia con el ítem anterior será en el gráfico que ilustra el proceso termodinámico puesto que en este caso se hace para que el estudiante visualice las diferencias que tendría en un proceso cuasi-real a uno ideal, mostrando las fluctuaciones que hay en los estados de admisión y escape.

**4.4.1. Presión en el cilindro.** Se asume de la primera ley de la termodinámica y teniendo en cuenta que no se tomarán en consideración los cambios de volúmenes y presiones debido a las aperturas y cierres en las válvulas de admisión y escape y que se trata de un gas ideal, se tiene lo siguiente<sup>6</sup>:

$$\dot{P}_c = \frac{1}{v_{cil}} * (-\gamma * P_{cil} * \dot{v}_{cil}) \quad (21)$$

$$v_{cil} = v_{0cil} + S_{cil} * x_{pis} \quad (22)$$

Donde  $\gamma$  es la relación de calores específicos y  $v_{0cil}$  es el volumen de holgura o el espacio libre que hay cuando el cilindro está en el punto muerto superior.

---

<sup>5</sup> M. Elhaj, F. Gu, A. Ball, A. Albarbar, M. Al-Qattan, A. Naid. Numerical simulation and experimental study of a two-stage reciprocating compressor for condition monitoring. Mechanical Systems and Signal Processing. Science Direct. ELSEVIER.

<sup>6</sup> J. Daniel. Vibration - Based diagnostics of reciprocating machinery, Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1994. pg. 56.

$$S_{cil} = 0,25 * \pi * d^2 \quad (23)$$

$S_{cil}$ : es el área de la sección transversal del cilindro

d: diámetro del pistón

La ecuación que determina la posición del pistón en función del ángulo del giro del cigüeñal con la que se calcula  $x_{pis}$  se obtiene como se explica en el ítem 2.1.5

$$x_{pis} = x_0 + r * (1 - \cos \theta) + l * (1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 * (\sin \theta)^2}) \quad (24)$$

De la ecuación 24 se tiene que  $x_0$  es la distancia de separación entre el pistón y la cabeza del pistón en el punto muerto superior,  $\theta$  es el ángulo de giro del cigüeñal,  $l$  es la longitud de la biela y  $r$  el radio de manivela. Estos últimos dos datos son extraídos de las especificaciones de la ficha técnica de los compresores. El radio de la manivela es dos veces el desplazamiento del pistón. Ver Tabla 1 y Tabla 2.

La tasa de variación del volumen del cilindro se puede expresar como se muestra la ecuación 25:

$$v_{cil} = S_{cil} * x_{pis}' \quad (25)$$

Siendo la velocidad del pistón:

$$x_{pis}' = \omega * r * \sin \theta * \left( l + \frac{r}{l} * \cos \theta \right) / \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 * (\sin \theta)^2} \quad (25)$$

$\omega$  es la velocidad angular de rotación del compresor.

Tabla 1. Especificaciones del compresor de primera etapa

| <b>MODELO</b>                    | <b>430-2065A</b> |
|----------------------------------|------------------|
| <b>ESPECIFICACIONES TECNICAS</b> |                  |
| Motor (Hp)                       | 3,0              |
| Diám. Pistón (mm) x Cant.        | 65 x 2           |
| Consumo L/min                    | 330              |
| CFM                              | 11,65            |
| Velocidad (rpm)                  | 800              |
| Diám. Polea (Pulg)               | 10,5             |
| Presión Máx. (PSI)               | 140              |
| Desplazamiento (mm)              | 46               |
| <b>Espacio libre</b>             | <b>6,5 %</b>     |
| <b>DIMENSIONES Y PESOS</b>       |                  |
| Largo x Ancho x Alto (mm)        | 400 x 285 x 335  |
| Peso Neto (Kg.)                  | 21               |

Fuente: Catalog KTC Group, Machinery & Equipment Division. Miami, F.L.S. USA.  
401-049 T

Tabla 2. Especificaciones del compresor de segunda etapa

| <b>MODELO</b>                    | <b>430-1065A</b> |
|----------------------------------|------------------|
| <b>ESPECIFICACIONES TECNICAS</b> |                  |
| Diám. Pistón (mm) x Cant.        | 65 x 1           |
| Consumo L/min                    | 150              |
| CFM                              | 5,30             |
| Diám. Polea (Pulg)               | 10               |
| Desplazamiento (mm)              | 38               |
| <b>Espacio libre</b>             | <b>5%</b>        |
| <b>DIMENSIONES Y PESOS</b>       |                  |
| Largo x Ancho x Alto (mm)        | 230 x 215 x 285  |
| Peso Neto (Kg.)                  | 9,2              |

Fuente: Catalog KTC Group, Machinery & Equipment Division. Miami, F.L.S. USA.  
401-050

La ecuación 21 donde se expone la presión en el cilindro queda entonces dejando todas las ecuaciones en función del ángulo de giro del cigüeñal  $\Theta$ , así:

$$\dot{P}_c = \frac{-\gamma * P_{cil} * S_{cil} * \omega * r * \sin \theta * (l + \frac{r}{l} * \cos \theta) / \sqrt{1 - (\frac{r}{l})^2 * (\sin \theta)^2}}{v_{o_{cil}} + S_{cil} * (x_0 + r * (1 - \cos \theta) + l * (1 - \sqrt{1 - (\frac{r}{l})^2 * (\sin \theta)^2}))} \quad (26)$$

Usando Matlab se da solución para los respectivos compresores, a la ecuación diferencial (ecuación 26) como se muestra en el pseudocódigo siguiente:

Cuadro 5. Pseudocódigo para la ecuación diferencial de la ecuación 26.

|   |
|---|
| Inicio  |
| Solucion1=dsolve('DP=(-<br>P*0.1*sind(theta)*(0.135+0.68*cosd(theta))/(sqrt(1-<br>0.4624*send(theta)^2)))/(0.0133*(0.092*(1-cosd(theta))+0.135*(1-sqrt(1-<br>0.4624*send(theta)^2))))','P(0)=98','theta')           |
| Solucion1 =<br>98*exp(int(-<br>(156250000*sind(theta)*(136*cosd(theta)+27))/(3059*(7803*send(theta)^2+<br>141875*(1-(289*send(theta)^2)/625)^(1/2)-125000*cosd(theta)*(1-<br>(289*send(theta)^2)/625)^(1/2)-16875)) |
| Fin   |

La solucion1 no es una solución general, es una solución particular para el primer compresor y a condiciones estándar de succión, este algoritmo será usado para realizar el mismo procedimiento en el Segundo compresor.

#### 4.5. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO EN DIAGRAMA DE FLUJO

En Figura 19 y Figura 20 se muestra la descripción del algoritmo usado para el simulador del diagrama PV a través de diagrama de flujo con el fin de explicar cómo se realizó su algoritmo. Como primera medida en la primera línea se introducen las variables que no van a variar en las operaciones, se distribuyen para dos líneas

diferentes, la primera para la compresión realizada en dos etapas y la segunda para la compresión en una única etapa, los procesos matemáticos para estas dos líneas son similares.

En la pantalla principal se le pide al usuario introducir los valores de presiones y temperaturas de los puntos que se estudian en las practicas (véase Anexo A. Prácticas para el Laboratorio de Térmicas Alternativas (LMTA)), ya que son los datos a suministrar por el practicante, seguidamente se calculan las constantes politrópicas con el primer cuadro de operación en las etapas correspondientes para luego calcular las ecuaciones expuestas en el segundo cuadro de operación que corresponde a las ecuaciones propias para hallar los volúmenes de los estados. Con estos datos ya calculados se puede sacar las gráficas correspondientes a las 2 compresiones, en una misma imagen.

En la Figura 20 que es la continuación del diagrama de flujo, se realizó el procedimiento para calcular el ahorro de potencia obtenido en la práctica. Se debe introducir los valores de potencia y velocidades de flujo para realizar las operaciones de caudales y potencias reales, en el primer cuadro de operación. Luego se calculan los gastos volumétricos de entrada y salida para hallar la eficiencia volumétrica en el tercer cuadro de operación, en seguida se calculan los gastos reales para las dos compresiones (2 etapas y 1 etapa), y por último calcular el porcentaje de ahorro que se imprimirá en la pantalla, tal y como se muestra en la Figura 20.

Figura 19. Diagrama de flujo para el simulador del diagrama PV

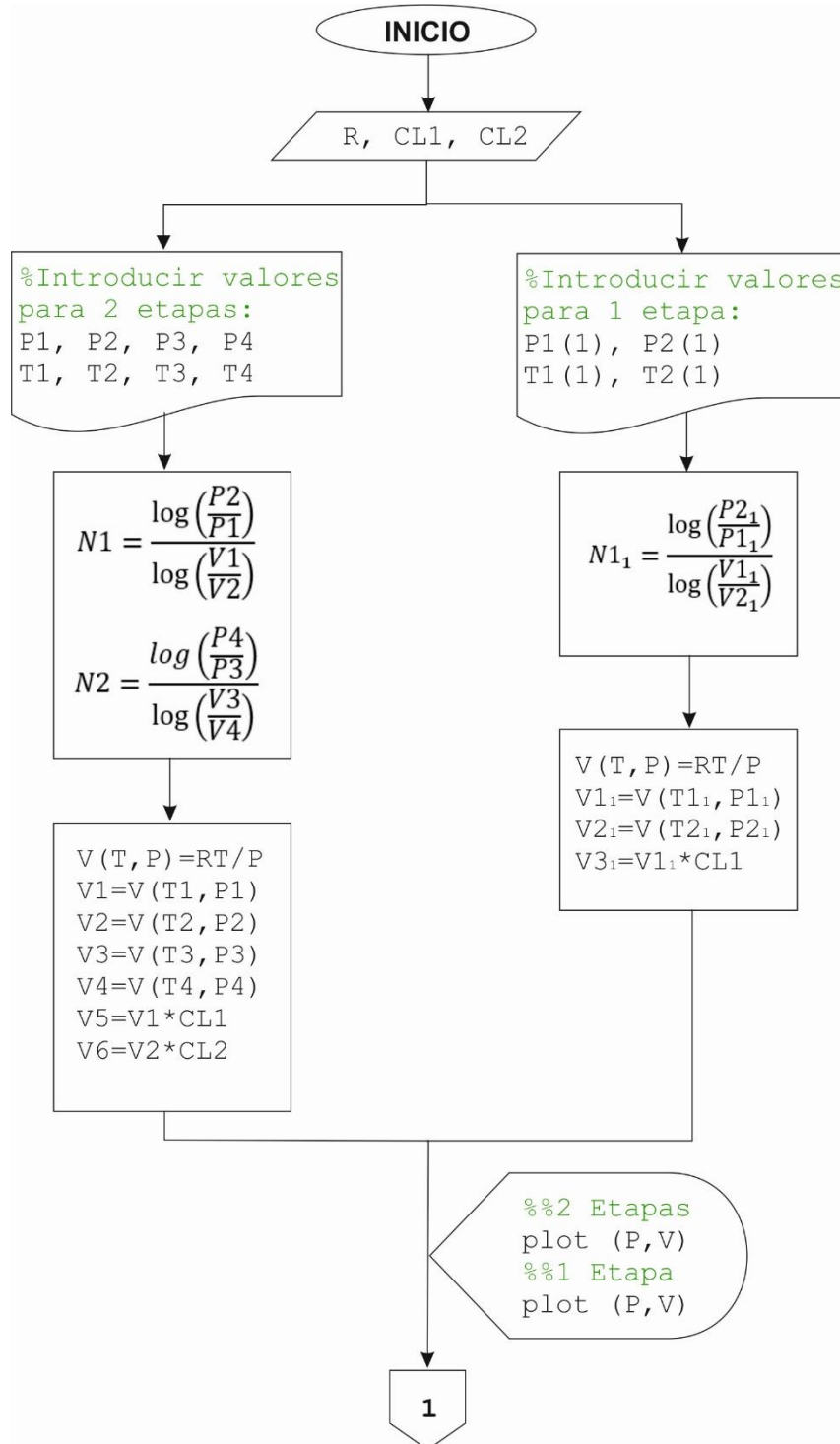
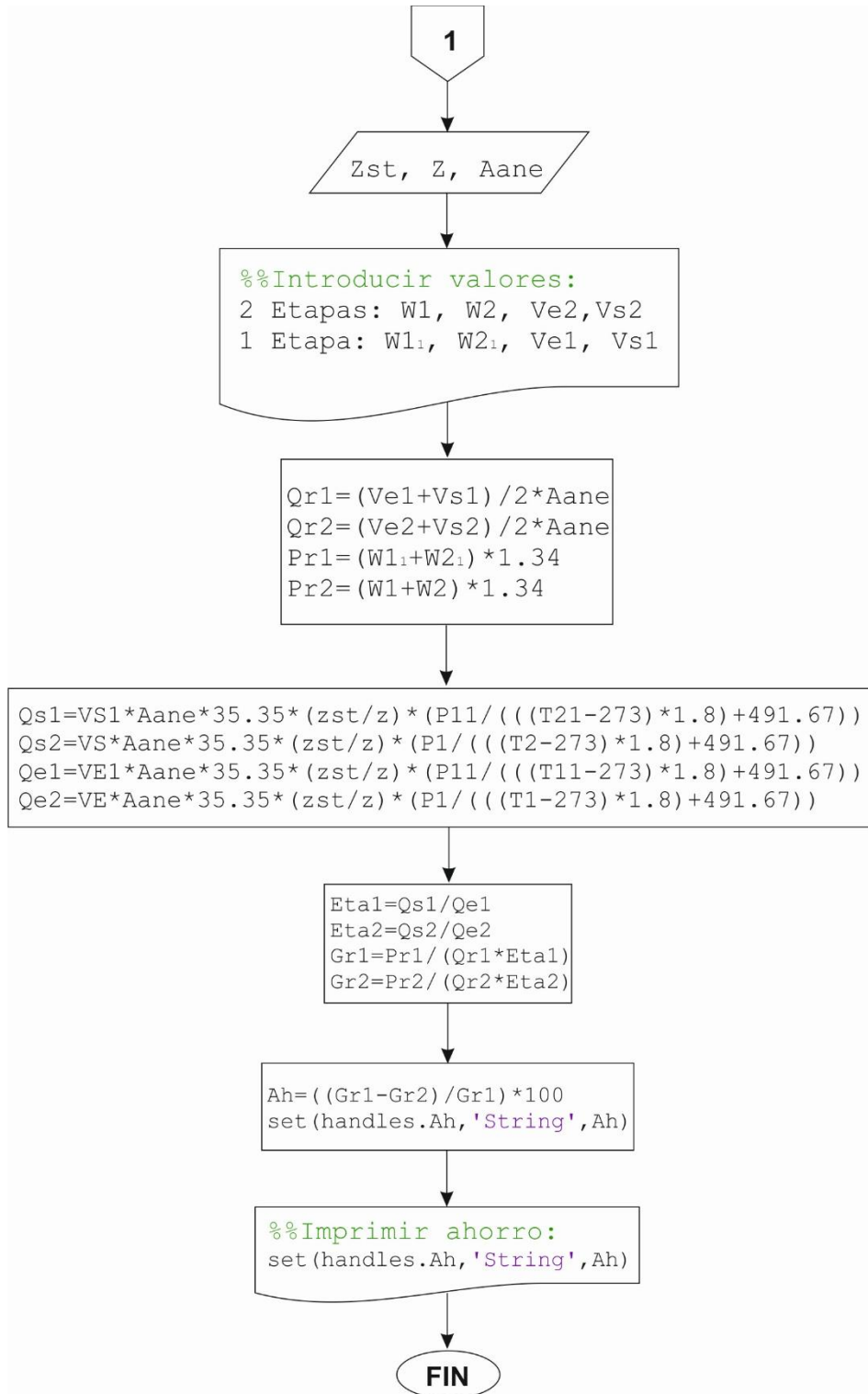


