



Recuperación y puesta a punto del equipo de compresión de aire de dos etapas

Gilbert Gilkes del laboratorio de conversión de energía.

Guano Guano, Cristhian Geovanny y Nepas Quilumbaquín, Pablo Javier

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecánica

Ing. Delgado García, Reinaldo PhD.

24 de febrero del 2021



Document Information

Analyzed document TESIS_GUANO_NEPAS ACTUALIZADA.pdf (D96434609)
Submitted 2/24/2021 2:35:00 PM
Submitted by Cortez Pazmiño Byron Hernan
Submitter email bhcortez@espe.edu.ec
Similarity 3%
Analysis address bhcortez.espe@analysis.arkund.com

Sources included in the report

URL: <https://docplayer.es/172031691-Trabajo-fin-de-grado.html>
URL: <http://dspace.espech.edu.ec/bitstream/123456789/9667/1/15T00691.pdf>
URL: <https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0062322.pdf>
URL: <https://es.slideshare.net/pauletromero/compresores-yventiladores>
Document 1579750762_959__Informe_5_Termodinamica.pdf (D62915935)
Document 1579842128_471_Práctica_5_Grupal_final.pdf (D62970682)
URL: [https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/108/AgudeloVelezBivia ...](https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/108/AgudeloVelezBivia...)
URL: <http://materias.df.uba.ar/mta2019c1/files/2014/08/Adquisicion-de-datos-Aguero.pdf>
URL: <https://www.lifeder.com/instrumentos-medir-presion/>
Document 1579841760_772_INFORME_FINAL_PRACTICA_5.pdf (D62970621)
Document 1548648462_138_grupo3-compresores.pdf (D47318844)
URL: [https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/47310/Ryan_Everett_Honors_Thesis.PDF?sequ ...](https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/47310/Ryan_Everett_Honors_Thesis.PDF?sequ...)

Instances where selected sources appear

21

Ing Reinaldo Delgado García PhD.
Tutor de Trabajo de Titulación



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación "**Recuperación y puesta a punto del equipo de compresión de aire de dos etapas Gilbert Gilkes del laboratorio de conversión de energía**" fue realizado por los señores: **Guano Guano, Cristhian Geovanny, y Nepas Quilumbaquin, Pablo Javier**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 24 de febrero del 2021

Firma:



Ing. Reinaldo Delgado García, PhD.

C.C: 1750580266

Director del Trabajo de Titulación



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Guano Guano, Cristhian Geovanny, CI: 172579547-8** y **Nepas Quilumbaquin, Pablo Javier, CI:1725585697**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Recuperación y puesta a punto del equipo de compresión de aire de dos etapas Gilbert Gilkes del laboratorio de conversión de energía”** es de nuestra autoría y de nuestra responsabilidad cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 25 de febrero del 2021

Sr. Guano Guano, Cristhian Geovanny.

CI: 1725795478

Sr. Nepas Quilumbaquin, Pablo Javier

CI: 1725585697



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Autorización de Publicación

Nosotros, **Guano Guano, Cristhian Geovanny, CI: 172579547-8** y **Nepas Quilumbaquin, Pablo Javier, CI: 172558569-7**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"Recuperación y puesta a punto del equipo de compresión de aire de dos etapas Gilbert Gilkes del laboratorio de conversión de energía"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 25 de febrero del 2021

Sr. Guano Guano, Cristhian Geovanny.

CI: 1725795478

Sr. Nepas Quilumbaquin, Pablo Javier

CI: 1725585697

Dedicatoria

A Dios y a mi querida madre Celia, por darme la vida, porque a pesar de los obstáculos que la vida nos ha puesto en el camino, ha sido el apoyo incondicional en cada objetivo que me he propuesto, siendo siempre mi mayor motivación y deseando llegar a convertirme en un hijo del que siempre te sientas orgullosa mamita.

A mi querido hermano Jose Luis, quien ha sobrellevado junto conmigo diversas vicisitudes, forma tu propio camino, cumple tus metas y sueños, sabes que cuentas con mi apoyo incondicional y sobretodo sigue amando mucho a mamá.

A toda mi querida familia, quienes durante toda la vida me han apoyado de muchas maneras, consejos, llamados de atención y en especial siendo el ejemplo de valores de respeto y responsabilidad que todo hombre de bien debe tener, una meta más concluida.

Con orgullo dedico el presente trabajo a todos ustedes, espero sea de su agrado.

Cristhian Geovanny Guano

Dedicatoria

El presente trabajo lo dedico a mis padres, Pablo y María quienes me apoyaron incondicionalmente durante todo este largo proyecto, quienes siempre estuvieron ahí dándome fuerzas para continuar y concluir esta meta que me propuse, la cual se realizó y se hizo posible por toda su dedicación, esfuerzo, paciencia y cariño incondicional, hoy se los agradezco de todo corazón y este logro es de ustedes.

A mi hermanita Estefanía quien estuvo presente durante esos difíciles momentos cuidándome y dándome apoyo para no flaquear ante esta etapa y sueño de ser un profesional.

Pablo J. Nepas Q.

Agradecimiento

Agradecimiento total a Dios, por permitirme compartir este logro con mi madre Celia, mi hermano Jose Luis, mis abuelitos Luis Guano y Zoila Toapanta, y cada uno de los miembros de mi querida familia que amo con todo el corazón, recuerden que mi logro es de ustedes también.

A todos mis amigos de toda la vida, escuela, colegio, universidad, trabajo, que con su apoyo moral han permitido compartir buenas y malas experiencias que han enriquecido mi formación personal, los estimo y gracias, juntos lo logramos.

A cada uno de los docentes que me han formado profesionalmente, así como a las instituciones que me han permitido ser parte de ellas, gratitud a cada una de ellas, en especial es un orgullo haberme formado como profesional de Ingeniería Mecánica de la prestigiosa Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

A mi compañero de tesis Pablo, gracias por ser más que un compañero un amigo, hemos pasado muchas dificultades, pero lo hemos logrado, gracias por tu esfuerzo, dedicación y paciencia, éxitos en tu nueva etapa laboral.

Agradecimiento especial a las empresas SURFCOECUADOR y SIPROELECTRIK, que me han brindado la oportunidad de iniciar en el campo profesional, así también a cada uno de sus trabajadores que desde el desarrollo de mis prácticas pre-profesionales me han recibido con los brazos abiertos hasta el día de hoy.

Cristhian Geovanny Guano

Agradecimiento

Agradezco a Dios por la oportunidad de culminar mi carrera y formación profesional.

A mis padres por la paciencia y apoyo durante cada nivel de la carrera que a pesar de mis tropiezos estuvieron ahí brindándome su apoyo y cariño, que me enseñaron a no rendirme y que a pesar de la situación siempre confiaron en que mi esfuerzo y dedicación se materialice
al terminar esta hermosa etapa.

A mi hermana por su alegría, paciencia y dedicación, quien fue una motivación para lograr este sueño y te agradezco por verme como un ejemplo a seguir y ten presente que
siempre te apoyaré y cuidaré.

A mi compañero de tesis que a pesar de las circunstancias que se presentaron pudimos
terminar este proyecto.

A mis amigos que hicieron que esta etapa de mi vida sea entretenida y agradable por
sus ocurrencias y alegrías las cuales hicieron más amenas este trayecto.

Pablo J. Nepas Q.

Contenido

Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento.....	8
Contenido.....	10
Índice de Tablas	16
Índice de figuras	18
Resumen.....	22
Abstract.....	23
Capítulo I.....	24
Generalidades	24
<i>Antecedentes</i>	24
<i>Formulación del Problema</i>	25
<i>Justificación e Importancia</i>	26
Justificación Técnica.....	26
Justificación Académica.....	26
<i>Área de influencia</i>	27
<i>Objetivos</i>	27
Objetivo General	27
Objetivos Específicos.....	28
<i>Alcance</i>	28
Capítulo II.....	30
Marco teórico.....	30

<i>Compresores</i>	30
Compresores alternativos.	30
Compresión de múltiple etapa	32
Termodinámica de la compresión.....	33
Compresión en etapas múltiples sin intercambiador de calor.....	33
Compresión en etapas múltiples con intercambiador de calor.....	34
Índice politrópico	36
Rendimiento	36
Rendimiento volumétrico real	36
Diagrama indicador de un compresor ideal	36
Primera ley de la termodinámica	37
Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un compresor.....	37
Minimización del trabajo del compresor	38
Clasificación de compresores alternativos	38
Por número de etapas.....	38
Compresores de una etapa	38
Compresores de doble etapas	38
<i>Temperatura</i>	39
Temperatura de bulbo húmedo	39
Temperatura de bulbo seco	39
Escala de temperatura	39
<i>Presión</i>	40
<i>Trabajo</i>	41
Razón de compresión	43
Trabajo de compresión	44
Trabajo politrópico	44
Coeficiente politrópico.....	45

	12
Trabajo Isotérmico	46
Trabajo adiabático	47
Trabajo Indicado	48
Presión media indicada.....	50
Potencia Indicada	50
Trabajo Mecánico	51
<i>Eficiencias</i>	51
Eficiencia volumétrica	51
Eficiencia isotérmica	54
Eficiencia mecánica	54
<i>Adquisición de datos</i>	55
Sensores y transductores.....	56
Acondicionamiento de la señal.....	56
Hardware y software	56
Capítulo III.....	57
Determinación del estado actual y correctivos principales	57
<i>Equipo</i>	57
Primera etapa	58
Segunda etapa	59
Intercambiador de calor	61
Instrumentos.....	63
Instrumentos de presión manométrica.....	63
Instrumentos de presión diferencial	64
Indicador Graficador.....	65
Instrumentos de temperatura	66
Instrumento de velocidad	67
<i>Determinación del Estado Actual</i>	68

<i>Correctivos Principales</i>	69
Mantenimiento de compresores de primera y segunda etapa	69
Condiciones iniciales	69
<i>Correctivos aplicados</i>	72
Correctivos de Indicadores Graficadores Mecánicos.	75
Mantenimiento Correctivo en sello de llave de flujo de rotámetro.....	77
Compresión por compresión de junta tórica.....	79
<i>Mantenimiento preventivo de Reóstato de primera etapa</i>	80
<i>Mantenimiento de Manómetros Diferenciales</i>	81
Capítulo IV	84
Descripción de los elementos instalados en el sistema de monitoreo de datos .	84
<i>Sensores de presión</i>	84
Sensor de presión línea de baja.....	86
Sensor de presión línea de alta	88
<i>Sensores de temperatura</i>	90
Sensor de temperatura línea de baja.....	92
Sensor de temperatura línea de alta.....	94
<i>Sensores de velocidad</i>	96
<i>Microcontrolador</i>	98
<i>Pantalla de monitoreo</i>	100
Instalación de los elementos e implementación del circuito de acondicionamiento de señal	103
<i>Tablero principal</i>	103
<i>Instalación de los sensores de presión diferencial</i>	103
<i>Instalación de los sensores de presión manométrica</i>	104

	14
<i>Instalación de termopares.....</i>	106
<i>Instalación de sensores de temperatura.....</i>	107
<i>Instalación de encoders.....</i>	108
<i>Implementación de circuitos de acondicionamiento.....</i>	109
Acondicionamiento de la señal del sensor de presión.....	109
Acondicionamiento de la señal del Encoder.....	112
Acondicionamiento de la señal del sensor de temperatura DS18B20.....	113
Acondicionamiento de la señal de los termopares.....	113
<i>Diseño e implementación del interfaz humano maquina.....</i>	114
<i>Prueba de variables de sensores analógicos y digitales.....</i>	123
Presión de línea de alta.....	124
Velocidad de compresión.....	126
Temperatura.....	127
Capítulo V.....	129
Cálculos y Análisis de Resultados.....	129
Capítulo VI.....	153
Descripción operacional y análisis de psicometría.....	153
<i>Puesta en marcha.....</i>	153
<i>Precauciones operativas.....</i>	154
<i>Análisis de Psicometría.....</i>	155
Capítulo VII.....	159
Análisis económico.....	159
<i>Materiales y equipos.....</i>	159
<i>Costos indirectos.....</i>	162
<i>Costos directos.....</i>	163