Figura 20. Diagrama de flujo para el simulador del diagrama PV (continuación)

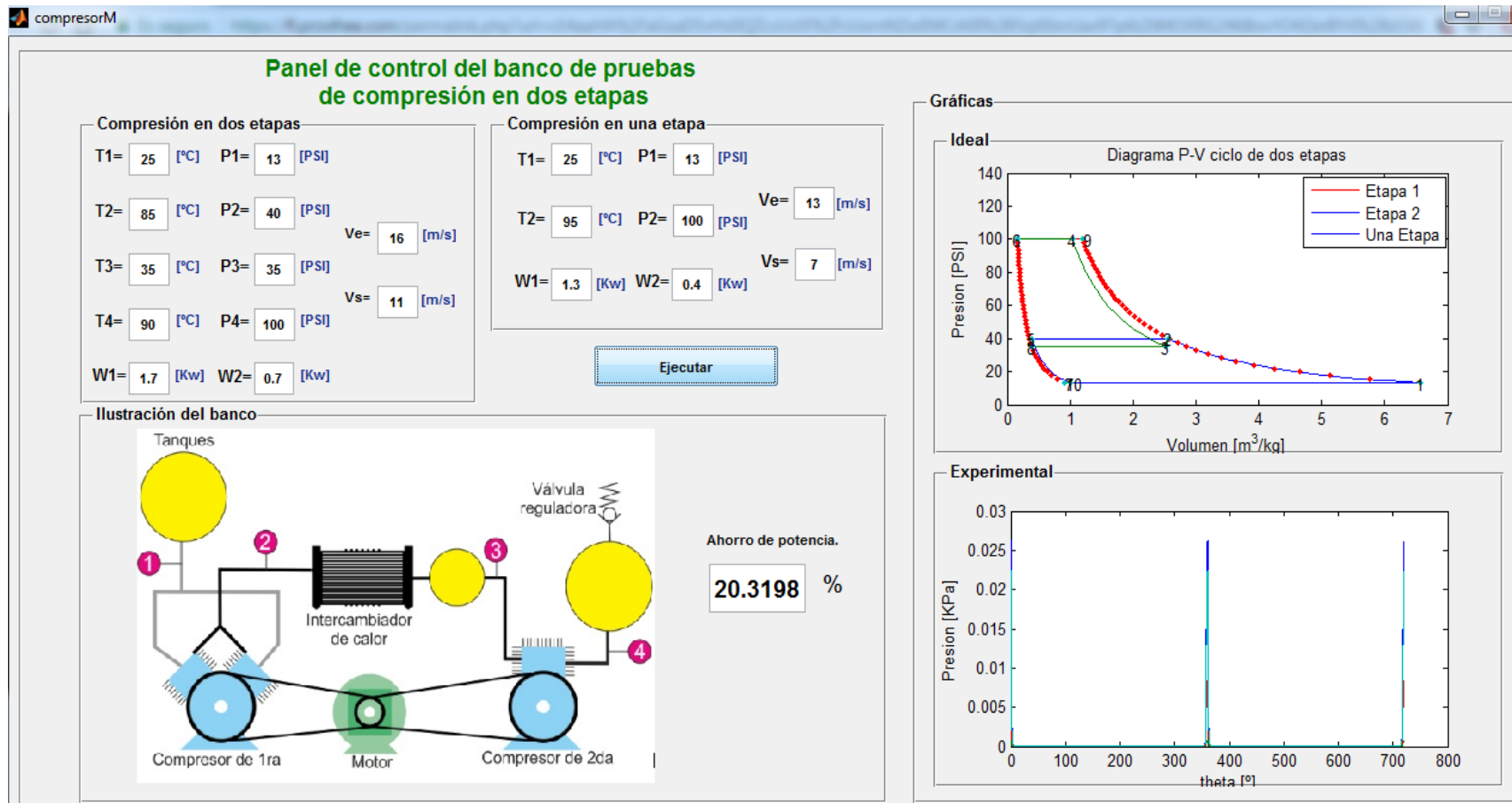


#### **4.6. INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR DEL DIAGRAMA P-V**

Con las ecuaciones anteriores introducidas en la plataforma GUI del Matlab, se realizó un panel para que el estudiante pueda realizar la práctica y graficar el proceso de compresión.

En el panel se imprime el resultado del ahorro de potencia en porcentaje y 2 gráficas; la primera gráfica es una representación de un proceso ideal sin fluctuaciones y en la segunda gráfica se representa la gráfica P-V haciendo un análisis cinemático del mecanismo biela – manivela en la representación con la presión interna en los cilindros. Ver Figura 21

Figura 21. Panel de control del banco de pruebas de compresión en dos etapas



En los paneles se introducen los datos que se consiguen en la práctica realizada en el laboratorio (ver Anexo A), al correr el programa se imprimen las gráficas y el ahorro de potencia.

Las gráficas se muestran en diferentes paneles para que el estudiante pueda concluir y apreciar las diferencias obtenidas según el método usado para graficar el proceso de compresión, en la práctica el estudiante deberá realizar un informe haciendo el estudio según se emplea en la cátedra y comparar con las gráficas y el porcentaje arrojado por el estudiante.

## **5. DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA DE SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN EN 2 ETAPAS QUE PERMITA LA SELECCIÓN DE COMPRESORES ALTERNATIVOS PARA UNA INSTALACIÓN DE AIRE INDUSTRIAL**

En múltiples escenarios de la industria es necesario implementar los sistemas para elevar la presión tales como calderas, sistemas contraincendios, sistemas con agua de alimentación, combustión de gases, turbinas, tratamientos de aguas, etc. Para esto se implementan y diseñan las redes neumáticas.

La necesidad de realizar una compresión por etapas puede obedecer a distintas causas, sin embargo, las más comunes son las siguientes:<sup>8</sup>

- a) Limitaciones de temperaturas
- b) Ahorro de energía
- c) Limitaciones de presiones

En este capítulo se diseña una red neumática que va a permitir la selección de un sistema de compresión con compresores alternativos dejando de lado algunos factores que pueden influir en el diseño, estos parámetros se irán desglosando en el transcurso del desarrollo del simulador.

Hacer la selección de un compresor reciprocante para un sistema tiene un algoritmo que se puede seguir para el dimensionamiento, para ello se necesita la siguiente información (condiciones de diseño):

---

<sup>8</sup> DOROTEO, A., de LEÓN, E. y DOROTEO, G. Selección del equipo dinámico para el manejo del gas natural de los campos COAPECHACA - TAJIN del yacimiento CHICONTEPEC. Universidad Veracruzana. Poza Rica, 2004.

- 1) Requisitos de capacidad medida en MMSCFD (Millones de pies cúbicos por día).
- 2) Temperatura y presión iniciales.
- 3) Presión final de descarga.
- 4) Característica del gas.

Esta información será utilizada para calcular y determinar:

- 1) Potencia requerida para sistemas en dos etapas
- 2) Tamaño, clase y números de cilindros de compresión para cada caso.

El diseño del programa se hizo basado en los parámetros consignados por el GPSA.<sup>9</sup>

### **5.1. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS Y POTENCIA DE LA RED NEUMÁTICA**

Para el diseño de una red neumática es necesario tener en cuenta algunas variaciones que se le deben realizar a los datos iniciales, ya que estos datos no cuentan con algunas pérdidas que se van dando en el desarrollo del objetivo final del consumo.

Para el consumo de aire se debe tener en cuenta que aparte de la capacidad requerida se debe tener posibles fugas, incertidumbre en el conteo de los instrumentos, futuros requerimientos, purgas, etc., lo que reduciría el caudal real de requerimiento en un 40 – 50 %. Para el diseño, por lo tanto, se realizará una corrección adicionando a la capacidad requerida un valor que oscile en ese rango de pérdidas.

---

<sup>9</sup> Gas Processors Suppliers Association. Section 13. Compressors and Expanders.

Para la temperatura de operación también hay que adicionar a la temperatura de succión inicial puesto que puede haber elevaciones de temperaturas en tuberías o cambios en la sensibilidad de la temperatura de entrada, para este caso se puede incrementar entre 5 – 10 °C.

En el caso de la presión máxima hay que contar con un factor de seguridad teniendo en cuenta que hay pérdidas o caídas de presión en tuberías, empalmes y otras causas que hacen que la presión final cambie circunstancialmente para este caso en particular la presión de diseño se tomará 1,2 por encima de la presión de descarga final, para cada caso la temperatura no deber exceder entre 130 – 150 °C.

El simulador que se plantea aquí tiene como objetivo que el estudiante (lector) comprenda como se seleccionan los compresores para las redes neumáticas cuando la compresión se realiza en dos etapas, pero en la práctica el número de etapas lo determina la necesidad del sistema en el cual se necesita realizar la compresión y se determina con la ecuación 27, así:

$$R_i = R_c^{1/N} \quad (27)$$

Donde:

N: Número de etapas.

R<sub>i</sub>: relación de presión en la etapa.

R<sub>c</sub>: es la relación de compresión total.

Para un proceso politrópico y con la debida corrección de cada dato se halla la temperatura de descarga que es la que va a representar la temperatura de diseño para el sistema de compresión. Para el programa del simulador se realizan los siguientes parámetros de corrección:

$$T_{succion} = T_{inicial} + 10 [^{\circ}C] \quad (28)$$

$$P_{descarga} = 1.2 * P_{final} \quad (29)$$

$$Capacidad_{diseño} = 1.35 * Capacidad_{inicial} \quad (30)$$

La temperatura de descarga se calcula con la ecuación (31), aun cuando para algunos casos, hay que tener en cuenta una eficiencia según el proceso (En este caso politrópica, ecuación 32) en la Tabla 3 se muestran algunos rangos de eficiencia.

$$T_{descarga} = T_{succion} * R_c^{\left(\frac{k-1}{k}\right)} \quad (31)$$

$$T_{descarga} = T_{succion} * \left(1 + \frac{R_c^{\frac{k-1}{k}} - 1}{E}\right) \quad (32)$$

Tabla 3. Valores estimados de eficiencia a condiciones estándar

| Tipo de compresor                  | Eficiencia (E) |
|------------------------------------|----------------|
| <b>Centrifugo</b>                  | 0,65 – 0,75    |
| <b>Reciprocante Alta Velocidad</b> | 0,65 – 0,75    |
| <b>Reciprocante Baja Velocidad</b> | 0,75 – 0,85    |

Fuente: J. M. CAMPBELL, Gas Conditioning and Processing, Tomo II, pg. 197.