Remuneración a docente	163
Remuneración a estudiantes.....	163
<i>Costo total de proyecto</i>	164
Capítulo VIII	165
Conclusiones y recomendaciones	165
<i>Conclusiones</i>	165
<i>Recomendaciones</i>	167
Referencias	168
Anexo A: Características pegamento epóxico PEGATANKE	171
Anexo B: Ficha técnica MPXV5004DP.....	172
Anexo C: Ficha técnica DS18B20.....	173
Anexo D: Ficha técnica AKOZON.....	174
Anexo E: Ficha técnica HC-020K	175
Anexo F: PID proceso de doble etapa de compresión	176
Anexo G: Parámetros software CATT	177
Anexo H: Cartas Psicométricas	178
Anexo I: Guía de práctica de laboratorio	179
Anexo J: Código de programación primera etapa	180
Anexo K: Código de programación segunda etapa.....	181

Índice de Tablas

Tabla 1 Características técnicas de compresor primera etapa	58
Tabla 2 Características técnicas de compresor segunda etapa	59
Tabla 3 Características técnicas de tanque de almacenamiento de aire	60
Tabla 4 Características técnicas de motor eléctrico	61
Tabla 5 Características técnicas de intercambiador de calor	63
Tabla 6 Sensores de presión primera y segunda etapa	85
Tabla 7 Matriz de selección de sensor de presión línea de baja	86
Tabla 8 Características de sensor MPXV5004	88
Tabla 9 Matriz de selección de sensor de presión línea de alta	89
Tabla 10 Características técnicas de sensor de presión AKOZON	90
Tabla 11 Sensores de temperatura primera y segunda etapa	91
Tabla 12 Matriz de selección de sensor de temperatura línea de baja	93
Tabla 13 Características técnicas de sensor DS18B20	94
Tabla 14 Matriz de selección de sensor de temperatura línea de alta	95
Tabla 15 Características técnicas de termopar tipo K	96
Tabla 16 Sensores de velocidad primera y segunda etapa	96
Tabla 17 Matriz de selección de sensor de velocidad	97
Tabla 18 Características técnicas de sensor HC-020K	98
Tabla 19 Matriz de selección de tarjeta microcontroladora	99
Tabla 20 Características técnicas de microcontrolador Arduino Mega	100
Tabla 21 Matriz de selección de la pantalla de monitoreo	101
Tabla 22 Características técnicas de la pantalla Nextion	102
Tabla 23 Variables susceptibles a medición de la primera etapa de compresión.	115
Tabla 24 Variables susceptibles a medición de la segunda etapa de compresión	115
Tabla 25 Resultado de la prueba de funcionamiento de presión de línea de alta	124

Tabla 26 Lectura de variables de presión de línea de alta.....	125
Tabla 27 Resultado de la prueba de funcionamiento del compresor	126
Tabla 28 Resultado de la prueba de funcionamiento de los sensores de temperatura	127
Tabla 29 Datos de entrada para los ejemplos de cálculo	131
Tabla 30 Primera Etapa sin Intercambiador de calor.....	140
Tabla 31 Segunda Etapa sin Intercambiador de calor	140
Tabla 32 Primera Etapa con Intercambiador de calor	141
Tabla 33 Segunda Etapa con Intercambiador de calor	141
Tabla 34 Resultados sin Intercambiador de calor	142
Tabla 35 Resultados con Intercambiador de calor	143
Tabla 36 <i>Cuadro Resumen de Datos de Carta Psicométrica, en compresión sin intercambiador de calor</i>	156
Tabla 37 <i>Cuadro Resumen de Datos de Carta Psicométrica, en compresión con intercambiador de calor</i>	157
Tabla 38 Determinación de Errores Porcentuales en el ejemplo del sistema de compresión sin intercambiador de calor con 450 rpm.....	158
Tabla 39 Costos de recuperación y puesta a punto del equipo.....	159
Tabla 40 Costos de implementación de monitoreo de datos	161
Tabla 41 Costos indirectos	162
Tabla 42 Remuneración de docente (tutor de tesis).....	163
Tabla 43 Remuneración de estudiantes responsables del proyecto	163
Tabla 44 Costo total de proyecto	164

Índice de figuras

Figura 1 Esquema del funcionamiento de un compresor alternativo	31
Figura 2 Funcionamiento de un compresor alternativo.....	32
Figura 3 Sistema de compresión con intercambiador de calor.....	33
Figura 4 Diagramas P-v de los procesos de compresión isentrópicos, politrópicos e isotérmicos entre los mismos límites de presión.	34
Figura 5 Los diagramas P-v y T-s para un proceso de compresión de flujo estacionario de dos etapas.....	35
Figura 6 Ciclo de trabajo teórico de un compresor ideal.....	37
Figura 7 Relación entre presiones	41
Figura 8 Trabajo de frontera móvil en un sistema cerrado.....	42
Figura 9 Diagrama P-V ideal (teórico)	48
Figura 10 Trabajo asociado a los diferentes procesos que tiene lugar en un compresor	49
Figura 11 Interpretación geométrica de la presión media indicada	50
Figura 12 Adquisición de datos.....	55
Figura 13 Equipo de compresión de aire de dos etapas Gilbert Gilkes	57
Figura 14 Manómetro de Bourdon Cambridge 14 bar	64
Figura 15 Manómetros Diferenciales Airflow Developments Ltd. Lancaster Rd. High Wycombe England.....	65
Figura 16 Indicador H. MAIHAK30-7527	66
Figura 17 Termocupla tipo J	66
Figura 18 Instrumento analógico múltiple para medir temperatura, Marca SKIL67	
Figura 19 Tacómetro marca HARDINGS velocidad máx.: 2000 rpm.....	67
Figura 20 Lector Analógico de Tacómetro HARDINGS.....	68
Figura 21 Evidencia de desviación de eje	70

Figura 22 Válvulas con evidencia de golpes	70
Figura 23 Destape de cárter, evidencia de deterioro de aceite	71
Figura 24 Evidencia de carbonización en válvulas	72
Figura 25 Válvulas sometidas a lavado con ultrasonido	72
Figura 26 Comparación de partes antes y después del lavado.....	73
Figura 27 Limpieza de cámara cilíndrica	74
Figura 28 Limpieza de Carter	74
Figura 29 Evidencia de taponamiento de ducto de aire	75
Figura 30 Dibujos CAD de llave de accionamiento previo envío a mecanizado	76
Figura 31 Identificación de falla en sello de llave de flujo de rotámetro	77
Figura 32 Sellos mecánicos.....	78
Figura 33 Información Técnica de Proveedor de O-Ring 5-211 PARKER	78
Figura 34 Evidencia de falso contacto eléctrico	80
Figura 35 Reóstato partes internas	80
Figura 36 Manómetros de columnas de agua.....	81
Figura 37 Líquido manométrico.....	82
Figura 38 Parte superior de manómetro sellado con soldadura en frío.....	83
Figura 39 Sensor de presión diferencial MPXV5004	87
Figura 40 Transductor de presión AKOZON.....	89
Figura 41 Sensor de temperatura DS18B20.....	94
Figura 42 Termopar tipo K.....	95
Figura 43 Sensor de velocidad HC-020K	98
Figura 44 Arduino Mega 2560	100
Figura 45 Pantalla Nextion NX4832T035	102
Figura 46 Sensores de presión diferencial con sus respectivos aditamentos .	104
Figura 47 Sensor en compresor de alta primera etapa.....	105

Figura 48 Sensor en compresor de alta segunda etapa	105
Figura 49 Sensor en cañería de alta primera etapa	106
Figura 50 Sensor de temperatura en cañería de alta primera etapa	107
Figura 51 Sensor de temperatura tipo encapsulado en accesorio tipo "T"	108
Figura 52 Montaje de encoders	109
Figura 53 Respuesta del sensor de presión MPXV5004DP	110
Figura 54 Circuito de acondicionamiento del sensor MPXV5004DP	111
Figura 55 Respuesta de sensor AKOZON.....	112
Figura 56 Arquitectura del programa.....	114
Figura 57 Pantalla de inicio HMI primera etapa	117
Figura 58 PID primera etapa de compresión	117
Figura 59 Pantalla de monitoreo general del sistema de compresión primera etapa.....	118
Figura 60 Pantalla de monitoreo auxiliar del sistema de compresión primera etapa.....	118
Figura 61 Pantalla de inicio HMI segunda etapa.....	119
Figura 62 Pantalla de opciones de operación para sistema de compresión segunda etapa.....	119
Figura 63 PID del proceso de compresión través del intercambiador de calor	120
Figura 64 PID del proceso de compresión segunda etapa forma directa.....	120
Figura 65 Pantalla de monitoreo general del sistema de compresión segunda etapa.....	121
Figura 66 Pantalla de monitoreo general del sistema de compresión segunda etapa.....	121
Figura 67 Primera etapa de compresión.....	122
Figura 68 Segunda etapa de compresión.....	123

Figura 69 Lectura de variable de velocidad de eje de compresor	126
Figura 70 Lectura de instrumentos de temperatura.....	128
Figura 71 Diagrama real obtenido del graficador.	136
Figura 72 Comparación regla graficador con escala normal milimétrica.....	137
Figura 73 Sin Intercambiador de Calor: Eficiencia volumétrica vs Diferencial de presión placa orificio. (1era y 2da Etapa)	144
Figura 74 Sin Intercambiador de Calor: Eficiencia volumétrica vs Relación de presión. (1era y 2da Etapa)	145
Figura 75 Eficiencia volumétrica vs Relación de temperatura, con y sin intercambiador de calor	146
Figura 76 Sin Intercambiador de Calor: Trabajo mecánico vs Diferencial de presión placa orificio. (1era y 2da Etapa)	147
Figura 77 Eficiencia volumétrica vs Diferencia de presión placa orificio, con y sin intercambiador de calor.	148
Figura 78 Con Intercambiador de Calor: Eficiencia volumétrica vs Relación de presión.	149
Figura 79 Eficiencia Isotérmica General vs Relación de presión, con y sin intercambiador de calor.	150
Figura 80 Diagrama P-V, sin intercambiador de calor N=600 rpm y $\Delta p=40$	151
Figura 81 Diagrama P-V, con intercambiador de calor N=600 rpm y $\Delta p=40$...	152
Figura 82 Carta Psicométrica a la entrada del sistema sin Intercambiador de calor a 450 rpm.....	155
Figura 83 Parámetros de psicometría obtenidos con Software CATT3 sin intercambiador de calor.	157
Figura 84 Parámetros de psicometría obtenidos con Software CATT3 con intercambiador de calor.	158

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo realizar la recuperación y puesta a punto del equipo de compresión de doble etapa del laboratorio de conversión de energía perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, para lo cual se contrastó toda la documentación e información existente del equipo. Una vez establecido el estado inicial físico de la unidad de aire y las condiciones de operación, así como la funcionalidad de los instrumentos propios de la máquina, se implementó una metodología que permita realizar una puesta a punto en su funcionamiento, mediante un mantenimiento correctivo y preventivo donde se realizó el cambio, mejoramiento y reemplazo de componentes así como la instalación de un sistema de apoyo de monitoreo de datos para una mejor y rápida apreciación de variables que intervienen dentro del proceso de compresión. Además, se implementó una rehabilitación del graficador de accionamiento mecánico del compresor de doble etapa el cual hizo posible establecer longitudes de carrera dentro del diagrama, así como áreas del ciclo real de compresión, por otro lado, se realizó la actualización de la guía de prácticas del banco de pruebas LT-15-E Gilbert Gilkes en función de los parámetros que se aprecian después de la recuperación y puesta a punto.

Finalmente, a partir de un análisis comparativo mediante el uso de gráficas entre los parámetros dependientes como eficiencia, trabajo, rendimiento, índice politrópico, etc, y con la gráfica de presión volumen obtenidas de cada etapa del sistema de compresión con y sin intercambiador de calor se determina como influye y beneficia en cuanto a la generación trabajo y presión de descarga del equipo.

Palabras clave:

- **PRESIÓN**
- **VOLUMEN**
- **CICLO DE COMPRESIÓN**
- **COMPRESOR**

Abstract

This project has as objective the mechanical recovery and commissioning of two stage compression equipment from Armed Forces University Energy Conversion Laboratory, all equipment documentation and existing information were contrasted, once the initial physic state and operation conditions of air unity were established and original instruments functionality were assured, a methodology to improve the equipment performance was established by a corrective and preventive maintenance where components were changed or improved . A data monitoring system make possible to appreciate variables that take part from compression process. Additionally the mechanic driven graphic system from two stage compression system were rehabilitated making possible establish diagram career lengths and real compression áreas, on the other hand, Test Equipment LT 15 Gilbert Gilks Test Practice guides were updated by the recovery and commissioning of the compression system.