La relación de compresión estará determinada por la ecuación 33:

$$R_c = \frac{P_{descarga}}{P_{succion}} \quad (33)$$

Esa relación de compresión es una relación de la compresión total del sistema y es determinante para señalar cual es el número de etapas que se necesitan.

Una vez identificado el número de etapas se procede a calcular la relación de compresión intermedia para los casos en los que se requieran N número de etapas, así:

$$R_{ci} = R_c^{1/N} \quad (34)$$

Según los fabricantes el número de etapas de compresión debe ser la cantidad de etapas que garanticen temperaturas de descarga en el rango indicado, en cada una de las etapas de compresión del compresor. Variando el número de etapas en la ecuación 34 hasta obtener una relación de compresión  $R_c$  entre 2,5 y 4.

Con el dato de la relación de compresión de la etapa  $R_{ci}$  y con la constante del gas  $K$  (relación de calores específicos) se determina en la gráfica ilustrada en la Figura 22; la curva dada por la constante del gas y el valor de la relación de compresión (líneas rojas) se intersectan como se muestra en el círculo azul; a partir de la intersección se realiza una línea amarilla horizontal hasta el eje donde se determina los BHP/MMPCD.

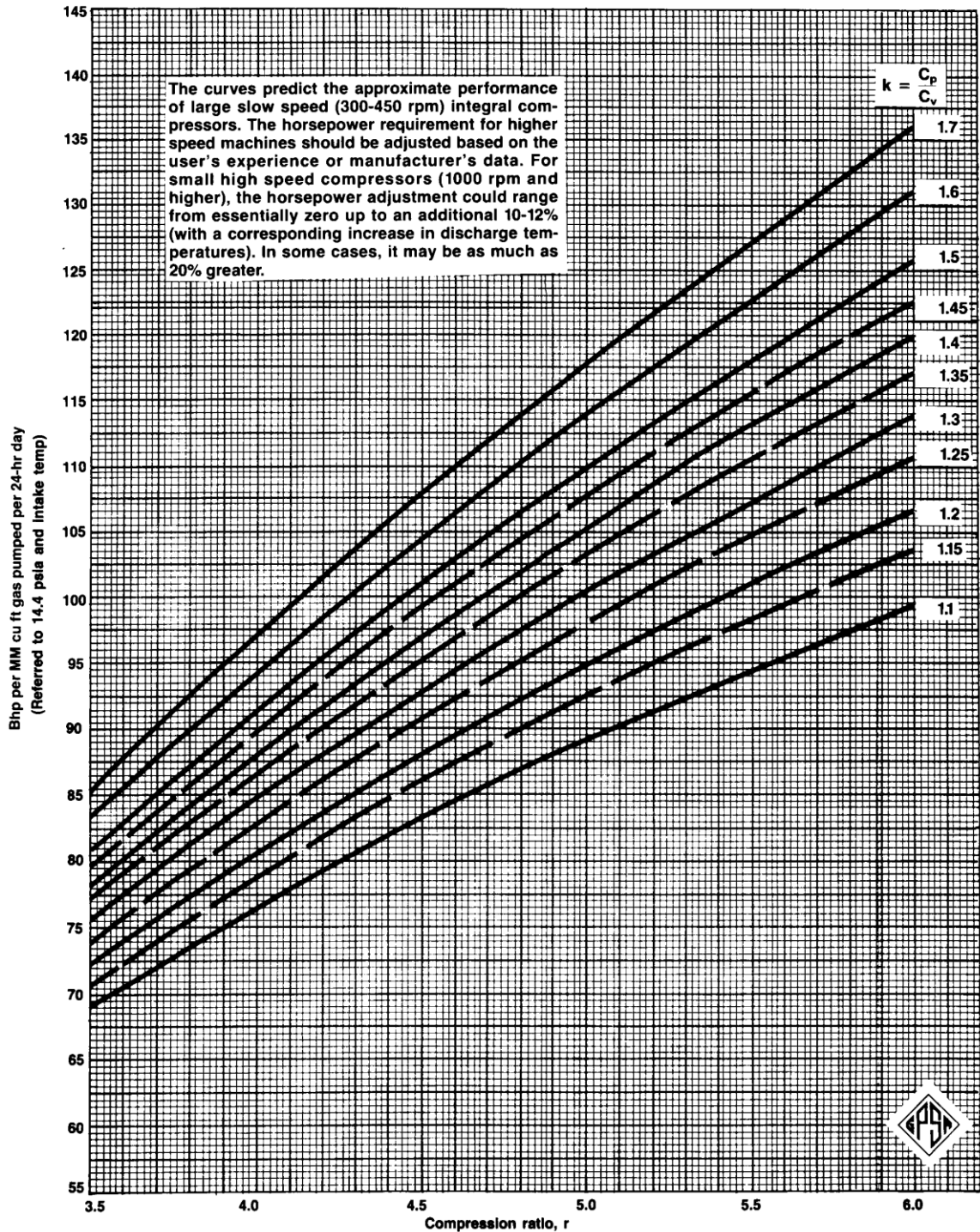
Esta gráfica también se muestra en el panel del programa de simulación. Como la curva está a 14,4 psig se deberá realizar una corrección de presión y temperatura de succión a condiciones estándar.

Figura 22. Curva de la potencia requerida en relación a Rc y K. (Rc= [1-3,5])



Fuente: GPSA. Gas Processors Suppliers Association. Compressors and Expanders. Section 13.

Figura 23. Curva de la potencia requerida en relación a Rc y K. (Rc= [3,5-6])



Fuente: GPPSA. Gas Processors Suppliers Association. Compressors and Expanders. Section 13.

Entonces con el dato de BHP/MMPCD sacado de la gráfica anterior se calcula el número de BHP requerida en cada etapa con la fórmula 35:

$$BHP_{req} = \frac{BHP}{MMPCD} * \frac{Capacidad_{diseño}}{1000000} \quad (35)$$

Con los BHP requeridos se calculan las potencias para cada etapa haciendo la respectiva corrección a condiciones estándar ( $P_{est} = 14,7$  psia y  $T_{est} = 520$  R) para la primera etapa y con la temperatura de succión para la segunda etapa.

Potencia requerida para la primera etapa a condiciones estándar:

$$BHP_{req1} = BHP_{req} * \frac{P_{atm}}{P_{est}} * \frac{T_{atm}}{T_{est}} \quad (36)$$

Potencia requerida para segunda etapa con temperatura de succión 1:

$$BHP_{req2} = BHP_{req} * \frac{P_{atm}}{P_{est}} * \frac{T_{succion}}{T_{est}} \quad (37)$$

La potencia requerida para el sistema total sería entonces la suma de las potencias de todas las etapas:

$$POT_{req} = \sum_1^N BHP_{req} \quad (38)$$

Por último, para la corrección de la determinación de la potencia es necesario agregar entre 10 – 15 BHP que es usado para mover sistemas auxiliares que incurran en el cálculo de la potencia final del sistema.

En el resultado final para las etapas de compresión se dan las temperaturas y presiones en las que se deducen todos los cálculos en este primer proceso.

Presiones:

$$P1 = \text{Succión [PSIA]}$$

$$P2 = P1 * R_{c1} \text{ [PSIA]}$$

$$P3 = P2 - 3 \text{ [PSIA]} *$$

$$P4 = P_{desc} \text{ [PSIA]}$$

\* Perdidas en la tubería y radiador. En los intercambiadores de calor usado para estas redes la caída de presión en generalmente entre 4 y 7 PSI.

Relaciones de compresión:

$$R_{c1-2} = \frac{P2}{P1} \text{ (39)}$$

$$R_{c3-4} = \frac{P4}{P3} \text{ (40)}$$

Temperaturas:

$$T1 = T_{succión} \text{ [R]}$$

$$T2 = T1 * R_{c1-2}^{\left(\frac{k-1}{k}\right)} \text{ [R]} \text{ (41)}$$

$$T4 = T3 * R_{c3-4}^{\left(\frac{k-1}{k}\right)} \text{ [R]} \text{ (42)}$$

La temperatura en cada etapa se estima entre 30 y 50 °C dependiendo del inter enfriamiento.

Las capacidades del sistema de compresión se determinan de la siguiente manera:

Capacidad a condiciones de succión:

$$Capacidad_1 = Capacidad_{diseño} * \frac{P_{atm}}{P1} * \frac{T1}{T_{est}} \left[ \frac{ft^3}{dia} \right] \text{ (43)}$$

$$CFM_{succion} = \frac{Capacidad1}{1440} [ft^3/min]$$

Capacidad de la segunda etapa:

$$Capacidad_2 = Capacidad_{diseño} * \frac{P_{atm}}{P_3} * \frac{T_3}{T_{est}} \left[ \frac{ft^3}{dia} \right] \quad (44)$$

$$CFM_{2etapa} = \frac{Capacidad2}{1440} [ft^3/min]$$

## 5.2. SELECCIÓN DE LOS DIÁMETROS DE LOS CILINDROS

Con la potencia requerida de cada etapa se seleccionan los compresores para las respectivas etapas según sea el caso y a continuación se realiza la selección de los cilindros. De los compresores se obtienen los diámetros de los cilindros, la eficiencia y el volumen de holgura o cualquier dato adicional que requerido.

- **Volumen muerto (holgura):** el pistón de un compresor reciprocante no viaja hasta el final del cilindro; cuando el pistón se encuentra al final de su carrera; este espacio, se denomina volumen muerto y se expresa como un porcentaje entre el volumen muerto total y el volumen total barrido por el pistón. Puede asumirse en 20% para un cálculo previo y ajustarse con el valor real indicado por el fabricante del cilindro <sup>10</sup>

$$\%C = \frac{Volumen\ muerto\ total}{Volumen\ barrido\ piston} \quad (45)$$

- **Eficiencia volumétrica:** esta eficiencia es el desplazamiento real de su cilindro comparado con la capacidad si no existiera el volumen muerto. Según Bloch<sup>11</sup> la eficiencia volumétrica se puede expresar como un porcentaje del proceso politrópico y se expresa con la siguiente ecuación:

<sup>10</sup> LIRA, Román. Compresores Reciprocantes. Universidad experimental Rafael María Baralt. Maracaibo, 2007. p, 25.

<sup>11</sup> BLOCH, Heinz P, Majumdar, S. R., op. cit., p. 43

$$\eta_v = 100 - Rc - C * (Rc^{\frac{1}{k}} - 1) \quad (46)$$

Con la eficiencia del cilindro y con la ecuación de la capacidad ideal se despeja el diámetro del cilindro<sup>12</sup>.

$$Q_{ideal}[CFM] = \frac{STROKE * W * (2 * Dp^2 - Dr^2) * \pi}{4 * 1728 \left[ \frac{ft^3}{in^3} \right]} \quad (47)$$

Stroke: carrera o desplazamiento del pistón [IN]

Dp: Diámetro del pistón [IN]

Dr: Diámetro del rodillo o barra [IN]

W: Velocidad de rotación en revoluciones por minuto del compresor [RPM]

Donde la carrera (STROKE) la determina el fabricante del compresor después de su elección de acuerdo a las necesidades de potencia junto con las revoluciones. Con el cálculo de ese diámetro se procede a escoger según el tipo de compresor que se eligió los diámetros según el fabricante y se corrige el porcentaje de holgura que se supuso para los cálculos.

Hay otro método para escoger el diámetro según el fabricante y es hallando una relación de la capacidad con la eficiencia volumétrica dadas en CFM e ir al catálogo buscando un diámetro que coincida con esa capacidad, con el cual también se dará el porcentaje de holgura. Para el simulador se elegirá la primera opción debido a que le da al estudiante una idea más clara de cuál es el diámetro que más se aproxime al que se necesita.

Por último, hay que verificar las cargas de la barra, para evaluar si los cilindros elegidos cumplen con las condiciones de cargas necesarias para el funcionamiento.

---

<sup>12</sup> LIRA, Román, op. cit., p. 26.

Estas cargas, corresponden a las fuerzas a compresión y tensión aplicadas y son proporcionales a la fuerza estática y a las cargas de inercia sobre los componentes del compresor, tales como: cigüeñal, barras de conexión, barra del pistón y el área proyectada de los cojinetes del cilindro; en ninguna circunstancia, las cargas aplicadas pueden exceder las admisibles.<sup>13</sup>

Las cargas de compresión aplicadas en el cilindro se determinan así:

$$Lc = Ap * Pd - Ac * Ps \quad (48)$$

Cargas de tensión aplicadas en el cilindro:

$$Lt = Ac * Pd - Ap * Ps \quad (49)$$

Donde:

Ac: Efectiva área (área del pistón – área de la barra)

Ap: Área del pistón

### **5.3. PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DEL SIMULADOR DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN DE DOS ETAPAS.**

Para este caso en particular en el que el propósito es realizar una simulación de dos etapas únicamente, no se buscará el número de etapas requeridas y este paso se pasara por alto, pero de no ser así los pasos serían los siguientes:

- 1) Calcular el número de etapas:** ajustar los datos según las correcciones hechas en el ítem 5.1., calcular la relación de compresión y temperatura de descarga.