Finally from the comparative analysis by graphics between dependent parameters like efficiency, work, polytrophic index, with pressure volume diagram obtained with heat exchanger and without it, determine how it influences and benefits in work generation and pressure discharge terms.

Key Words;

- **PRESSURE**
- **VOLUME**
- **COMPRESSION CYCLE**
- **COMPRESSOR**

Capítulo I

Generalidades

Antecedentes

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica se cuenta en el Laboratorio de Conversión de la Energía con el equipo LT-15-E Compresor de Aire de Dos Etapas Gilbert Gilkes, que tiene como objetivo el de realizar prácticas de laboratorio para materias como termodinámica y termodinámica aplicada para los estudiantes de ingeniería mecánica.

El 31 de agosto de 1981 fue adquirido el equipo por parte del Departamento, y el 15 de diciembre del mismo año se pone en marcha (Buenaño, 2001), este equipo incluye dos unidades de control de velocidad, dos compresores de dos pistones, dos motores de velocidad variable C.D de 3 HP, un intercambiador de calor, un tanque de almacenamiento de aire, así como indicadores de temperatura y presión, es decir termómetros y manómetros respectivamente.

El compresor LT-15-E es un tipo de Sistema Pistón Embolo destinado a comprimir gases o mezclas gaseosa a presión superior a la atmosférica. Además, los compresores son parte fundamental en el equipamiento de un taller industrial, pues se trata de máquinas robustas que, con un mantenimiento adecuado pueden funcionar por periodos de hasta 20 años sin necesidad de reparaciones.

La compresión de aire se produce a partir de su aspiración del medio ambiente; del mismo que respiramos. Este aire formado por oxígeno (21%) y nitrógeno (78%), otros gases raros, corpúsculos orgánicos y variada cantidad de agua en función de la humedad ambiente, en forma de vapor. Por lo tanto, cuando el compresor almacena aire, también ingresa agua que se va depositando en el fondo de su tanque.

Es conocida la capacidad oxidante del agua, a lo que se agrega que el tanque en su interior no tiene tratamiento alguno que evite la corrosión. Ocasionalmente pueden presentarse protuberancias o "erosiones" en el tanque, cuando esto ocurre, el equipo debe ser desconectado y despresurizado de inmediato, enviando el tanque a una prueba de presión.

El aire comprimido se utiliza para la operación de máquinas y herramientas, taladrar, pintar, soplar hollín, en transportadores neumáticos, en la preparación de alimentos, en la operación de instrumentos y para operaciones en sitio de uso (por ejemplo, combustión subterránea). Las presiones van desde 172 kPa hasta 413,8 Mpa. Los compresores para gas se emplean para refrigeración, acondicionamiento de aire, calefacción, transporte por tuberías, acopio de gas natural, "craqueo" catalítico, polimerización y en otros procesos químicos. En el sistema internacional de medidas (S.I), la unidad estándar para la presión en los compresores la unidad de medida es el kilo pascal (kPa). En algunos países es la única que se puede emplear por ley en los manómetros de los compresores. (Company, 2018)

Desde el primer semestre del año 2001 se presenta diversos problemas en el equipo como fallas en el compresor de la primera etapa, dificultades con la temperatura del bulbo húmedo, problemas con la diferencia de presión, la dificultad de calibración del manómetro de la segunda etapa de compresión, así también como la pérdida del mecanismo graficador de la primera etapa, razón por la cual no se ha trabajado en el equipo de manera eficiente en años anteriores por otros estudiantes o docentes, por lo que se propone realizar su puesta a punto.

Formulación del Problema

En el laboratorio de conversión de energía de la Universidad de las Fuerzas Armadas se cuenta con un equipo de compresión de dos etapas, donde se puede evidenciar que el equipo no cuenta con un funcionamiento eficiente debido a los

problemas con el compresor de la primera etapa. Evidenciándose deficiencia en la lectura de parámetros de operación durante el ciclo .Tales como presión, temperatura y caudal, siendo lo más crítico la necesidad de culminar la práctica de laboratorio debido la excesiva vibración producida por el compresor en la primera etapa y la falta de parámetros que indiquen el correcto desarrollo de la misma, siendo una evidente e importante problemática durante la formación de futuros profesionales y la prestación de servicios a la industria.

Justificación e Importancia

Justificación Técnica

Con el paso del tiempo, debido a la crisis presupuestaria para la educación superior pública del país, el bajo presupuesto para el mantenimiento de los equipos de mayor antigüedad debido a que sus componentes se encuentran descontinuados dentro del mercado, ha provocado el deficiente funcionamiento de los mismos a causa del desgaste en el transcurso de los años del compresor de aire de la primera etapa, así como es evidente la existencia de problemas en la lectura de datos de presión y de la temperatura en el sistema durante su funcionamiento, es por esto la necesidad de solventar estas problemáticas así como la reposición total del mecanismo del instrumento graficador de la primera etapa y la adquisición de nuevos sensores analógicos para la adaptación de instrumentos de medición digitales en el equipo.

Lo antes mencionado será de mucha ayuda para un eficiente desarrollo de las prácticas de laboratorio obteniendo así una menor incertidumbre de los datos del equipo en funcionamiento, con la ayuda de la repotenciación tecnológica en la toma de datos.

Justificación Académica

El Departamento de Ciencias de la Energía y la Mecánica siendo parte de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE posee laboratorios de suma importancia

como el de Energías para los alumnos de la materia de termodinámica y termodinámica aplicada donde el estudiante al poder obtener datos con mayor confiabilidad podrá desarrollar el ciclo de compresión de dos etapas y realizar un análisis mediante una comparativa entre sus parámetros dependientes de esta manera pudiendo adquirir conocimientos tanto del manejo del equipo como una correcta identificación de las diferentes etapas del ciclo.

Por lo que, si el equipo de compresión de aire de dos etapas no se lo recupera a través de un mejoramiento de instrumentos de medición y una efectiva puesta en marcha, las prácticas de laboratorio no se realizarán por lo que los estudiantes serán perjudicados al no cumplir todos los objetivos que establece el pensum académico para la excelente formación de ingenieros mecánicos.

Área de influencia

El proyecto tendrá incidencia en el área de termodinámica para procesos industriales donde sera necesario alcanzar altas presiones sin requerir una alta relación de compresión en una etapa, por lo que en el laboratorio de conversión de energía se ejecutaran prácticas de laboratorio en el banco de compresión de aire de dos etapas para que los estudiantes de ingeniería mecánica que estudian materias del área de energías tengan conocimientos prácticos del uso correcto de la máquina y de cómo se desarrolla el ciclo durante las diferentes etapas en la compresión en el laboratorio del Departamento de Ciencias de Energía y Mecánica.

Objetivos

Objetivo General

- Realizar la recuperación y puesta a punto del equipo de compresión de aire de dos etapas Gilbert Gilkes del laboratorio de conversión de energía.

Objetivos Específicos

- Realizar una evaluación térmica-mecánica del banco de pruebas de LT-15-E Gilbert Gilkes compresión de aire de dos etapas.
- Implementar un sistema de apoyo de medición con la instalación de instrumentos digitales en el equipo.
- Actualizar la guía de las prácticas del banco de pruebas de LT-15-E Gilbert Gilkes compresión de aire de dos etapas. En función de los parámetros que se pueden obtener después de su repotencialización
- Realizar el análisis económico del proyecto

Alcance

La finalidad del siguiente proyecto es la recuperación y puesta a punto del banco de compresión de aire de dos etapas del laboratorio de conversión de energía mediante la verificación operacional del compresor de aire de la primera etapa y la implementación de un sistema de apoyo mediante la instalación de instrumentos digitales en el equipo.

El proyecto se desarrollará mediante ciertas etapas se detallan a continuación:

- En la primera etapa se empezará con el estudio de la información preliminar obtenida de la documentación histórica que se encuentra en los registros de las prácticas de laboratorio, así como el *handbook* proporcionado por el fabricante.
- En la segunda etapa, se desarrollará una valoración del estado actual de cada uno de los componentes del equipo mediante inspecciones visuales y pruebas de operación básica.
- En la tercera etapa, se implementará métodos de mantenimiento preventivo y correctivo según el caso en cada componente o instrumento del equipo

que lo requiera, comprobando su correcto funcionamiento una vez ejecutados dichos métodos.

- En la cuarta etapa, se instalará el sistema de apoyo para el monitoreo de datos para facilitar la lectura de los mismos durante el desarrollo de la práctica de laboratorio, así como las fichas técnicas de cada uno de los sensores digitales instalados dentro del equipo.
- La quinta etapa, consiste en la ejecución de pruebas completas de operación del equipo de compresión de dos etapas además de la verificación del sistema de apoyo referido en la etapa anterior.
- En la siguiente etapa, una vez verificado el cumplimiento de la quinta etapa se procederá a elaborar una guía de prácticas para laboratorio y un manual de operación para un correcto funcionamiento del equipo con el fin de preservar el banco de pruebas durante el transcurso de las prácticas de laboratorio, pudiendo de esta manera alargar su vida útil.
- Finalmente, en una última etapa, se describirá la conclusiones y recomendaciones del presente proyecto, así como el planteamiento de nuevos temas de proyectos que se pueden elaborar en el futuro.

Capítulo II

Marco teórico

Compresores

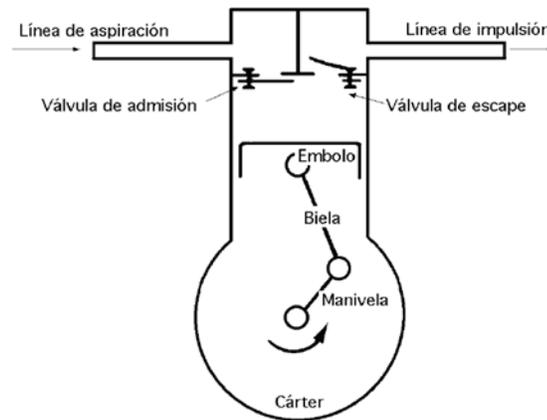
Los compresores son dispositivos que tienen por finalidad aportar una energía a los fluidos compresibles sobre los que operan, para hacerlos fluir aumentando al mismo tiempo su presión. (Fernández, 2008)

Existen varios tipos de compresores de aire, pero cada uno de ellos inicialmente trabaja de la misma forma ya que toman aire de la atmósfera, lo comprimen para realizar un trabajo y lo devuelven al ambiente para ser reutilizado.

Compresores alternativos.

A estos dispositivos, el trabajo se les suministra desde una fuente externa a través de un eje giratorio, por lo tanto, los compresores requieren una entrada de trabajo. Comúnmente los compresores son de embolo y pistón y por lo general el fluido a comprimir es aire.

Un compresor admite el fluido (gas o vapor) a una presión P_1 dada, descargándolo a una presión P_2 superior, la energía necesaria para efectuar este trabajo la proporciona un motor eléctrico o una turbina de vapor. (Fernández, 2008)

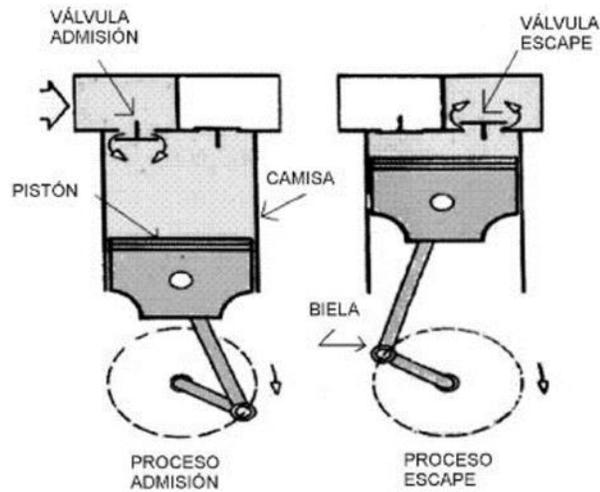
Figura 1*Esquema del funcionamiento de un compresor alternativo*

Nota: Tomado de (Fernández, 2008)

En este tipo de compresores se tiene una válvula de admisión y una de escape, de manera que cuando el pistón llega al punto muerto inferior se abre la válvula de admisión e ingresa aire tomado del ambiente exterior, luego se cierra la válvula y el pistón avanza hasta el punto muerto superior reduciendo el volumen del aire, lo que hace que aumente su presión; en ese momento se abre la válvula de escape y el aire sale a la red de distribución. (Berrío & Ochoa, 2007).

Figura 2

Funcionamiento de un compresor alternativo



Nota: Tomado de (Berrío & Ochoa, 2007)

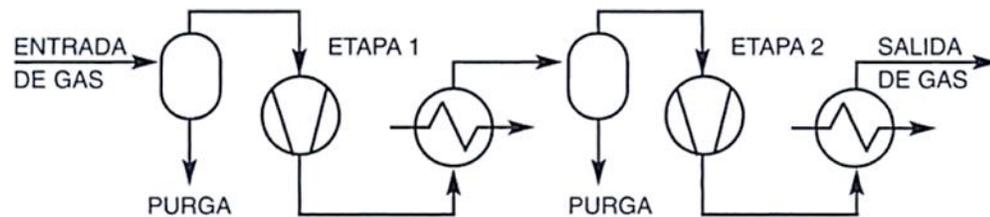
Compresión de múltiple etapa

Este tipo de compresión es el resultado de combinar 2 o más sistemas de compresión en serie y por lo general se lo utiliza cuando se necesita una mayor relación de compresión la cual no se puede alcanzar con una sola etapa de compresión.

Una relación de compresión demasiado grande (presión de descarga absoluta dividida por la presión de admisión absoluta) causa una temperatura de descarga excesiva. Con el propósito de solucionar este problema es muy común el uso de intercambiadores de calor, los mismos que permiten enfriar el fluido entre etapas para reducir la temperatura y el volumen que entra en la siguiente etapa.

Figura 3

Sistema de compresión con intercambiador de calor



Nota: Tomado de (Sanchez, 2006)

Termodinámica de la compresión

Dentro de la cámara de compresión se ve afectada la presión y temperatura donde en el mismo se lleva de un estado 1 a un estado 2. Los procesos más comunes son:

- Compresión isotrópica.
- Compresión isotérmica
- Compresión poli trópica sin intercambiador
- Compresión poli trópica con intercambiador

Los dos primeros procesos son considerados como procesos ideales, mientras que los dos últimos procesos son considerados como reales.

Compresión en etapas múltiples sin intercambiador de calor

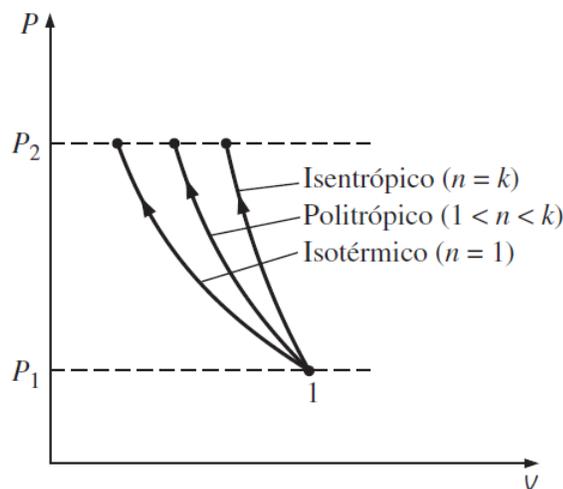
El proceso de compresión politrópico sin enfriamiento se utiliza en casos donde el calor generado en la compresión no pone en riesgo la operación de la máquina, es decir, no pone en riesgo el proceso de compresión ni la destrucción o posible destrucción de los componentes del equipo. (Montes, 2015)

$$Pv^n = cte \quad (1)$$

En la **Figura 4** se muestra que la compresión adiabática requiere el trabajo máximo mientras que la compresión isotérmica requiere el mínimo. El trabajo de entrada requerido para el caso politrópico está entre estos dos y disminuye cuando el exponente politrópico n disminuye, lo que aumenta el rechazo de calor durante el proceso de compresión; todo esto considerando que los tres casos son internamente reversibles. Si se remueve suficiente calor, el valor de n se aproxima a la unidad y el proceso se vuelve isotérmico. Una manera común de enfriar el gas durante la compresión es usar camisas de agua alrededor de la carcasa de los compresores. (Cengel, 2012)

Figura 4

Diagramas P-v de los procesos de compresión isentrópicos, politrópicos e isotérmicos entre los mismos límites de presión.



Nota: Tomado de (Cengel, 2012)

Compresión en etapas múltiples con intercambiador de calor

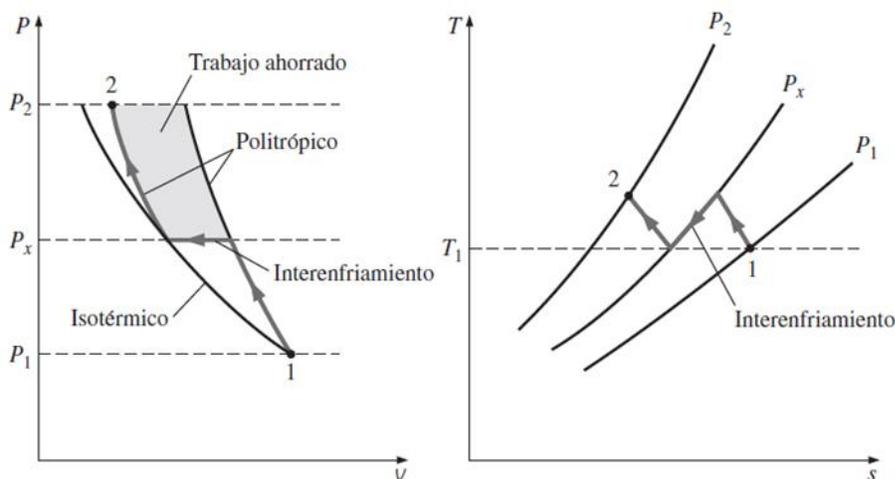
Para alcanzar presiones de trabajo altas es deseable enfriar un gas al momento de la compresión porque esto reduce el trabajo requerido significativamente, sin

embargo, esto es casi imposible de realizarlo por lo que una forma de mejorar este proceso es utilizar la compresión en etapas múltiples con interenfriamiento.

En la **Figura 5** se ilustra gráficamente en diagramas P-v y T-s el efecto que causa el interenfriamiento sobre el trabajo de un compresor de dos etapas. El gas está comprimido en la primera etapa desde P_1 hasta una presión intermedia P_x , enfriado a presión constante a la temperatura inicial T_1 y comprimido en la segunda etapa a la presión final P_2 . En general, los procesos de compresión pueden modelarse como politrópicos, donde el valor de n varía entre k y 1 . El área sombreada sobre el diagrama P-v representa el trabajo ahorrado como resultado de la compresión de dos etapas con interenfriamiento.

Figura 5

Los diagramas P-v y T-s para un proceso de compresión de flujo estacionario de dos etapas



Nota: Tomado de (Cengel, 2012)

Es decir, para minimizar el trabajo durante la compresión de dos etapas, la relación de presión para cada etapa del compresor debe ser la misma. Cuando se

satisface esta condición, el trabajo de compresión en cada etapa se vuelve idéntico, es decir:

$$W_{comp I, entrada} = W_{comp II, entrada} \quad (2)$$

Índice politrópico

El índice politrópico puede tomar varios valores dependiendo del proceso que caracteriza y se obtiene a partir de la relación de presiones y temperaturas de un proceso de compresión.

$$n = \frac{1}{1 - \left(\frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)} \right)} \quad (3)$$

Rendimiento

Es importante el determinar el rendimiento real de un sistema de compresión debido a que durante el proceso de compresión de aire se generan pérdidas mecánicas y termodinámicas resultado de la fricción del propio sistema.

Rendimiento volumétrico real

Diagrama indicador de un compresor ideal

A la carrera de admisión le corresponderá en el diagrama indicador una línea recta horizontal, ya que el volumen total ira creciendo manteniéndose constante la presión en el valor de P_1 , a que se encuentra el aire que ingresa.

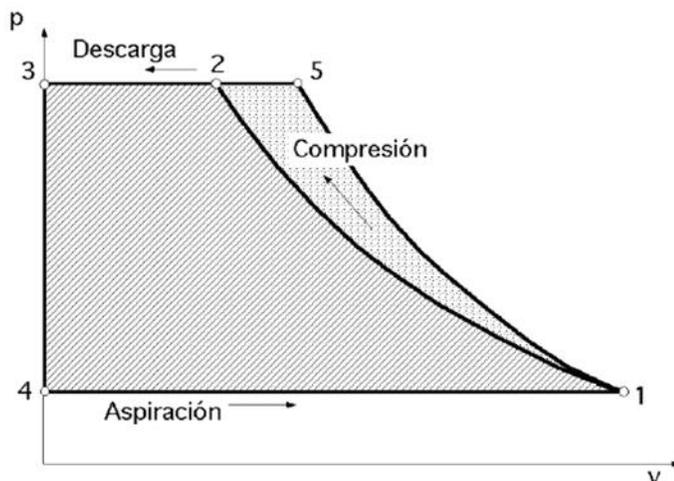
El ciclo mecánico del compresor se compone de dos carreras del embolo.

Una primera carrera en que se produce la admisión de aire al interior del cilindro sin cambiar su estado en la **Figura 6** está representada de 4-1 donde se mantiene la presión constante mientras el volumen aumenta.

Una segunda carrera que se compone de dos partes es: primero se da la compresión de aire representada en la **Figura 6** de 1-2 y seguidamente del barrido del aire comprimido fuera del cilindro representado en la **Figura 6** de 2-3.

Figura 6

Ciclo de trabajo teórico de un compresor ideal.



Nota: Tomada de (Fernández, 2008)

Primera ley de la termodinámica

Es un principio general que considera que las energías transferidas son iguales a la diferencia de las energías transportadas, es decir, el cambio neto (incremento o disminución) en la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso. (Cengel, 2012)

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad (4)$$

Aplicación de la primera ley de la termodinámica a un compresor

Los compresores alternativos pertenecen a un sistema abierto; se dice que todo sistema abierto trabaja en régimen permanente. Régimen permanente es definido como

un proceso en el cual las propiedades del sistema (ya sean propiedades de punto de promediadas) no cambian con el tiempo. Es decir, si examinamos ya sea un punto particular del sistema o el sistema como un todo, sus propiedades no variarían con el tiempo. Esto de ninguna manera implica que las propiedades en todos los puntos deben ser idénticas, sino solo que las propiedades de cada punto son invariantes en el tiempo. (Davalos, 2010)

Por lo tanto, el sistema abierto tiene una entrada y salida de masa, así como interacciones de trabajo y calor con sus alrededores y además este podría realizar trabajo de frontera.

Minimización del trabajo del compresor

El trabajo de entrada para un compresor alternativo se minimiza cuando el proceso interno se lo aproxima a un proceso reversible de compresión, es decir reduciendo tanto como sea posible la fricción y la turbulencia.

Clasificación de compresores alternativos

Por número de etapas

Compresores de una etapa

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 $\pm 20^\circ\text{C}$. (Fernández, 2008)

Compresores de doble etapas

Los sistemas de doble etapa de compresión consisten en dos compresores, uno de primera etapa (de baja) y otro de segunda etapa (de alta).

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°C con una variación de $\pm 15^\circ\text{C}$. (Fernández, 2008)

Temperatura

La temperatura puede interpretarse como una medida de la capacidad que tiene un sistema para intercambiar energía térmica. Este intercambio se da hasta cuando se alcanza el equilibrio térmico. (Hoyos & Mejia, 2009)

La ley cero de la termodinámica establece que, si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí, es decir, dos cuerpos están en equilibrio térmico si ambos tienen la misma lectura de temperatura incluso si no están en contacto. (Cengel, 2012)

Temperatura de bulbo húmedo

Es la temperatura de equilibrio que se alcanza cuando tanto la mezcla del aire y vapor de agua pasan por un proceso de enfriamiento adiabático hasta llegar a la saturación. (Dossat, 1986)

Temperatura de bulbo seco

Es la temperatura real a la que se encuentra el aire húmedo. Denominada temperatura del aire registrada y medida por el termómetro común. (Dossat, 1986)

Escalas de temperatura

La medida de la temperatura se puede representar mediante dos tipos de escalas: relativas y absolutas. Las dos escalas relativas son Fahrenheit y Celsius mientras que las escalas absolutas están definidas a partir de la segunda ley de la termodinámica y son independientes de cualquier sustancia termométrica y se denominan escala Kelvin (K) en S.I. y escala Rankine ($^\circ\text{R}$) en sistema inglés. (Dossat, 1986)

Presión

La presión se define como la fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área, la atmósfera ejerce una presión sobre la superficie de la tierra y en general esta presión está determinada por la altura.