---

<sup>13</sup> LIRA, Román. Compresores Reciprocantes. Universidad experimental Rafael María Baralt. Maracaibo, 2007. p, 26.

- 2) **Calcular la potencia requerida:** para esto el estudiante tendrá que proporcionar un dato de una gráfica donde se relaciona la potencia en función de la capacidad.
- 3) **Escoger compresores según la potencia en catálogos de fabricantes:** el compresor deberá cumplir con las necesidades de potencia necesarias para la compresión.
- 4) **Dimensionar los cilindros de compresión:** con la capacidad en cada etapa se calcula la eficiencia volumétrica con un porcentaje de holgura asumido para luego corregirlo. Con la capacidad ideal y los datos especificados del compresor se calcula el diámetro aproximado del cilindro. Se debe seleccionar de la ficha técnica del compresor los diámetros que se ajusten a los calculados.

#### **5.4. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DEL SIMULADOR DE SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN EN 2 ETAPAS POR MEDIO DE DIAGRAMA DE FLUJO**

El inicio del diagrama de flujo se realiza con la introducción de los valores para determinar la red neumática, presiones, temperaturas y capacidad volumétrica, el cual el practicante debe introducir, se ingresan las variables propias del aire a condiciones estándares, y el primer cuadro de operación calcula la temperatura de descarga y la relación de compresión, luego, se imprimen estos valores para que el practicante introduzca el valor de potencia.

En el cuadro de operación 2 se calcula la potencia requerida total, y en cada etapa para luego imprimir los valores, el practicante tiene que introducir los valores de porcentaje de claro del compresor elegido, la carrera y la velocidad de rotación a la cual trabaja, entonces en el cuadro de operación tres se calculan los diámetros, los porcentajes de eficiencia volumétrica y los flujos de cada compresor.

Por último, el programa imprime una tabla que muestra los estados finales de la red neumática (presiones y temperaturas), las potencias de cada compresor, los diámetros y los flujos de aire, así como también imprime de cuantos cilindros son los compresores.

Figura 24. Diagrama de flujo del simulador de la red neumática

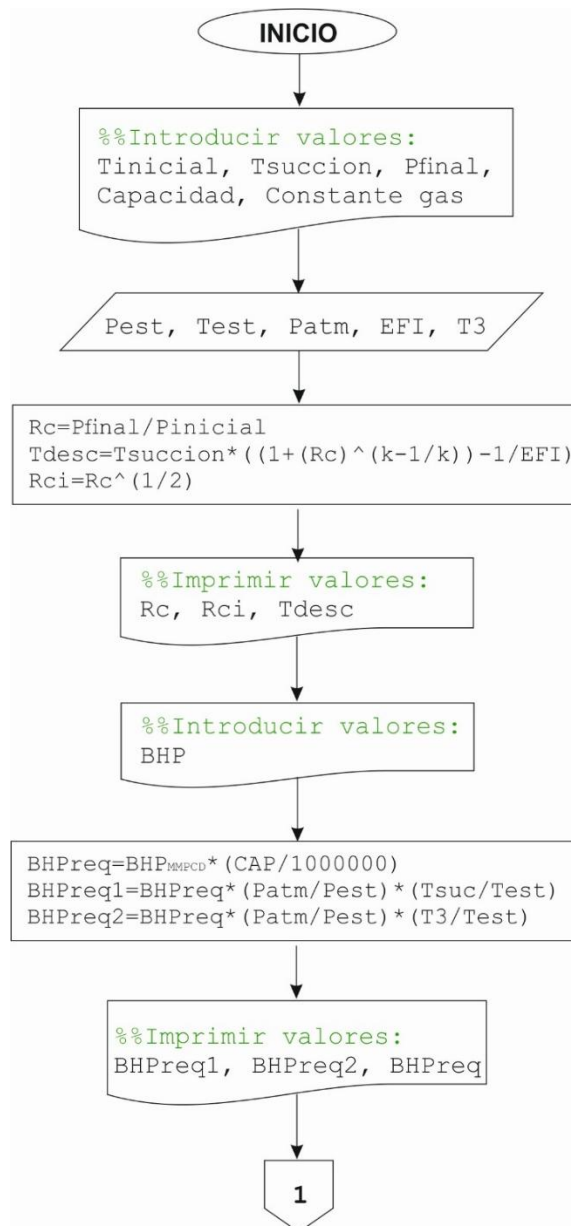
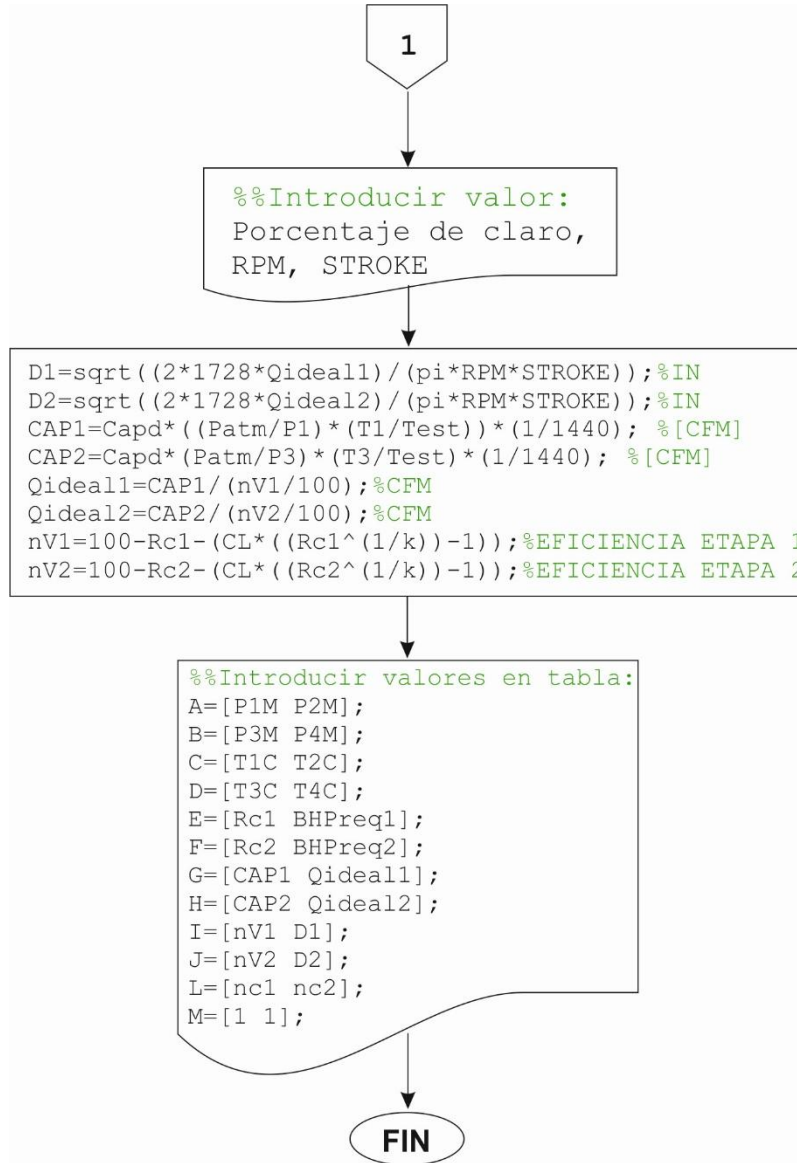


Figura 25. Diagrama de flujo del simulador de la red neumática



## **5.5. INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR DE LA SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN EN DOS ETAPAS**

El simulador cuenta con 3 divisiones; en la primera parte se encuentra el panel donde se ingresan los datos paso a paso, en el segundo panel se encuentra una gráfica de la cual se deberá extraer un dato dependiendo de la primera fase de cálculos y en el tercer panel se muestra una tabla que imprime los datos finales de operación y diseño. Ver Figura 26.

El simulador fue diseñado para que el estudiante interactúe con la forma de seleccionar el sistema de compresión puesto que el cálculo es escalonado y deberá tener un criterio claro al momento de seleccionar el compresor y los diámetros del mismo.

El primer botón que está en el panel de datos iniciales, calcula las variables del panel de relación de compresión, para el segundo botón se ingresa el dato de la curva según las dos variables indicadas, la curva se puede ampliar para poder apreciar la gráfica de potencia de freno y para el tercer botón se calculan los diámetros de los cilindros para cada compresor. En el Anexo A se explica cómo se usa esta plataforma.

El simulador esta diseñado para seleccionar una red neumática en solo dos etapas, para esto entonces se debe tener en cuenta en el diseño que la temperatura de descarga final de la segunda etapa no supere los 150°C, de lo contrario las especificaciones de diseño son para una red de más etapas.

Figura 26. Figura del simulador que selecciona la red neumática, los compresores y cilindros

### Selección de compresores para un sistema de compresión de 2 etapas

**Datos iniciales**

P inicial:  [PSI]      K:

P final:  [PSI]      T inicial:  [°C]

Capacidad:  [MMSCFD]     

---

**Relaciones de compresión**

T descarga:  [°C]

Rc:       Rci:

---

**Potencia requerida**

Con R y Rci, hallar en la curva BHP/mmSCFD

BHP/MMSCFD:      

BHP1:       BHP2:       BHPT:

---

**Datos del compresor de catálogo**

%CL:       RPM:

STROKE:  [IN]     

---

**Diámetros de los cilindros de 1º y 2º etapa**

D1:  [IN]

D2:  [IN]

Escoger diámetros en el catálogo

**Curva de la potencia por cada millón de pies cúbicos día**  
(Referencia: 14 PSIA, 520 °R)

**Resultados**

|                     | 1era Etapa | 2da Etapa |
|---------------------|------------|-----------|
| Presión Ent [PSI]   | 15         | 67.2747   |
| Presión Sal [PSI]   | 72.2747    | 200       |
| Temperatura Ent [C] | 30         | 40        |
| Temperatura Sal [C] | 127.7845   | 133.0939  |
| Rel Compresión      | 2.9284     | 3.1071    |
| Potencia Req [BHP]  | 279.0173   | 279.0173  |
| Caudal Actual [CFM] | 2.0131e+03 | 729.3848  |
| Caudal Ideal [CFM]  | 2.0785e+03 | 754.5898  |
| Eficiencia Vol      | 96.8543    | 96.8571   |
| D Cilindro [IN]     | 20.8692    | 12.5744   |
| Num Cilindros       | 4          | 1         |
| Compresor           | 1          | 1         |

Laboratorio de Maquinas Térmicas Alternativas  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Universidad Industrial de Santander

Fuente: GPSA. Gas Processors Suppliers Association. Compressors and Expanders. Section 13

87

## 6. MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN EN DOS ETAPAS

Como se especificó en el ítem 3.1.4 el estado de los componentes y el banco en general no es muy bueno, además es necesario mejorar las debilidades del mismo, a continuación, se muestra como se procedió para las mejoras.

### 6.1. DESARTICULACIÓN DEL BANCO

Para realizar el mantenimiento fue necesario desarmar completamente el banco. En la Figura 27 se observan algunas etapas del desmantelamiento, separando parte por parte el aparato, seguido esto se mejoró de la siguiente manera:

Figura 27. Desmantelamiento del banco



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

### 6.1.1. Reparación y mantenimiento de las partes del banco de compresión

**Motor eléctrico:** el motor eléctrico, en la etapa de diagnóstico se determinó en buen estado. En el desmontaje se le hizo una revisión según el manual para motores trifásicos de jaula.<sup>14</sup> Para realizar un mantenimiento profundo a los motores trifásicos es necesario, desensamblarlo, revisar rodamientos, realizar una prueba de resistencia de aislamiento, análisis de fallas y pruebas de funcionamiento, pero en este caso en particular, el motor no cumple con las horas máximas para realizar este tipo de mantenimiento.

El tiempo de operación del motor no supera las 500 horas de servicio, debido a que el banco está en funcionamiento aproximadamente 50 horas año, aunque, si se realizó la primera inspección, como se muestra en la tabla para 500 horas de servicio.

Cuadro 6. Relación para mantenimiento de los motores trifásicos

| ¿Qué hacer?                      | Periodo de tiempo                          | Plazos                           |
|----------------------------------|--|----------------------------------|
| Primera inspección               | Después de aproximadamente 500 horas       | Como máximo después de medio año |
| Control de los conductos de aire | Según el grado de contaminación local      |                                  |
| Lubricación                      | Ver especificaciones en la placa del motor |                                  |
| Inspección principal             | Aproximadamente 10.000 horas de servicio   | Una vez al año                   |
| Descarga de agua condensada      | Según las condiciones climáticas           |                                  |

Fuente: VEM. Instrucciones de montaje, manejo y mantenimiento. Motores trifásicos asíncronos para baja tensión con rotor de jaula. Edición 6. 2015. p. 9.

<sup>14</sup> VEM. Instrucciones de montajes, manejo y mantenimiento. Motores trifásicos asíncronos para baja tensión con rotor de jaula. Edición 6. 2015.

La primera inspección se realiza con la máquina parada, se verifica que el motor no tenga fisuras u otros daños. Se verificó al desmontar que los tornillos del motor estaban sueltos y con el motor puesto en marcha antes de desmontar se comprobó que los ruidos no fueran excesivos y que la temperatura superficial no fuera excesiva. A las conexiones eléctricas se le hicieron una revisión para determinar y asegurar que estaban en buen estado.

Como valor agregado final se le hizo una limpieza superficial y se retoco antes de instalarlo y realizar un ajuste y apriete del motor a la placa de instalación del banco. Como se observa en la Figura 28.

Figura 28. Mantenimiento al motor trifásico



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

**Estructura del banco:** la estructura tenía la pintura desgastada y corroída y la tabla del panel de control la madera soplada (MDF aserrín comprimido) al igual que las cajas de control puestas encima del banco; el banco se pulió y pinto con varias capas del mismo color, la madera se cambió por una de mayor grosor forrada en fórmica resistente a los fluidos que se pongan en contacto con la tabla, las ruedas

se cambiaron por unas ruedas de mayor resistencia al peso. Ver Figura 29. Como se indica en el ítem 6.1.2.

Figura 29. Estructura del banco



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

**Placa de montaje de los compresores:** cuando se desmontaron los compresores y el motor se descubrió que la placa estaba oxidada, debido a la humedad de las instalaciones del laboratorio o al derrame del aceite de los componentes, se lijo, pulió y se le aplicó unas capas de anticorrosivo y una capa de pintura gris protectora como se aprecia en la Figura 30.

Figura 30. Placa de montaje

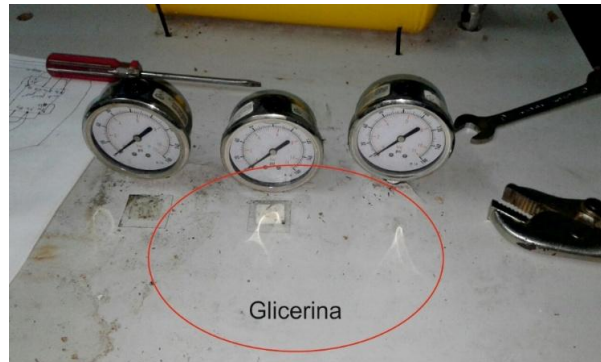


Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

**Manómetros:** como se indicó en el diagnóstico los manómetros perdieron líquido (Ver Figura 31) debido a los traslados. Para su mantenimiento se realizó el llenado con glicerina de acuerdo al procedimiento aconsejado por el distribuidor, así:

- Instalarlo en posición vertical.
- Abrir el tapón.
- Llenar el manómetro, se recomienda que la temperatura ambiente este entre 20 a 29 °C.
- Llenar hasta aproximadamente 90 – 95% del volumen.
- Dejar respirar el manómetro.
- Colocar el tapón.
- Secar la superficie.
- Instalar.

Figura 31. Manómetros sobre el panel lleno de glicerina



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

**Radiador:** al radiador se le realizó limpieza, se inspeccionaron los cables del ventilador y se instaló con remaches y tornillos para mayor seguridad y evitar transferir vibraciones al cuerpo en general. Ver Figura 32.

Figura 32. Radiador, parte trasera del banco




Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

**Compresores:** para ambos compresores se determinó que el único problema que presentaron al momento de la revisión fue el aceite emulsionado, de igual manera

se recurrió a las recomendaciones del fabricante expuestas en la Figura 33 para realizar un mantenimiento inicial debido a que cuenta con pocas horas de funcionamiento.

Figura 33. Operación de lubricación y mantenimiento, Grupo KTC

**Manual de Usuario Compresores de Aire** 

**OPERACIÓN DE LUBRICACIÓN Y MANTENIMIENTO**

1. Por favor revise los documentos técnicos cuidadosamente después de abrir el cárter (los documentos incluyen el manual de introducción y el certificado calificado). Revise que las partes de repuesto sean correctas y confirme que el compresor esté en buenas condiciones.
2. Retire el medidor de aceite, llene con aceite lubricante de máquinas N32 a través del orificio de aceite hasta el nivel estipulado en invierno. En verano utilice aceite lubricante de maquinaria N68. Luego inserte nuevamente el medidor de aceite. Conecte el cable de energía y opere el compresor sin carga, revise el funcionamiento.
3. Conecte las herramientas neumáticas, arranque el compresor y luego podrá utilizar las herramientas. Nota: el compresor deberá arrancarse sin ninguna presión de trabajo.
4. El compresor utiliza aceite lubricante de maquinaria. Por favor cargue aceite antes de la operación. Durante la operación la temperatura del aceite deberá estar por debajo de los 70°C (utilice N32 en invierno y N68 en verano).
5. Después de 500 horas de operación, reemplace el aceite y desensamble la tapa del cárter, elimine el aceite viejo y limpie las partes sucias. Luego reinstale la tapa del cárter y administre aceite nuevo.
6. Usualmente limpie el filtro de aire una vez a la semana.
7. Después de 16 horas de operación abra la llave debajo del tanque, drene el agua del tanque. Limpie el tanque cada seis meses.
8. Después de cada uso, apague el equipo, drene toda la presión del tanque.
9. Realícele mantenimiento al compresor normalmente, desensamble el compresor. Luego utilizando petróleo liviano, como gasolina, limpie todas las partes y séquelas durante el ensamblaje, unte grasa en las partes de contacto. Si es necesario repare o reemplace las partes desgastadas. Ensamble y ajuste las partes correctamente. Nota: las unidades eléctricas deberán aterrizarse correctamente.
10. Si el compresor deja de utilizarse durante un periodo largo, las válvulas de aire y las superficies de contacto deberán limpiarse y engrasarse.

Se filtró todo el aceite dañado y se reemplazó completamente, por el Aceite Hidráulico Sintético Ravenol. También se retiró el cárter de los dos compresores y se desechó el aceite depositado (Ver Figura 34), se limpiaron las partes y los filtros

de aire. Aunque en la Figura 33 se recomienda desensamblar la máquina completa en este caso el mantenimiento se realizó teniendo en cuenta las mismas horas de operación consideradas en el motor eléctrico dejando unos compresores limpios, listos y retocados. Ver Figura 35.

Figura 34. Drenaje de los compresores y reemplazo de aceite



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

Figura 35. Compresores después del mantenimiento



### 6.1.2. Cambios, correcciones y mejoras generales del banco de pruebas.

Además de lo que se le realizó al banco descrito en el ítem anterior, se fueron corrigiendo algunos aspectos del banco.

**Tornillos y tuercas:** El motor y el compresor de baja al momento de desinstalarlos estaban sueltos, desajustados de la placa, se comprobó que los tornillos usados no eran los apropiados y que no contaban con el accesorio de apreté adecuado, ya que los compresores recíprocos están sujetos a grandes niveles de vibración por su esencia, y este tipo de tuercas, que se emplearon no coincidían en tamaño al tornillo ni tenía ningún seguro para evitar que se desajustaran, además los tornillos estaban oxidados (ver Figura 36); por lo tanto se cambiaron por unos tornillos que se ajustan a las capacidades de carga y las tuercas, son de seguridad, ver Figura 36 que están diseñadas para resistir las fuerzas que ocasionan el desajuste y son especiales para usar en situaciones de grandes vibraciones y pueden ser utilizadas múltiples veces sin perder su efectividad.

Figura 36. Tornillos reemplazados



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

Figura 37. Tuercas y tornillos de reemplazo



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

**Ruedas de seguridad:** Las ruedas estaban desgastadas y algunas estaban dañadas, debido al traslado probablemente, además hacían falta dos llantas, ver Figura 38, se reemplazaron por unas nuevas según el peso del banco (aproximadamente 110 Kg) y además unas de las ruedas son de freno, puesto que el movimiento del banco amerita que se disponga de un dispositivo de seguridad para que no se desplace libre el banco por las instalaciones del laboratorio.

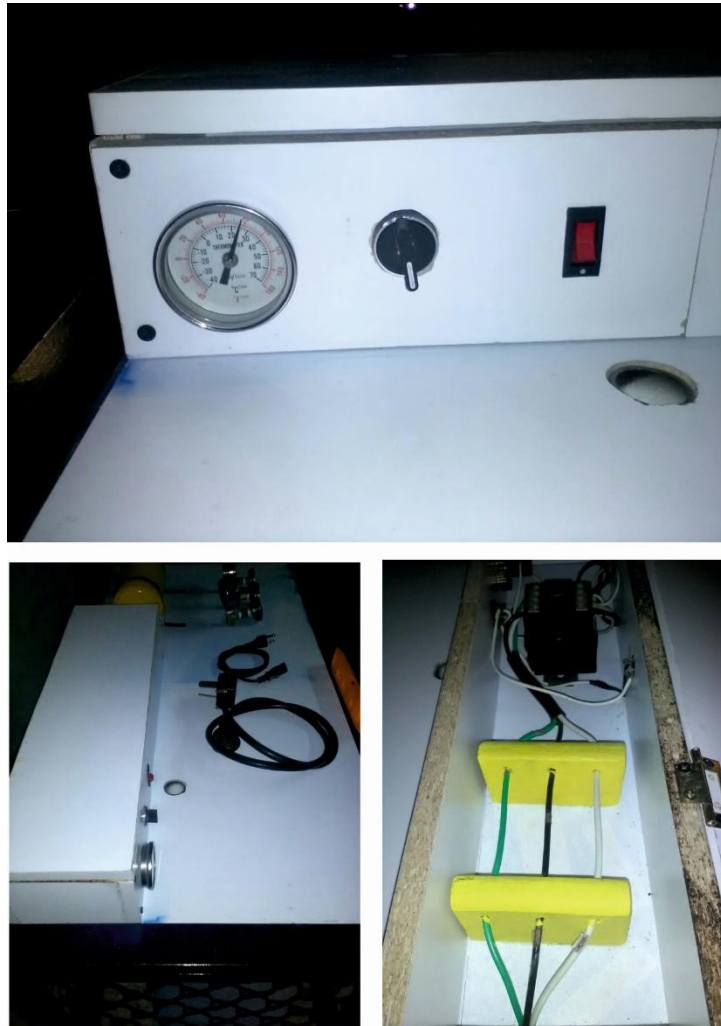
Figura 38. Ruedas dañadas y de seguridad de la estructura



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

**Panel para cableado eléctrico:** Los cables del motor expuestos en el panel de operación tienen una raspadura en los cables que sirven para conectar la pinza piezoeléctrica para tomar los datos necesarios para realizar la práctica, para que el estudiante no tenga peligro de contacto con los cables. Junto a la caja botonera, se instaló una caja protectora que se destapa solo en el caso de toma de datos como se aprecia en la Figura 39

Figura 39. Caja protectora del cableado del motor trifásico



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

**Medidores.** Para seguridad del operario se decidió trasladar los medidores que estaban instalados sobre los compresores, sobre la tabla de operación tal y como se ilustra en la Figura 40. Se determinó que no afecta drásticamente el traslado en el cambio de temperatura, debido a que las longitudes de las mangueras no superan los 40 cm de largo y las pérdidas de temperatura no son considerables. Se sustenta esta hipótesis con las pruebas experimentales mostradas en la Tabla 4 de donde se concluye que las pérdidas y el cambio de temperatura es de 1 °C aproximadamente. Corrección que se aconseja realizar en los laboratorios.

Figura 40. Medidores instalados finalmente.



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

Tabla 4. Toma de temperatura en los puntos 2, 3 y 4.

|                  | Termómetro 2 [C] | Termómetro 3 [C] | Termómetro 4 [C] |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>Variación</b> | Ta-Td            | Ta-Td            | Ta-Td            |
| <b>Prueba 1</b>  | 1                | 1                | 1                |
| <b>Prueba 2</b>  | 0                | 1                | 2                |
| <b>Prueba 3</b>  | 2                | 0                | 1                |
| <b>Prueba 4</b>  | 1                | 1                | 0                |
| <b>Promedio</b>  | 1                | 0.75             | 1                |

Ta: Temperatura de los termómetros instalado arriba de la mesa.

Td: Temperatura de los termómetros instalados bajo la mesa, encima de los compresores.