La presión atmosférica estándar en el nivel del mar es de 1013.25 mbar (760 mm de Hg). Por otra parte, al ganar altura, disminuye la presión. A 500 m de altura la presión atmosférica es de 955 mbar, y a 9000 m de altura la presión es de solo 307 mbar. (Manrique, 2005)

La presión real en una determinada posición se llama presión absoluta, y la misma se mide respecto al vacío absoluto. La mayoría de instrumentos o dispositivos para medir la presión se calibran a cero en la atmósfera por lo que estos medidores indican la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica local; entonces dicha diferencia se la conoce como la presión manométrica. En cambio, las presiones que se encuentran por debajo de la presión atmosférica se las conoce como de presiones de vacío que no es más que la diferencia entre la presión atmosférica y absoluta.

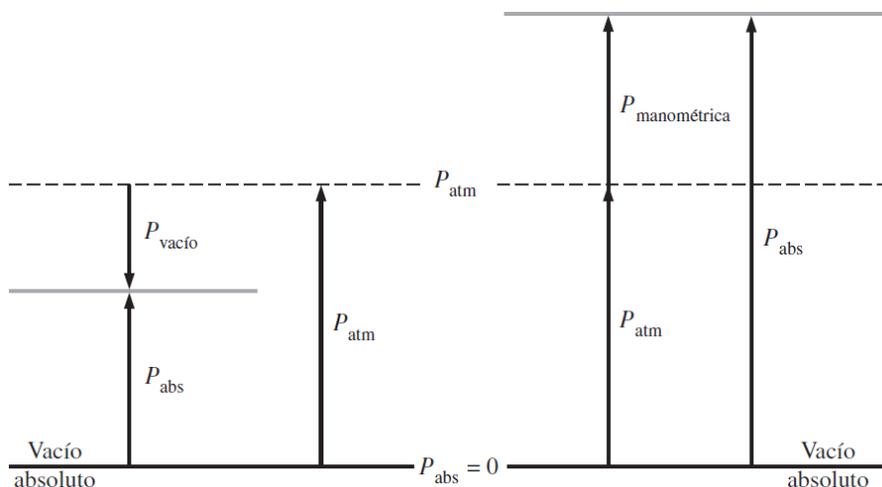
Las presiones absolutas, manométricas y de vacío son todas positivas y se relacionan entre sí mediante:

$$P_{manométrica} = P_{abs} - P_{atm} \quad (5)$$

$$P_{vacío} = P_{atm} - P_{abs} \quad (6)$$

Figura 7

Relación entre presiones



Nota: Tomando de (Cengel, 2012)

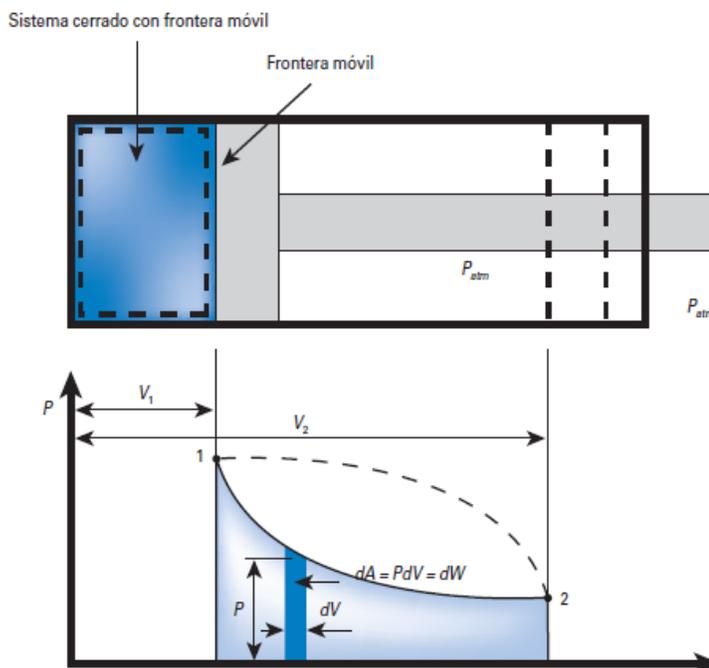
Trabajo

El trabajo termodinámico se puede denominar como la interacción de energía que ocurre sin el cambio de variables microscópicas como una diferencia de temperatura entre un sistema y el exterior, es decir, es la transferencia de energía a través de la frontera de un sistema asociada a un cambio en las variables macroscópicas, como pueden ser el volumen, la presión y la velocidad del centro de masas. (Cengel, 2012)

El trabajo en un ciclo de compresión, es una forma de trabajo mecánico, relacionando principalmente la etapa de expansión y compresión de un gas en un dispositivo de cilindro-émbolo, dicho trabajo que se realiza en estas etapas también suelen llamarse trabajo de frontera móvil, además, se ve claramente en la **Figura 8** que el trabajo de expansión para llevar el sistema desde el estado 1 al estado 2, depende de la trayectoria seguida durante el proceso, ya que el área bajo la curva cambia si la trayectoria cambia. (Hoyos & Mejía, 2009)

Figura 8

Trabajo de frontera móvil en un sistema cerrado



Nota: Tomado de (Jiménez, Gutiérrez, & Barbosa, 2014)

Este trabajo no se puede determinar de forma precisa solo con un análisis termodinámico, debido a que el émbolo se mueve a grandes velocidades, lo cual hace difícil que el gas en el interior se mantenga en equilibrio, por lo que se debe determinar mediante mediciones directas para un proceso de cuasi equilibrio, es decir, considerando que el sistema permanezca muy cercano al equilibrio en el transcurso del tiempo, lo cual hace posible contemplar que a intervalos muy pequeños de cambio de volumen, la presión permanece constante, por lo que el trabajo realizado puede expresarse como: (Jiménez, Gutiérrez, & Barbosa, 2014)

$$dW = PAdx \quad (7)$$

Donde:

A : Área transversal del pistón

dx : Desplazamiento del pistón

Lo cual se puede expresar como:

$$dW = PdV \quad (8)$$

El trabajo total en la frontera móvil es:

$$W_{12} = \int_1^2 PdV \quad (9)$$

Para determinar el tipo de trabajo, como la ecuación indica es importante que la ruta del ciclo sea este de compresión o expansión debe ser conocida para poder evaluarla en la integral, como una guía para reconocer el tipo de trabajo en el campo industrial por lo general en unidades sin enfriamiento el ciclo es adiabático, en unidades completamente enfriadas el ciclo es isotérmico y en grandes compresores con inter enfriadores o enfriamiento incompleto el ciclo es politrópico. (Mocada, 2014)

Razón de compresión

Es la relación de la presión absoluta de la descarga P_{out} a la presión absoluta de succión P_{in} del cilindro, además es un parámetro importante en la evaluación y selección de compresores, por lo general la relación de compresión varía de 1,05 a 7, sin embargo, para procesos se considera como máximo razones de 3,5 a 4 por etapa, considerando relaciones de compresión bajas se usan sopladores, para relaciones de compresión más altas se requiere de un compresor y si se necesita aún más altas se usan etapas múltiples de compresión.

Como se sabe cuándo la presión de un gas se incrementa, la temperatura del fluido tiende a incrementarse, así cuando el volumen específico cambia también varía el trabajo necesario para comprimir esa unidad de fluido, consecuencia de esto los compresores de múltiples etapas deben ser acompañados de sistemas de enfriamiento para disminuir el aumento de temperatura adiabática y por lo general son intercambiadores de calor entre las etapas. (Mocada, 2014)

Es importante además señalar la relación de temperatura entre la descarga T_2 y de succión T_1 , este parámetro será de mucha ayuda para determinar el valor de índice politrópico del proceso.

Trabajo de compresión

Para determinar el trabajo es necesario un balance mecánico de energía, los cambios de energía cinética y potencial son pequeños haciendo que los términos de columna estática y velocidad puedan ser despreciados de dicho balance, así pues, a diferencia de otros sistemas el fluido no puede ser tratado como incompresible resultando la siguiente ecuación diferencial.

$$\int_{P_{in}}^{P_{out}} \frac{dp}{\rho} + \eta \widehat{W}_s = 0 \quad (10)$$

$$\eta \widehat{W}_s = - \int_{P_{in}}^{P_{out}} \frac{dp}{\rho} \quad (11)$$

El símbolo negativo indica que el trabajo se realiza sobre el sistema y la masa se mantiene constante.

Trabajo politrópico

La compresión politrópica se caracteriza por no ser ni adiabática ni isotérmica, por lo que su relación es expresada por:

$$pV^n = Constante = \frac{p}{\rho^n} \quad (12)$$

Ubicando la densidad en términos de una presión conocida, se tiene que:

$$\frac{p}{\rho^n} = \frac{p_1}{\rho_1^n} \Rightarrow \rho^n = \frac{p * \rho_1^n}{p_1}$$

$$\rho = \rho_1 \left(\frac{p}{p_1} \right)^{1/n}$$

Si esta última expresión se sustituye en la ecuación (11) se obtiene la siguiente expresión:

$$\widehat{W}_{pol} = \int_{P_{in}}^{P_{out}} \frac{dp}{\rho}$$

$$\widehat{W}_{pol} = \int_{P_{in}}^{P_{out}} \frac{dp}{\left[\rho_{in} \left(\frac{p}{p_{in}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]} = \frac{p_{in}^{\frac{1}{n}}}{\rho_{in}} \int_{P_{in}}^{P_{out}} \frac{dp}{p^{\frac{1}{n}}}$$

$$\widehat{W}_{pol} = \frac{p_{in}}{\rho_{in}} \left(\frac{n}{n-1} \right) \left[\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{1-\frac{1}{n}} - 1 \right]$$

Considerando la constante $\frac{p_{in}}{\rho_{in}} = m_{in} R_{gas} T_{in} = Const$,

Donde:

m_{in} : masa de entrada

R_{gas} : constante general de los gases

T_{in} : temperatura de entrada

Y considerando también la relación de presión

$$r_p = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$\Rightarrow \widehat{W}_{pol} = m_{in} R_{gas} T_{in} \left(\frac{n}{n-1} \right) \left[(r_p)^{1-\frac{1}{n}} - 1 \right] \quad (13)$$

Coefficiente politrópico

Para determinar el coeficiente politrópico real del proceso termodinámico de compresión.

Dado que: $P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$ y la ecuación de los gases ideales $PV = mRT$

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right) = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

Reemplazando la relación de presión $r_p = \frac{P_2}{P_1}$ y la relación de temperatura $r_t = \frac{T_2}{T_1}$

$$r_p = (r_t)^{\frac{n}{n-1}}$$

$$n = \frac{\ln(r_p)}{\ln(r_p) - \ln(r_t)} \quad (14)$$

Trabajo Isotérmico

Si durante el proceso de compresión el gas remueve bastante cantidad de calor, este se aproximará a un ciclo isotérmico, por lo que el trabajo se calculará de la siguiente manera:

$$pV = Constante = \frac{p}{\rho} = \frac{p_{in}}{\rho_{in}} \quad (15)$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{p}{p_{in}} * \rho_{in}$$

$$\widehat{W}_{iso} = \frac{p_{in}}{\rho_{in}} \int_{p_{in}}^{P_{out}} \frac{dp}{p} = \frac{p_{in}}{\rho_{in}} \ln\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)$$

Considerando la constante $\frac{p_{in}}{\rho_{in}} = m_{in} R_{gas} T_{in} = Const$, y la relación de presión

$$r_p = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$\Rightarrow \widehat{W}_{iso} = m_{in} R_{gas} T_{in} \ln(r_p) \quad (16)$$

Si se considera una compresión isotérmica esta requeriría el mínimo trabajo para alcanzar una relación de compresión determinada, es decir, todo el calor debe ser removido a medida que este sea generado, para que esto suceda el compresor puede ser recubierto por una chaqueta de enfriamiento, pero es difícil conseguir bastante aérea para enfriamiento completo, por lo tanto si la razón de compresión es bastante grande para usar etapas múltiples, el enfriamiento entre cada etapa es una excelente elección.

Trabajo adiabático

Si durante el proceso de compresión no se transfiere calor hacia o desde el gas que se está comprimiendo, el proceso puede ser tratado como adiabático o isentrópico, considerando además que la compresión de un gas ideal depende de la razón de capacidades caloríficas.

$$pV^\gamma = \text{Constante} = \frac{p}{\rho^\gamma} \quad (17)$$

$$\text{Donde: } \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

Ubicando la densidad en términos de una presión conocida, se tiene que:

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = \frac{p_1}{\rho_1^\gamma} \Rightarrow \rho^\gamma = \frac{p * \rho_1^\gamma}{p_1}$$

$$\rho = \rho_1 \left(\frac{p}{p_1} \right)^{1/\gamma}$$

Si esta última expresión se sustituye en la ecuación (11) se obtiene la siguiente expresión:

$$\widehat{W}_{ad} = \int_{P_{in}}^{P_{out}} \frac{dp}{\rho}$$

$$\widehat{W}_{ad} = \int_{P_{in}}^{P_{out}} \frac{dp}{\left[\rho_{in} \left(\frac{p}{p_{in}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right]} = \frac{p_{in}^{\frac{1}{\gamma}}}{\rho_{in}} \int_{P_{in}}^{P_{out}} \frac{dp}{p^{\frac{1}{\gamma}}}$$

$$\widehat{W}_{ad} = \frac{p_{in}}{\rho_{in}} \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left[\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{1 - \frac{1}{\gamma}} - 1 \right]$$

Considerando la constante $\frac{p_{in}}{\rho_{in}} = m_{in} R_{gas} T_{in} = \text{Const}$, y la relación de presión

$$r_p = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$\Rightarrow \widehat{W}_{ad} = m_{in} R_{gas} T_{in} \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left[(r_p)^{1 - \frac{1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (18)$$

Vale mencionar que la temperatura de salida para compresión adiabática es dada por:

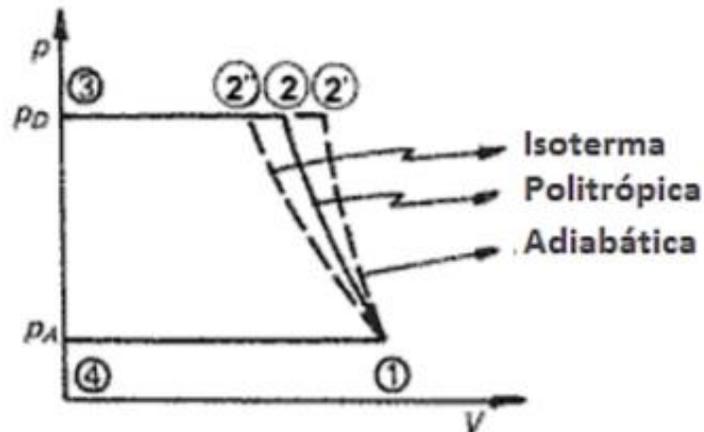
$$T_{out} = T_{in} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{1-\frac{1}{\gamma}} \quad (19)$$

Trabajo Indicado

El trabajo indicado se basa en la potencia que absorbe el compresor teniendo en cuenta la sucesión de procesos que se presentan en el interior del compresor representados teóricamente con el diagrama P-V ideal teórico de la **Figura 9**, además para la misma relación de compresión, la compresión isoterma absorbe menor trabajo que la compresión adiabática. (Mocada, 2014)

Figura 9

Diagrama P-V ideal (teórico)



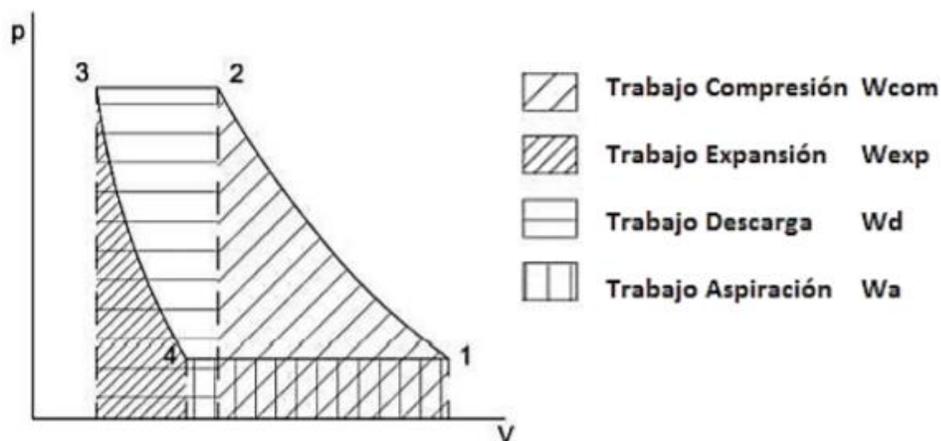
Nota: Tomado de (Martínez, 2007)

El trabajo indicado también está representado por el área 1-2-3-4 del diagrama P-V de procesos de la figura 10, siendo la sumatoria de los trabajos realizados en cada

proceso con su respectivo signo dependiendo de si el trabajo es absorbido por el sistema o desarrollado por el sistema. (Muñoz & Rovira de Antonio, 2014)

Figura 10

Trabajo asociado a los diferentes procesos que tiene lugar en un compresor



Nota: Tomado de (Muñoz & Rovira de Antonio, 2014)

Se puede apreciar que en los procesos de compresión y descarga, el trabajo es realizado sobre el sistema (disminuye su volumen), mientras que en los procesos de expansión y aspiración el trabajo es desarrollado por el sistema (incrementa su volumen).

Se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$W_i = p_{mi} * V_D \quad (20)$$

Donde:

p_{mi} : Presión media indicada [bar] $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$

V_D : Cilindrada unitaria [mm^3] ($V_D = A_p \times S_p$)

A_p : Área del pistón [mm^2]

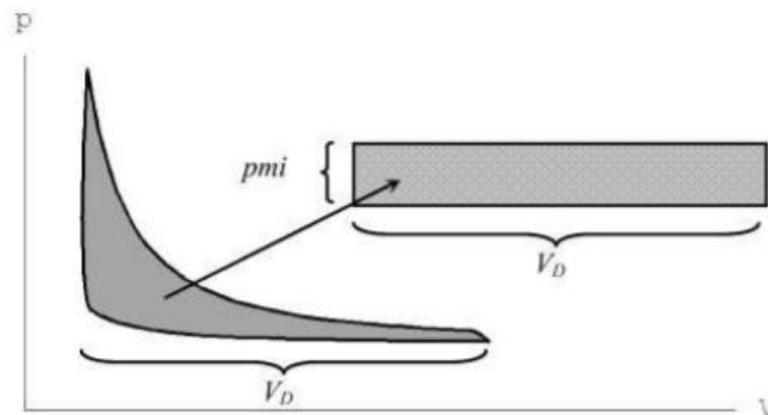
S_p : Carrera del pistón [mm]

Presión media indicada

Es la presión constante a la que debería trabajar el fluido durante una carrera, manteniendo la misma relación de compresión volumétrica, para obtener el mismo trabajo indicado, se puede considerar un parámetro equivalente al trabajo indicado, pero es independiente del tamaño del motor. (Muñoz & Rovira de Antonio, 2014)

Figura 11

Interpretación geométrica de la presión media indicada



Nota: Tomado del (Muñoz & Rovira de Antonio, 2014)

Potencia Indicada

Es la potencia correspondiente al trabajo indicado para un determinado régimen de giro, es decir, la velocidad de rotación del eje principal del compresor, viene dado por la siguiente ecuación: (Muñoz & Rovira de Antonio, 2014)

$$P_i = W_i * z * N * i \quad (21)$$

Donde:

z : Numero de cilindros

N : Velocidad del eje del compresor

$i = 1$: Una carrera de trabajo por Rev.

$i = 1/2$: Una carrera de trabajo por 2 Rev.

O a la vez desarrollando la ecuación (21) a términos detallados se podría representar como: (Kindler & Kynast, 2001)

$$P_i = \frac{p_{mi} * A_p * S_p * z * N}{6000} [kW] \quad (22)$$

Considerando las siguientes unidades de las siguientes variables:

p_{mi} : [bar]; A_p : [cm^2]; S_p : [m]; N : [rpm]; z : [adimensional]

Trabajo Mecánico

El trabajo mecánico se relaciona directamente de la potencia efectiva o conocida también como potencia útil, esta es aproximadamente un 10% menor que la potencia indicada, y se puede calcular mediante la siguiente ecuación: (Kindler & Kynast, 2001)

$$P_{MEC} = \frac{M_{motor} * N_{eje}}{9550} [kW] \quad (23)$$

Donde:

M_{motor} : Par motor [Nm]; $M_{motor} = F_t \times r$

F_t : Fuerza tangencial [N]

r : Brazo de palanca [m]

N_{eje} : Revoluciones de eje motor [rpm]

Eficiencias

Eficiencia volumétrica

La eficiencia de la operación de un cilindro está dada por:

$$n_{vol} = \frac{\text{volumen admitido al compresor}}{\text{volumen desplazado por el piston}} \quad (24)$$

Este término es de gran importancia en la aplicación práctica de los compresores de aire y compara la cantidad real de aire suministrada con el valor máximo teórico.

Considerando el boceto del diagrama P.V. diagrama que se muestra en la **Figura 10** el volumen admitido y el volumen desplazado por el pistón viene dado por:

$$n_{vol} = \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_3}$$

A las mismas condiciones de presión y temperatura la eficiencia volumétrica puede determinarse a partir del diagrama P.V. como:

$$n_{vol} = 1 - \frac{V_3}{V_s} \left(\frac{V_d}{V_c} - 1 \right)$$

$$n_{vol} = 1 - \frac{V_c}{V_s} \left(\left(\frac{P_c}{P_d} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right)$$

$$n_{vol} = 1 - \frac{V_c}{V_s} \left((r_p)^{\frac{1}{n}} - 1 \right)$$

$$n_{vol} = 1 - \frac{V_c}{V_s} \left[(r_p)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]$$

Donde:

V_c : Volumen de compensación

V_s : Volumen de arrastre

V_d : Volumen de desplazamiento

(25)

La eficiencia volumétrica es probablemente una de las eficiencias más variables que rige el rendimiento del compresor, donde se ve afectada por un gran número de variables tales como: relación de presión, temperatura de la cámara de compresión, velocidad del motor, geometría, tamaño y la sincronización de las válvulas. Estas variables pueden ser complicadas de evaluar, algunas pueden ser calificadas como

cuasi estáticos mientras que otras dependen completamente de los efectos que varían en el tiempo.

Por lo tanto, la eficiencia volumétrica se la puede expresar de la forma:

(Ambrozik, Kurczyński, & Łagowski, 2017)

$$n_{vol} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_l} = \frac{\dot{V}_r}{\dot{V}_l} \quad (26)$$

Donde:

\dot{m}_a : Masa de aire que ingresa al cilindro.

\dot{m}_l : Masa de aire del volumen desplazado.

\dot{V}_r : Volumen de aire que ingresa al cilindro.

\dot{V}_l : Volumen desplazado del cilindro.

La ecuación (26) define la relación entre el volumen de aire libre en condiciones atmosféricas estándar descargado en la carrera de entrega y el volumen barrido por el pistón durante la carrera. Por otro lado, el caudal masico de volumen de barrido teórico, es independiente de la relación de presión y el proceso de compresión, y puede ser visto como el caudal masico ideal del compresor para una geometría establecida sin espacio libre.

Idealmente, para cada ciclo debería ingresar una masa de carga fresca igual a la densidad del aire atmosférico. Sin embargo, debido al corto tiempo del ciclo la cantidad ideal de carga fresca que ingresa al cilindro es menor.

Por otro lado, la masa de aire del volumen desplazado se puede expresar como:

(Everett, 2010)

$$\dot{m}_l = \rho_{air} V_d N \quad (27)$$

Donde:

ρ_{air} : Densidad de aire [kg/m^3]

V_d : Volumen de barrido de un cilindro [m^3]

N : Velocidad de motor [rev/min]

La definición anterior es aplicable solo para un compresor atmosférico. Sin embargo, en el caso de un compresor sobrealimentado, la masa teórica de carga fresca debe calcularse en las condiciones de presión y temperatura que prevalecen en el colector de admisión.

$$\dot{m}_i = \frac{P_{int}}{T_{int} R} V_d N \quad (28)$$

Donde:

P_{int} : Presión de entrada a la cámara de compresión.