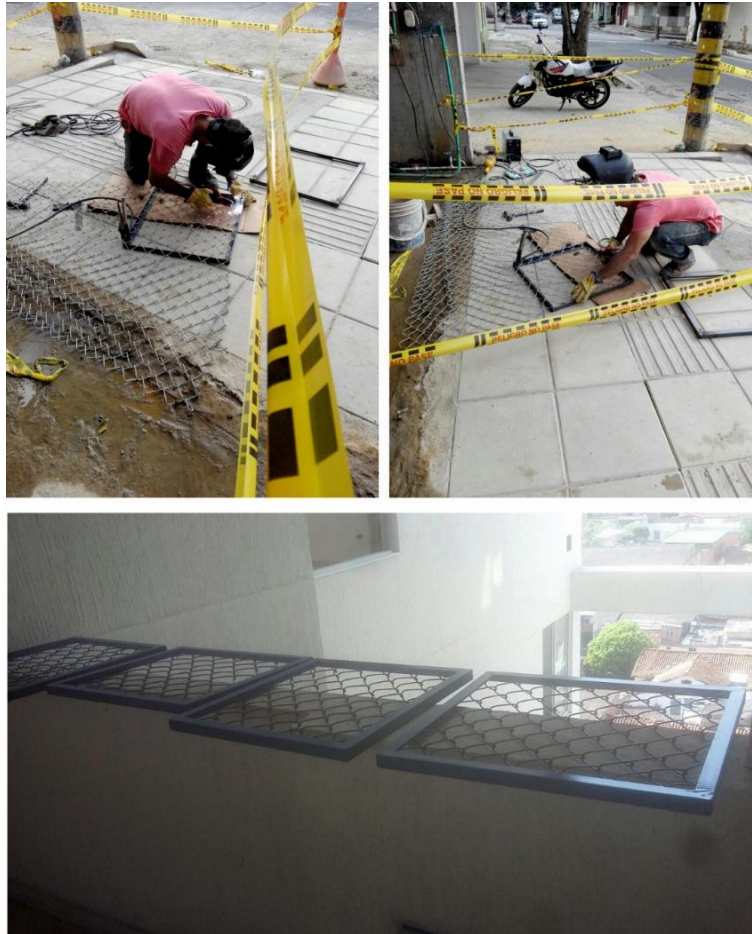
En la Tabla 4 se muestran los resultados de la prueba que se le realizo a los 3 medidores de temperatura a la salida de los compresores y el radiador, variando la presión en 4 pruebas, la variación es la diferencia que existe entre la temperatura tomada con los termómetros instalados encima de los compresores y la temperatura tomada con los termómetros instalados encima de la mesa. se recomienda aumentar 2° C en los estados (2) salida de primera etapa, (3) entrada a la segunda etapa y (4) salida de segunda etapa.

## **6.2. IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE SEGURIDAD PARA EL BANCO DE PRUEBAS**

Para la manipulación del banco es necesario ejecutar un modelo que permita aumentar el grado de seguridad del operario del banco, para esto se realizaron las siguientes estrategias:

**6.2.1. Instalación de una malla de seguridad.** Con el propósito de proteger el operario de quemaduras o del movimiento del sistema de transmisión, se instaló una reja alrededor del banco como se muestra en la Figura 41, la reja en la parte delantera tiene un sistema de puertas que permitan la manipulación de los compresores, poleas y correas para los respectivos cambios en las distintas prácticas,

Figura 41. Instalación de la reja protectora del banco



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

Para la reja se usó malla eslabonada soldada con varilla eléctrica 6013, se instaló malla fija para los laterales y la parte trasera y dos puertas de acceso principal para poder realizar el respectivo mantenimiento y manipulación con argollas de seguridad.

Figura 42. Enrejado del banco final



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

**6.2.2. Dispositivos para la protección personal del operario.** A parte de los protocolos de seguridad instalados para que el operario del banco no tenga ningún riesgo cuando la máquina esté operando, se dejara a su disposición unas gafas de seguridad para proteger los ojos, y unos protectores auditivos tapa oídos para aliviar del ruido excesivo que puede producir los compresores, ver Figura 43.

Figura 43. Dispositivos de seguridad



**6.2.3. Etiquetado del banco.** En el panel de cableado eléctrico se instaló una señal de alerta del riesgo eléctrico que existe en esa instalación Figura 44, con el fin que el operario tenga presente y especial cuidado con las conexiones eléctricas.

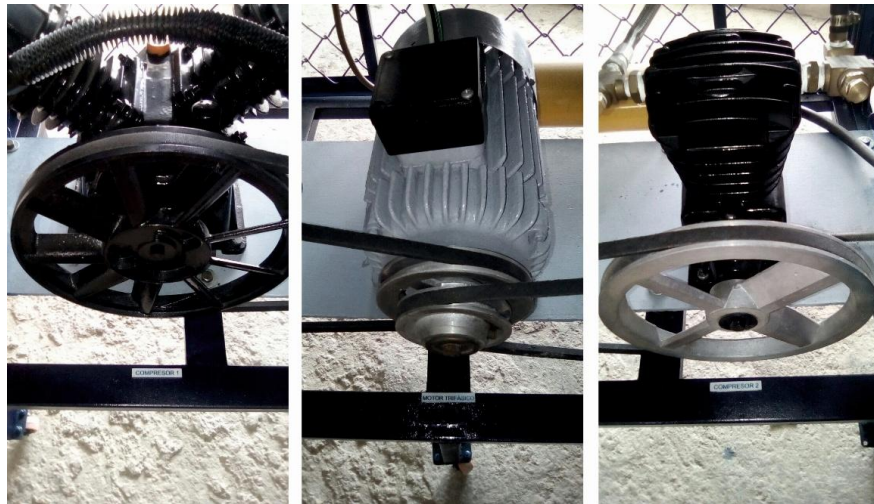
Figura 44. Panel de cableado con placa de seguridad



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

Además, se etiquetaron los 3 componentes principales, compresores y motor eléctrico, como se muestra en la Figura 45. También los puntos de los que se van a adquirir los datos, como se explicó en el ítem 4.1, justo debajo de los medidores se instalaron como se muestra en la Figura 46.

Figura 45. Etiquetas de los compresores y motor eléctrico.



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

Figura 46. Etiquetas de los puntos de toma de datos.



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

En el panel de cableado se especifica con una etiqueta cuales son los interruptores para cada encendido, siendo, motor y ventilador respectivamente como se muestra en la Figura 47.

Figura 47. Etiquetas de los botones de encendido/apagado.



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

Por último, se instalan 2 placas, uno para etiquetar el banco y el otro con una descripción gráfica del banco, se especifica cada punto de instalación de los medidores, como se muestra en la Figura 48.

Figura 48. Etiquetas para marcar e identificar el banco.



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

**6.2.4. Herramienta útil para el uso, manejo y mantenimiento del banco.** Bajo la mesa de trabajo se instaló una gaveta la cual se deja para uso del banco en el que se guardan los siguientes objetos:

- **Nivel (instrumento):** Para evitar aumentar los factores que incurran en las vibraciones se dispone de un nivel para que el operario pueda ubicar el banco de manera apropiada para su funcionamiento.
- **Manual de funcionamiento y mantenimiento:** en el cajón se deja el manual impreso que se expone en el Anexo B en el que se exponen los componentes del banco, como se realiza el encendido y apagado y el mantenimiento de cada componente.
- **CD del banco:** en el CD se encuentra el manual en formato digital, las prácticas del banco para el laboratorio de máquinas terminas alternativas, los programas elaborados para las prácticas y una recopilación en formato digital pdf de algunos catálogos de fabricantes de compresores recíprocos.
- **Dispositivos de protección del operario.**

### **6.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES DEL BANCO**

En la actualidad, una de las técnicas más utilizadas para el mantenimiento predictivo de máquinas es el análisis de vibraciones mecánicas; esto se debe a su facilidad de implementación, es un excelente indicador del estado de funcionamiento de los componentes del banco y es un proceso que no requiere interrumpir el normal funcionamiento del mismo. Debido a la presencia de vibraciones excesivas en el funcionamiento del banco se decidió realizar un análisis de vibraciones.

En primer lugar, se realizó un diagnóstico del equipo, estimando los posibles daños que ocurren a través de la medición y el análisis de su comportamiento vibratorio. En segundo lugar, de acuerdo a los resultados, se procederá a hacer las adecuaciones pertinentes, teniendo en cuenta factores mecánicos presentes con el

objetivo de proveer un mayor amortiguamiento a la estructura y repercutiendo en una disminución de las vibraciones presentes en el banco.

Finalmente, se llevará a cabo una medición concluyente, con el fin de establecer el grado de mejoría del equipo, en términos de la conducta vibratoria referenciando la norma ISO 10816 que trata acerca de la evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas.

**6.3.1. Componentes principales para el análisis.** Se procede a realizar el análisis de vibraciones mecánicas a los componentes del banco que presentan un mayor grado de vibración e inciden en la transmisión de la vibración a sus componentes adyacentes los cuales son:

- Motor trifásico de 3 Hp (elemento No 3)
- Compresor Primera Etapa (elemento No 2)
- Compresor de Segunda Etapa (elemento No 1)

**Motor trifásico de 3 Hp:**

Se cuenta con un motor de 3 HP, con una velocidad de giro de 1730 RPM, alimentado con una fuente de 220 voltios y frecuencia de línea igual a 60 Hz, tal como se muestra en la Tabla 5.

Considerando la velocidad de giro: 1730 RPM = 28,83 Hz

Tabla 5. Datos técnicos nominales del motor trifásico

|                       |      |                       |       |
|-----------------------|------|-----------------------|-------|
| hp                    | 3    | Factor de potencia    | 0,82  |
| kw                    | 2.2  | Velocidad nominal rpm | 1730  |
| F.s                   | 1,15 | Torque nominal Nm     | 12,86 |
| Corriente nominal [A] | 9,6  | Peso Kg               | 22    |
| Eficiencia            | 74,6 |                       |       |

Fuente: Catalogo Siemens

**Compresor Primera Etapa:**

Compresor Bicilindrico de marca KTC cuyas especificaciones técnicas son, 3 HP de potencia de entrada al compresor por medio de una banda acoplada a una polea de diámetro 10,5 pulgadas, con una velocidad de 800 RPM. (Ver ficha técnica Tabla 5, pg. 62).

**Compresor Segunda Etapa:**

Se utiliza un compresor monocilindrico modelo 1065A de la marca KTC con especificaciones técnicas con una velocidad de 1250 RPM y 1 HP de potencia.

**Poleas Conductoras:**

Poleas acopladas al eje del motor que se utilizan para variar las relaciones de velocidad a transmitir con el compresor de primer y segunda etapa, a continuación, se especifica las relaciones de velocidad:

Figura 49. Poleas acopladas al eje y a los compresores



Fuente: Laboratorio de Maquinas Alternativas (LMTA). Salón 156 Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

En la Tabla 6 se muestran las velocidades del compresor de segunda etapa, con el acople de las poleas, se varia el compresor de segunda etapa debido a que tienen un menor tamaño y mayor facilidad para desmontarlas.

Tabla 6. Relaciones de velocidad obtenidas con las poleas

| Velocidad del motor. | ∅ polea conductora compresor 1 <sup>ra</sup> etapa | Velocidad compresor 1 <sup>ra</sup> etapa (∅ polea 10,5 in) | ∅ polea conductora compresor 2 <sup>da</sup> etapa | Velocidad compresor 2 <sup>da</sup> etapa (∅ polea 10 in) |
|----------------------|--|---|--|---|
| 1730 RPM             | 5,5 in   | 906 RPM   | 3 in   | 519 RPM   |
|                      |  |   | 3,5 in   | 606 RPM   |
|                      |  |   | 4 in   | 692 RPM   |
|                      |  |   | 4,5 in   | 789 RPM   |
|                      |  |   | 5 in   | 865 RPM   |

### 6.3.2. Relación de adquisición de datos para determinar el grado de severidad de las vibraciones

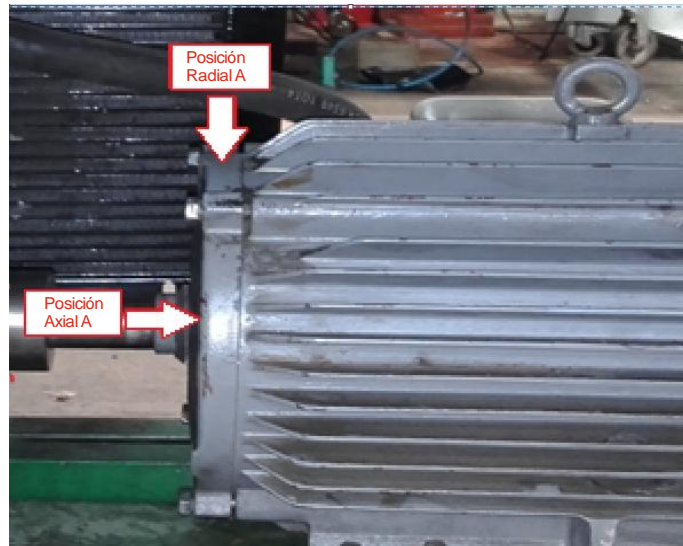
**Equipo y sensores utilizados en la adquisición de Datos:** Teniendo en cuenta lo anterior, se dispuso a realizar el análisis de vibraciones del sistema, para ello se utilizó los siguientes implementos:

- Acelerómetro PCB-352C33.
- Tarjeta de adquisición de datos NI 9234
- Computador y software LabView

A partir de ello, se creó una interfaz en LabView que permite realizar la adquisición de datos de vibraciones mecánicas en el dominio del tiempo y los transforma en el dominio de la frecuencia. Donde este espectro de frecuencia es el que se utiliza para los respectivos análisis.