T_{int} : Temperatura de entrada a la cámara de compresión.

Eficiencia isotérmica

La potencia mínima indicada en el proceso de compresión se la obtiene cuando el índice n es mínimo. La compresión ideal es por lo tanto isotérmica donde n toma el valor de la unidad, es decir que la compresión isotérmica se realiza a temperatura constante.

La eficiencia isotérmica se define como: (Kejuruteraan)

$$\eta_{iso} = \frac{W_{is}}{W_i} \quad (29)$$

Para este caso ideal T_1 y T_2 son las temperaturas de entrada y salida respectivamente en la cámara de compresión.

Eficiencia mecánica

La eficiencia mecánica compara la cantidad de energía transmitida a los pistones como trabajo mecánico en la carrera de expansión a la que realmente alcanza al dinamómetro. Por lo tanto, es una relación de la potencia al freno entregada por un motor y la potencia indicada.

$$\eta_{mec} = \frac{W_i}{W_{mec}} \quad (30)$$

La ecuación (30) indica la eficiencia de una máquina que convierte el trabajo o energía suministrada en otra forma de trabajo o energía.

Adquisición de datos

El propósito de la adquisición de datos es medir un fenómeno físico, mecánico, térmico, eléctrico, etc., de la forma más simple posible, la cual consiste en tomar muestras del mundo real (sistemas analógicos) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otras electrónicas (sistemas digitales). Es decir, consiste en tomar un conjunto de señales físicas y convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar a través de un ordenador. (Gutierrez & Iturralde, 2017)

Figura 12

Adquisición de datos



Nota: Tomado de (Instruments, 2021)

Tal como se muestra en la **Figura 12** un sistema de adquisición de datos se compone básicamente de:

- Sensores y transductores
- Acondicionamiento de la señal
- Hardware y software

Sensores y transductores

Los transductores y sensores son el nexo entre el mundo real y el sistema de adquisición, donde dichos elementos transforman un fenómeno físico en señales eléctricas y como todo instrumento de medición éstos tienen un rango de trabajo. (Agüero, 2017)

Acondicionamiento de la señal

Las señales de los sensores muchas de las veces presentan ruido o son demasiado peligrosas para poder medirse de forma directa por lo que un acondicionamiento de señal ayuda a amplificar, atenuar, aislarla o filtrarla la señal para la entrada de una tarjeta de adquisición de datos. (Agüero, 2017)

Hardware y software

Dentro del sistema de adquisición de datos las señales analógicas medidas se convierten a un formato digital utilizando un conversor análogo-digital, dicho formato digital se transfiere a un ordenador. La conversión de la señal se realiza en dos etapas donde al principio se cuantifica la señal y luego pasa a codificarse.

En la práctica, las señales analógicas varían continuamente con el tiempo y un conversor A/D realiza "muestras" periódicas de la señal a una razón predefinida. (Agüero, 2017)

Capítulo III

Determinación del estado actual y correctivos principales

Equipo

La **Figura 13** muestra al equipo Gilbert Gilkes del laboratorio de Conservación de la Energía, dicha unidad consta de los siguientes componentes que se detallan a continuación:

Figura 13

Equipo de compresión de aire de dos etapas Gilbert Gilkes



Primera etapa

Tabla 1

Características técnicas de compresor primera etapa

Características	Fotografías
<ul style="list-style-type: none"> • Marca: <i>BroomWade</i> • Modelo: AC10 • Serie: D052/2330 • Numero de Cilindros: 2 • Diámetro: 66.7mm • Carrera: 63.5mm • Volumen barrido: 13.2pie³/min a 850 rpm • Rango de velocidad: 425 – 850 rpm • Presión máxima de descarga: 150 psi 	 

Nota: Tomado de documentación histórica Handbook

Segunda etapa

Tabla 2

Características técnicas de compresor segunda etapa

Características	Fotografías
<ul style="list-style-type: none"> • Marca: <i>BroomWade</i> • Modelo: AC7 • Serie: D031/5145 • Numero de Cilindros: 2 • Diámetro: 50.8mm • Carrera: 50.8mm • Volumen barrido: 6.1 pie^3/min a 850 rpm • Rango de velocidad: 425 – 850 rpm • Presión máxima de descarga: 150 psi 	

Nota: Tomado de documentación histórica Handbook

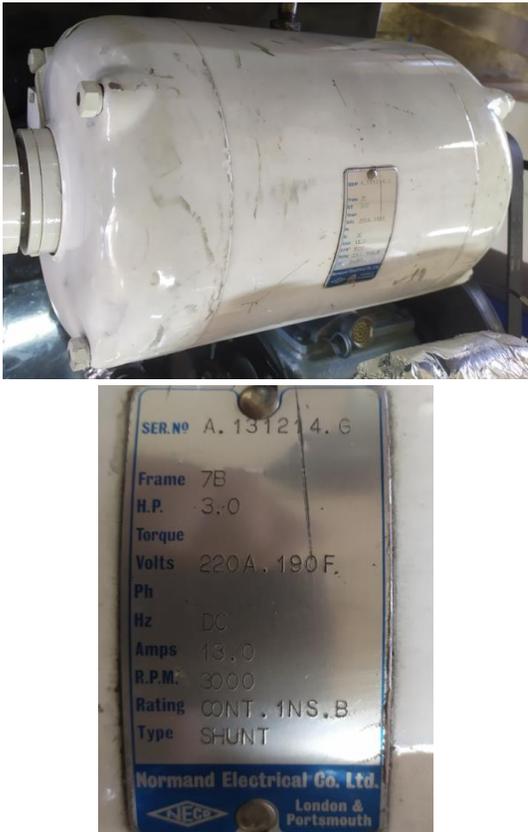
Tabla 3

Características técnicas de tanque de almacenamiento de aire

Características	Fotografías								
<ul style="list-style-type: none"> • Marca: COMPAIR <i>Welded Air Receiver</i> • Serie: 63442/124 • Código: 5169/3/E • Capacidad: 125 litros • Test P. Hyd: 18.0 bar • P. Diseño: 12. bar 	 <p>The top photograph shows a horizontal, cylindrical, light-colored metal air receiver tank mounted on a black metal frame. The bottom photograph is a close-up of a metal identification plate with the following text:</p> <p>COMPAIR Welded Air Receiver</p> <table border="1"> <tr> <td>No. DE. 63442 / 124</td> <td>CODE: 5169 / 3 / E</td> </tr> <tr> <td>Drg No. 17427 / 2</td> <td>Capacity. 125 litres</td> </tr> <tr> <td>Hyd. Test P. 18.0 bar</td> <td>Date 6 / 9 / 76</td> </tr> <tr> <td>Design. P. 12.0 bar</td> <td>Min. Design Temp °C</td> </tr> </table>	No. DE. 63442 / 124	CODE: 5169 / 3 / E	Drg No. 17427 / 2	Capacity. 125 litres	Hyd. Test P. 18.0 bar	Date 6 / 9 / 76	Design. P. 12.0 bar	Min. Design Temp °C
No. DE. 63442 / 124	CODE: 5169 / 3 / E								
Drg No. 17427 / 2	Capacity. 125 litres								
Hyd. Test P. 18.0 bar	Date 6 / 9 / 76								
Design. P. 12.0 bar	Min. Design Temp °C								

Nota: El tanque de almacenamiento cuenta con un desagüe para liberar el exceso de líquido que se acumula dentro del tanque, un manómetro para controlar la presión interior y una válvula de alivio de seguridad. (Taylor, 2020)

Tabla 4*Características técnicas de motor eléctrico*

Características	Fotografías
<ul style="list-style-type: none"> • Marca: Normand Electrical Co. Ltd- • Serie: A. 131214 • HP: 3.0 • Voltaje: 220A. 190F • Hz: DC • Amperaje: 13.0 • Rango de velocidad: 3000 r.p.m. • Tipo: Shunt 	

Nota: El arranque par motor (*Shunt*) es menor que en el motor serie, cuando el par motor aumenta, la velocidad de giro disminuye ligeramente y si la intensidad de corriente absorbida disminuye y el motor está en vacío, la velocidad de giro nominal varía levemente, es decir, es más estable que el motor en serie. (Villalba, 2011)

Intercambiador de calor

El intercambiador de calor del equipo es un tubo simple de doble flujo, el primer flujo es de aire y el segundo es de agua, siendo esta la cual absorbe el calor.

Como parámetros se obtienen el calor ganado por el agua y el perdido por el aire, respectivamente, los cuales se puede calcular con las siguientes formulas: (Rodriguez, 1990)

Tasa de calor ganado por el agua:

$$\dot{Q}_w \left[\frac{J}{s} \right] = \dot{m}_w * C_{p_w} * (T_{out} - T_{int}) \quad (31)$$

Donde:

\dot{m}_w : flujo masico de agua

C_{p_w} : Capacidad calorífica de agua

T_{out} : Temperatura de salida de agua

T_{int} : Temperatura de entrada de agua

Tasa de calor perdido por el aire:

$$\dot{Q}_a \left[\frac{J}{s} \right] = \dot{m}_a * C_{p_a} * (T_{int} - T_{out}) \quad (32)$$

Donde:

\dot{m}_a : flujo masico de aire

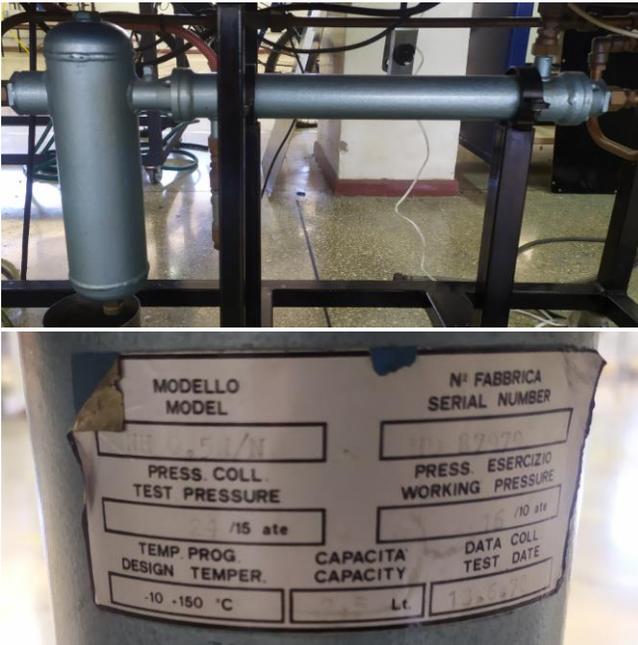
C_{p_a} : Capacidad calorífica de aire

T_{out} : Temperatura de salida de aire

T_{int} : Temperatura de entrada de aire

Tabla 5

Características técnicas de intercambiador de calor

Características	Fotografías												
<ul style="list-style-type: none"> • Modelo: NH 0.5 N/N • Serie: HD 87979 • Presión de prueba: 24 / 15 ate • Presión de trabajo: 16 / 10 ate • Temperatura de diseño: -10 / +150 °C • Capacidad: 2.5 Lt • Fecha de prueba: 13 / 6 / 78 	 <p>The top photograph shows a cylindrical heat exchanger unit mounted on a black metal frame in a laboratory setting. The bottom photograph is a close-up of a white label on the unit with the following text:</p> <table border="1" data-bbox="852 808 1388 1102"> <tr> <td>MODELLO MODEL</td> <td>N° FABBRICA SERIAL NUMBER</td> </tr> <tr> <td>PRESS. COLL. TEST PRESSURE</td> <td>PRESS. ESERCIZIO WORKING PRESSURE</td> </tr> <tr> <td>/15 ate</td> <td>/10 ate</td> </tr> <tr> <td>TEMP. PROG. DESIGN TEMPER.</td> <td>CAPACITA CAPACITY</td> <td>DATA COLL. TEST DATE</td> </tr> <tr> <td>-10 -150 °C</td> <td>Lt.</td> <td>13/6/78</td> </tr> </table>	MODELLO MODEL	N° FABBRICA SERIAL NUMBER	PRESS. COLL. TEST PRESSURE	PRESS. ESERCIZIO WORKING PRESSURE	/15 ate	/10 ate	TEMP. PROG. DESIGN TEMPER.	CAPACITA CAPACITY	DATA COLL. TEST DATE	-10 -150 °C	Lt.	13/6/78
MODELLO MODEL	N° FABBRICA SERIAL NUMBER												
PRESS. COLL. TEST PRESSURE	PRESS. ESERCIZIO WORKING PRESSURE												
/15 ate	/10 ate												
TEMP. PROG. DESIGN TEMPER.	CAPACITA CAPACITY	DATA COLL. TEST DATE											
-10 -150 °C	Lt.	13/6/78											

Instrumentos

Instrumentos de presión manométrica

Como instrumento para medir la presión del equipo tanto al ingreso como a la salida de los compresores en la primera y segunda etapa, se hace uso de manómetros de tubo de Bourdon, tal como se muestra en la **Figura 14**.