**Análisis Motor Eléctrico Siemens:** Se montó el acelerómetro en la posición radial A y posición Axial A sobre la carcasa del motor, como se ve en la Figura 50. Ubicación sensor aceleración sobre motor eléctrico

Figura 50. Ubicación sensor aceleración sobre motor eléctrico



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

Tanto para la realización de la toma de datos del motor en un estado de alto nivel de vibraciones, como en un estado de operación con un menor nivel de vibraciones después de las adecuaciones, el acelerómetro se ubicó en las mismas posiciones y de ésta forma obtener un análisis más preciso.

Con la ayuda de la interfaz se obtuvo un estado vibratorio del sistema, evidenciado en los distintos espectros de frecuencia

Los datos para el análisis de vibraciones fueron:

- Frecuencia de giro del motor: 28,83 Hz
- Frecuencia de línea:  $F_L = 60 \text{ Hz}$

Figura 51. Análisis velocidad sensor ubicado en la posición radial A

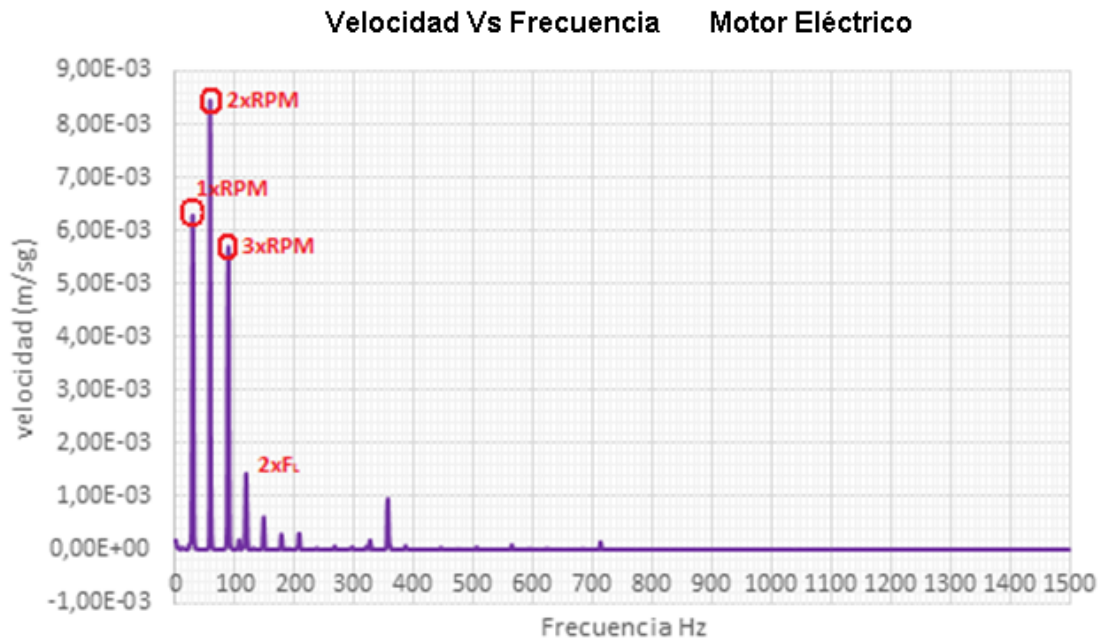
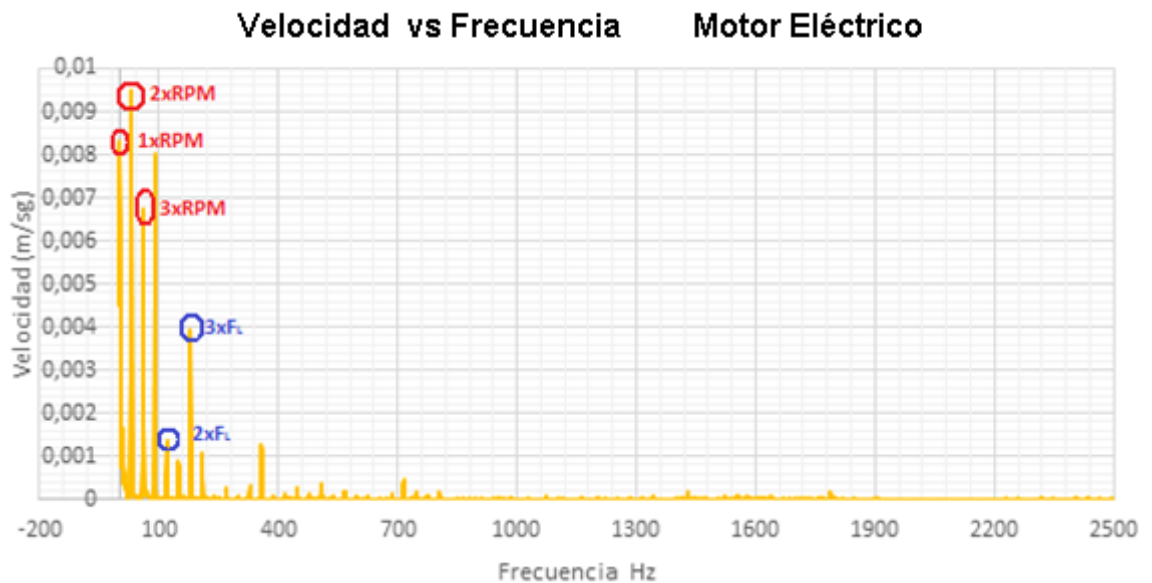


Figura 52. Análisis velocidad sensor ubicado en la posición axial A



### **Análisis de Espectro:**

- Se puede observar la existencia de altos picos a 1x, 2x, 3xRPM, en las distintas posiciones (radial y axial) indicando a priori un problema de desalineamiento tanto paralelo como angular.
- Al encontrarse un alto pico a 1xRPM, en los distintos espectros de frecuencia, podría presentarse un problema debido a desbalanceo.
- Así mismo en el espectro de frecuencia los datos tomados en posición radial y axial se encuentran picos (no muy altos) a  $2 F_L$  y  $3 F_L$  indicando un posible problema en el motor inducido posiblemente por los fallos de desalineamiento y desbalanceo.
- Este tipo de avería en el motor, podría estar basado en excentricidad de estator y del rotor, cortos por laminaciones y componentes sueltos.
- Se encontraron algunos picos (tanto altos como bajos) en el espectro de frecuencia tomado por el lado del compresor, los cuales tienden a inducir que pueden ser vibraciones de tipo neumática, algún problema con el rotor, el anillo, etc., debido a que no son picos relacionados al tipo de averías a estudiar en nuestro sistema (desalineamiento, motor).
- Análisis basados en las tablas de Charlot. Ver Anexo E.

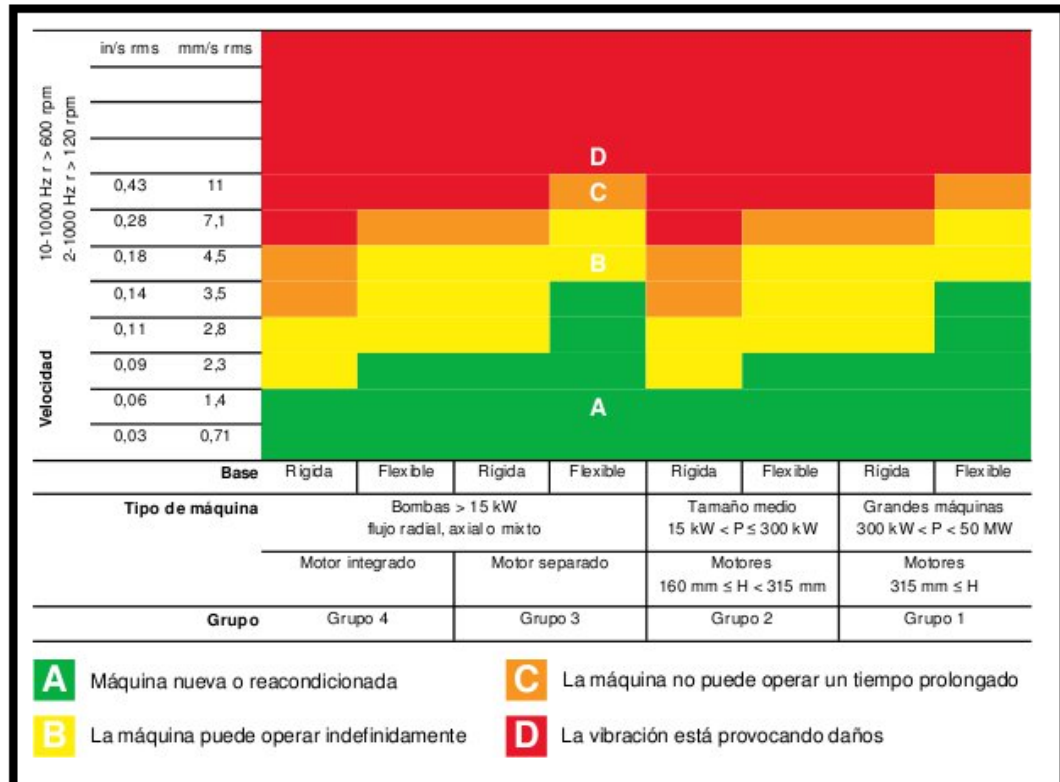
**Análisis de la norma:** El análisis de vibraciones se basa en la norma ISO 10816-1995, evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas.

Debido a las características de este caso de estudio se analizará la norma en el grupo 3 (bombas con motor separado y potencia superior a 15 kw), con una base rígida.

Como el problema principal que esboza el espectro de frecuencia es la desalineación tanto angular como paralela fue el primero a tratar. Donde sus picos a 1x, 2x, 3xRPM, tienen una amplitud promedio de **7mm/s**, indicando que la

condición de la máquina no es adecuada para una operación continua, sino solamente para un período de tiempo limitado. Se deberían llevar a cabo medidas correctivas en un periodo de tiempo no muy extenso.

Figura 53. Severidad de la vibración según la norma ISO 10816-3



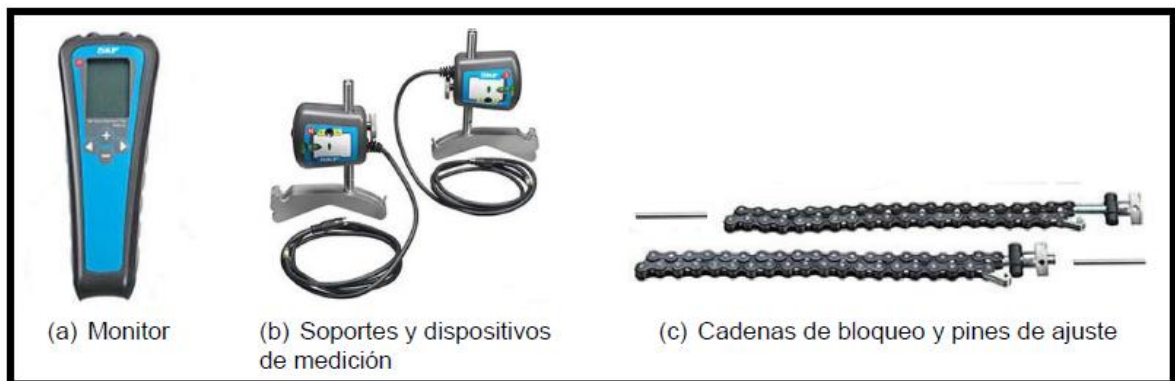
## Evaluación

- **Zona A:** Valores de vibración de máquinas recién puestas en funcionamiento o reacondicionadas.
- **Zona B:** Máquinas que pueden funcionar indefinidamente sin restricciones.
- **Zona C:** La condición de la máquina no es adecuada para una operación continua, sino solamente para un período de tiempo limitado. Se deberían llevar a cabo medidas correctivas en la siguiente parada programada.
- **Zona D:** Los valores de vibración son peligrosos, la máquina puede sufrir daños.

### 6.3.3. Adecuaciones para eliminar condición de vibración excesiva del banco.

Se debe proceder a realizar los ajustes necesarios tras el diagnóstico de desalineamiento que se determinó era la principal causa de vibración. Se realiza la alineación del eje de salida del motor eléctrico con las poleas y bandas acopladas a los compresores con el fin de ya no inducir a fallas y a la aparición de vibraciones en el momento de operación del banco. Para esto se utiliza el Alineador de ejes SKF TKSA 20 (ver Figura 54), solicitado en préstamo al laboratorio de vibraciones mecánicas.

Figura 54. Alineador de ejes SKF TKSA 20



Además, se agregaron soportes de caucho que permiten amortiguar las vibraciones presentes del motor y compresores sobre las bases de cada uno de estos componentes. Ver Figura 55.

Figura 55. Soportes de amortiguación utilizados en el motor eléctrico y compresores



Fuente: Taller de ornamentación. Avalon Calle 19 con 10. San Francisco. Bucaramanga.

#### 6.3.4. Análisis final de vibraciones mecánicas del motor eléctrico

Figura 56. Análisis velocidad sensor ubicado en la posición radial A

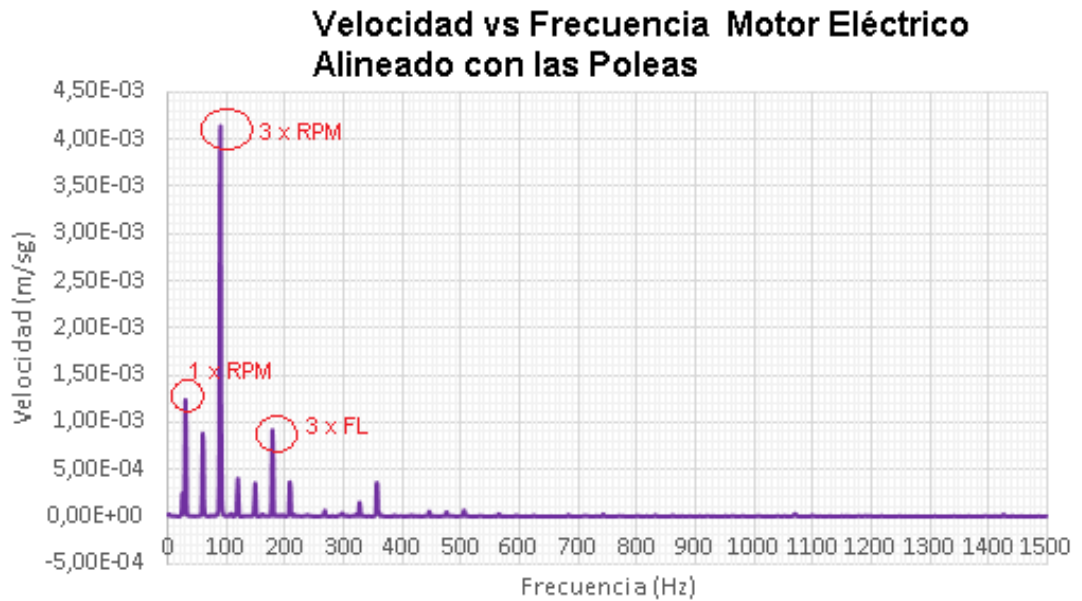
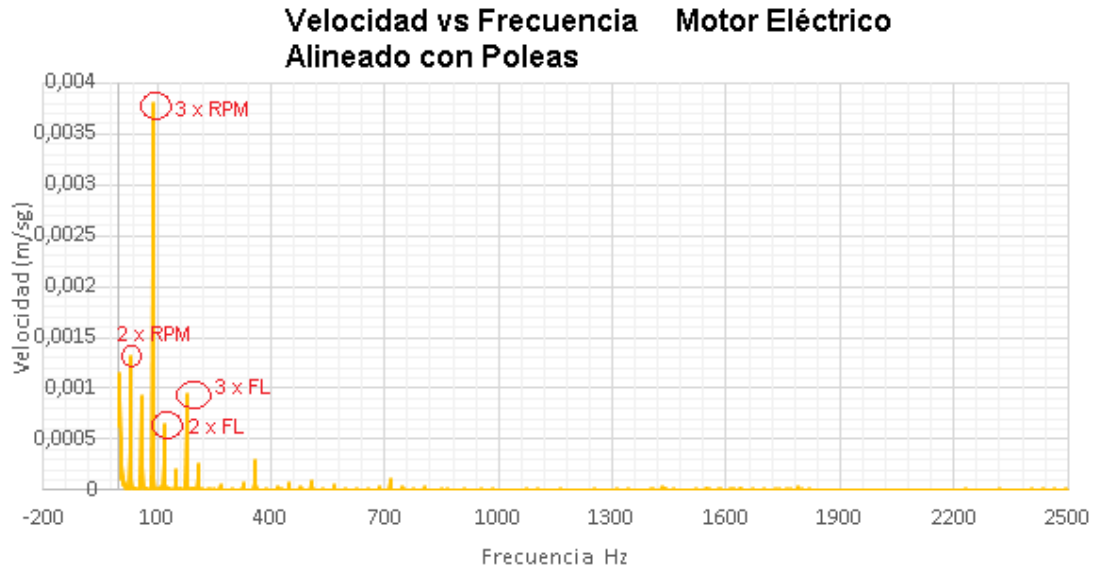


Figura 57. Análisis velocidad sensor ubicado en la posición axial A



Como se puede observar en el espectro, se siguen presentado picos a 1x, 2x y 3 x RPM, tanto en la posición radial como axial, que podrían seguir indicando una desalineación angular y paralela, pero en promedio la amplitud máxima de estos picos esta en 1.5mm/s y un pico de aproximadamente 4mm/s de amplitud a 3xRPM, demostrando así que la acción que se ejecutó sobre la máquina permitiera que pasara de una zona C a una zona B, donde la máquina pueden funcionar indefinidamente sin restricciones, según la norma ISO 10816.

## 7. CONCLUSIONES

- A través de la experiencia de la optimización del banco se reflejó que tan importante es realizar el mantenimiento preventivo de manera permanente, la vida útil de una máquina varía significativamente dependiendo de este factor; el banco estaba en mal estado y se realizó una ardua labor para reestablecer el banco en el ámbito operacional y en su aspecto para que él estuviera nuevamente en condiciones favorables de trabajo para el laboratorio.
- Se desarrolló una herramienta informática por medio de la interfaz de programación MATLAB, para que el estudiante desarrolle las practicas concernientes al proceso termodinámico de la compresión en 2 etapas interpretándolo en un diagrama P-V (Presión respecto a volumen). En la interfaz se evidencian gráficas del proceso y ahorro de potencia para comparar las ventajas de realizar la compresión en múltiples etapas.
- El ahorro de potencia que se puede obtener en el panel de trabajo para el programa simulador, esta entre 10-30%, en los múltiples ensayos que se desarrollaron en las pruebas hechas al banco. Este porcentaje no varía, siempre que no se sobrepasa el nivel de presión máxima del banco de 120 PSI.
- El programa de selección de compresores para redes neumáticas se realizó con el propósito que el estudiante aprenda los parámetros necesarios para la selección de compresores en base a proyectos reales, el practicante debe seleccionar los equipos en catálogos de fabricantes especializados y son máquinas que se encuentra y distribuye en la industria local.

- El protocolo de seguridad implementado es sencillo pero esencial para ayudar a disminuir los riesgos en los que trabaja el operario del banco. Es importante que el personal que use el banco se asegure de usar el banco según el manual y que use los utensilios protectores de seguridad.
- Los picos en el motor a  $2xF_L$ ,  $3xF_L$  bajaron de 7mm/s a 4mm/s, demostrando que parte del diagnóstico presentado (excentricidad motor y estator) fue causado por parte en el desalineamiento en el sistema de transmisión de potencia. Los defectos de niveles de vibraciones evidenciados en el sistema conducen a un consumo mayor de energía eléctrica y a una disminución de la potencia, así mismo las vibraciones generadas por el desalineamiento se transmiten a los demás componentes adyacentes y producen un desgaste generalizado del motor eléctrico, sistema de transmisión de potencia y compresores, en gran parte este análisis no solo ayuda a prolongar la vida útil de la máquina, sino que también a disminuir su consumo eléctrico y por ende costos de funcionamiento.
- Se implementaron 4 prácticas para el Laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas (LMTA) para el estudio de la compresión de gases ideales en múltiples etapas, que se distribuyen así; Práctica 1, Principios de funcionamiento y operación de compresores recíprocos en dos etapas; Práctica 2, Graficar el ciclo de compresión de aire en dos etapas en un diagrama PV y determinar el ahorro de potencia al realizar compresión en dos etapas con inter enfriamiento; Práctica 3, Determinación de la potencia requerida en un sistema de compresión en dos etapas en función de las relaciones de compresión de primera y segunda etapa; Práctica 4, Diseño y selección de un compresor para una red neumática en dos etapas.

## 8. RECOMENDACIONES

Junto al banco se entregan algunos artefactos de protección personal que son de uso del personal que manipula el banco, como también se entrega un manual de mantenimiento, en donde se explica cómo se le debe realizar mantenimiento al banco y a sus componentes, y también se explica el funcionamiento del banco. Es de suma importancia realizar el mantenimiento en los tiempos estipulados en el manual ya que esto ayuda a conservar en buen estado el banco.

Para futuras adaptaciones e implementaciones en el banco de pruebas, está la posibilidad de recopilar los datos para el manejo de las prácticas directamente en un computador, cambiando los medidores con herramientas digitales que transfieran los valores medidos a través de una tarjeta de adquisición de datos en tiempo real y el programa que gráfica el comportamiento termodinámico de la compresión multi – etapa se puede modificar para observar de manera directa e inmediata el diagrama P-V.

El programa de diseño y selección de un sistema de compresión en 2 etapas para la selección de compresores alternativos en una Instalación de aire industrial está diseñado para redes de únicamente 2 etapas como su nombre lo indica, pero está abierto a modificaciones para que pueda ser empleado para cualquier ejemplo o especificaciones en las que se requieran más de 2 etapas. Cambiando el algoritmo y realizar un cálculo selectivo dependiendo de los rangos de relaciones de compresiones que cumplan los parámetros multi etapas, en el desarrollo de las ecuaciones en el ítem 5.1. Está planteado la ecuación referente al cálculo del número de etapas, empleando los cálculos según sean las exigencias de cada

parámetro de selección según sea el caso (temperatura de descarga, diámetros, etc.).

Dentro de la teoría expuesta en el libro, sobre protocolos de seguridad, se describen símbolos de seguridad que se recomiendan instalar en el laboratorio de máquinas térmicas alternativas, los usos de estas señales advierten al operario y esto disminuye el factor de riesgo considerablemente, si se cumplen con la norma señalada.

Si requiere información adicional para realizar las practicas del laboratorio consulte la fase I del proyecto desarrollada por GÓMEZ, C. FERNÁNDEZ, J. Diseño, construcción e implementación de las practicas experimentales de un banco para el análisis de compresores de 2 etapas para el laboratorio de Máquinas Térmicas Alternativas.

## BIBLIOGRAFÍA

ADEMINSAC. Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Technical Associates of Charlotte.

BLOCH, Heinz P, Majumdar, S. R. Guía Práctica para la tecnología de los compresores. Mexico. Mc. Graw Hill, 1998.

BROWN, Royce N. Compressors Selection and Sizeing. Gulf Publishing Company, 1986.

Chassan Jalloul, Marketing Manager, Como llenar y ventilar un manómetro con líquido de amortiguación. Instrumentos WIKA S.A.U. [En Línea] Recuperado en 23 de febrero. Disponible en <http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2015/02/25/como-llenar-ventilar-manmetro-con-lquido-de-amortiguacin/>

FERNÁNDEZ, P. Compresores. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad De Cantabria. España.

G, ROSSAS. Estudio de Vibraciones Mecánicas en Máquinas Recíprocantes. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2004.

GARCÍA, C. MARTÍNEZ, E y MONTALVO, E. Diseño de los componentes Mecánicos de un Minicompresor de aire. Instituto Politécnico Nacional. México, 2013.

Gas Processors Suppliers Association. Section 13. Compressors and Expanders.

GÓMEZ, C. FERNÁNDEZ, J. Diseño, Construcción E Implementación De Las Practicas Experimentales De Un Banco Para El Análisis De Compresores De 2 Etapas Para El Laboratorio De Máquinas Térmicas Alternativas. Bucaramanga. Tesis de grado en Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico Mecánica. 2013.

GÓMEZ RIVAS, P. Diseño y Cálculo de Compresores. Ingeniería Industrial. Nacional de Piura. México.

GREENE, Richard W. Compresores. Selección, Uso y Mantenimiento. Mc. Graw Hill.

J. Daniel, Vibration – Based Diagnostics of Reciprocating Machinery, Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1994.

HUERTA, J. Análisis de Mecanismos en Compresores de Electrodomésticos. Universidad Autónoma de México, México, 2014.

LIRA, Román. Compresores Reciprocantes. Universidad experimental Rafael María Baralt. Maracaibo, 2007.

Máquinas para Fluidos – Compresores. Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental – INFIA, 2010

Manual de Análisis de Irregularidades en Compresores Reciprocantes. Bitzer. M. Elhaj, F. Gu, A.D. Ball, A. Albarbar, M. Al-Qattan, A: Naid. Numerical simulation and experimental study of a two-stage reciprocating compressor for condition monitoring. ScienceDirect. University og Manchester. Oxford. 2007.

R, BROWN. Compressors. Selection and sizing. Gulf Professional Publishing. Second Edition. 1997.

VEM. Instrucciones de montaje, manejo y mantenimiento. Motores Trifásicos asíncronos para baja tensión con rotor de jaula. Edición 6, 2005.

## **ANEXOS**

Los anexos se encuentran en el CD-ROM entregado a la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, contenidos en la carpeta ANEXOS.