Figura 14*Manómetro de Bourdon Cambridge 14 bar**Instrumentos de presión diferencial*

Conocido también con el nombre de manómetro de dos ramas abiertas, este instrumento es un aparato que sirve para medir la diferencia de presión entre dos lugares. El fluido que utiliza el manómetro diferencial para indicar los valores puede ser cualquier líquido: agua, queroseno, alcohol, entre otros. La condición esencial es que no se mezcle con el fluido que está a presión. (Yanez, 2020)

Se hace uso de estos manómetros diferenciales para medir la presión diferencial a la entrada del compresor de primera etapa entre la presión ambiente y la presión de entrada al compresor, también se para medir la presión antes y después de la placa orificio, y finalmente la diferencia entre la presión del ambiente y a la salida del sistema.

Figura 15

*Manómetros Diferenciales Airflow Developments Ltd. Lancaster Rd. High Wycombe
England*



Indicador Graficador

En ambas etapas se cuenta con un indicador desarrollado por *H. MAIHAK AC*, el cual, es un pequeño instrumento que por lo general es operado mecánicamente el cual brinda una idea del funcionamiento de una variedad de máquinas operadas por presión (motores de vapor, motores de gas y aceite, compresores, condensadores e incluso pistolas) al comparar el aumento y la caída de la presión. durante el ciclo operativo. (Walter, 2013)

Figura 16

Indicador H. MAIHAK30-7527



Instrumentos de temperatura

El equipo originalmente tiene instalados en diferentes puntos esenciales, sondas de termopares TFA tipo J basados en norma francesa NF 42-323, dichos termopares están conectados a un lector múltiple analógico que cuenta con un mecanismo selector para leer la temperatura según el termopar elegido, mismos que cumplen sin problema su función.

Figura 17

Termocupla tipo J

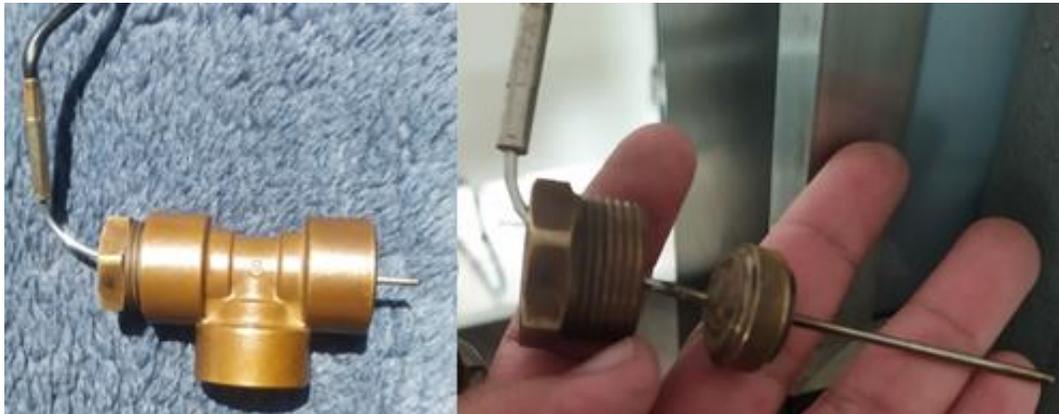
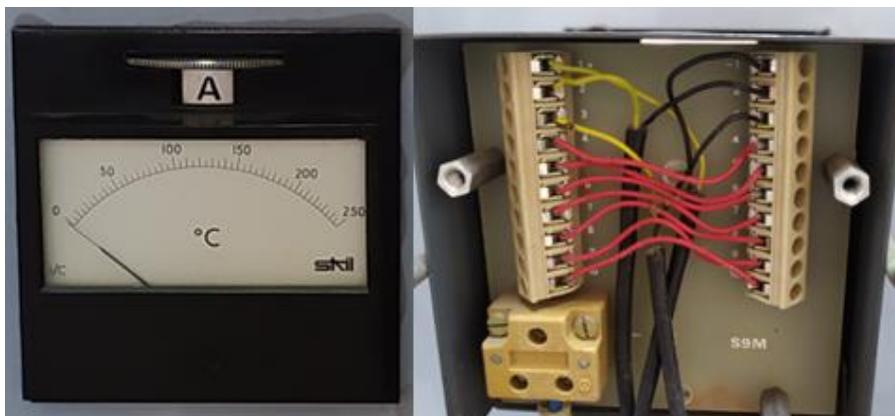


Figura 18

Instrumento analógico múltiple para medir temperatura, Marca SKIL



Instrumento de velocidad

Para medición de la velocidad del eje del compresor tanto de la primera etapa como de la segunda etapa el equipo dispone de un tacómetro marca *HARDINGS* (*LEEDS*) *LTD*, cuyo eje está conectado al eje del compresor con una banda de relación 1:1, y refleja el valor de la velocidad en el lector analógico.

Figura 19

Tacómetro marca HARDINGS velocidad máx.: 2000 rpm



Figura 20*Lector Analógico de Tacómetro HARDINGS****Determinación del Estado Actual***

En el laboratorio de Conservación de la Energía de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, dispone de un equipo de compresión de aire de dos etapas Gilbert Gilkes, el cual ha estado realizando prácticas con muchos inconvenientes de funcionamiento donde se han reportado en ciertos casos paros de emergencia durante las prácticas y las mismas que se han podido completar llevan algunos datos que han sido sugeridos por historiales de prácticas o por el laboratorista, esto debido a que ciertos instrumentos no han estado funcionando u otros funcionando con fallas.

A continuación, se enlistará algunos de los problemas a mayor detalle.

- Un problema crítico del equipo es que durante cierto tiempo ejecutándose la práctica, el motor de la primera etapa presenta un cabeceo y genera un golpeteo en el compresor, siendo riesgoso que dicho problema pudiese presentar una falla mecánica crítica sin posibilidad de corrección.

- El graficador mecánico de ambas etapas se encuentra fuera de servicio, por falta de partes de los mecanismos originales, así como la falta de papel graficador y la cuerda que sujeta al mecanismo eslabón del eje del compresor.
- El motor de la segunda etapa presenta un golpeteo al cierto tiempo de ejecución de la práctica.
- Manija de llave de rotámetro presenta fugas de agua mientras se está usando el inter enfriador.
- Manómetros diferenciales del tablero ubicados en la primera etapa se encuentran fuera de servicio por la falta de líquido manométrico y solamente uno de ellos de un total de tres manómetros funciona.
- Llave de condensado del tanque de almacenamiento de aire comprimido atascada.
- Dinamómetros de ambas etapas flojos se debe analizar su funcionamiento y su posible sustitución.

Correctivos Principales

Mantenimiento de compresores de primera y segunda etapa

Condiciones iniciales

- El compresor AC 10 (primera etapa) tiene una desviación en el eje que conecta a polea principal.

Figura 21

Evidencia de desviación de eje



- El compresor AC 10 presenta un golpeteo en las válvulas del cabezal.

Figura 22

Válvulas con evidencia de golpes



- En ambos compresores los elementos interiores como; cigüeñal, chaquetas, pistones, rines, válvulas y demás accesorios están deteriorados.

Figura 23

Destape de cárter, evidencia de deterioro de aceite



- El entredós (manzana) de ajuste del compresor AC7 presenta una falla (rajadura) provocando que por la operación genere un cabeceo no deseado.
- Presencia de aceite muy deteriorado en ambos compresores.
- Rodamientos de los ejes desgastados en ambos compresores.
- En el compresor AC10 las válvulas de descarga y de admisión se encuentran en mal estado (carbonizadas)

Figura 24

Evidencia de carbonización en válvulas

**Correctivos aplicados**

- Debido a la discontinuación de los compresores del equipo por su antigüedad los elementos como pastillas, empaquetaduras y rodamientos cónicos de rodillos no pueden ser cambiados por lo que se aplica limpieza y se hace pruebas.
- Adaptación de anillos, resortes y limpieza de válvulas aplicando un lavado con ultrasonido.

Figura 25

Válvulas sometidas a lavado con ultrasonido



Figura 26

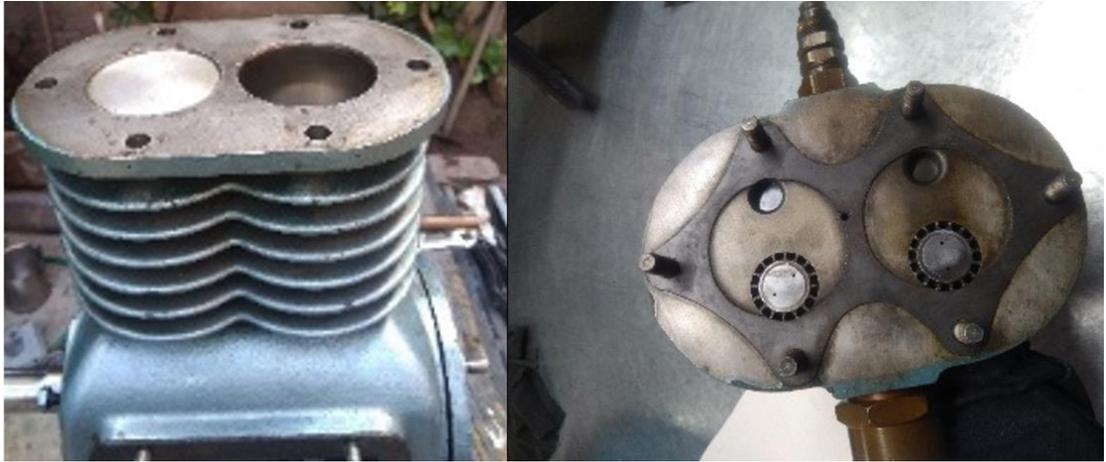
Comparación de partes antes y después del lavado



- Rectificación de eje principal en compresor AC10 de primera etapa.
- Construcción de nuevo entredós para el compresor AC7 de la segunda etapa.
- Sustitución de nuevos prisioneros de ejes pequeños.
- Limpieza de cámara cilíndrica y anillos de ambos compresores.

Figura 27

Limpieza de cámara cilíndrica



- Limpieza de Carter y cambio de aceite en ambos compresores.

Figura 28

Limpieza de Carter



Correctivos de Indicadores Graficadores Mecánicos.

El problema en relación con los indicadores es principalmente en la falta de accesorios necesarios para su operación, dichos accesorios son, el soporte de cuerda de un indicador, la llave de accionamiento entre la salida de compresor y el indicador, además se evidencio la existencia de un taponamiento del ducto de salida de aire al indicador en la primera etapa como se muestra en la **Figura 29** , y además la falta de papel graficador.

Figura 29

Evidencia de taponamiento de ducto de aire



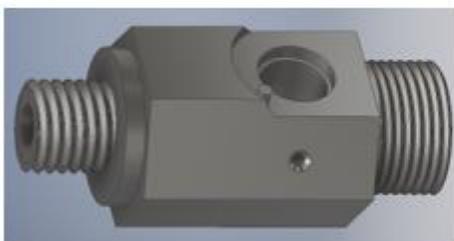
Figura 30

Dibujos CAD de llave de accionamiento previo envi  a mecanizado



Cuerpo: Acero Inoxidable 1/2 NPT – 3/4 NPT

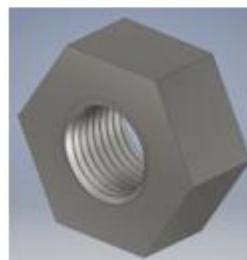
Mango: Madera - Inoxidable - Bronce,
M8x0.75



Anillo Guía: Acero Inoxidable



Tuerca: Acero Inoxidable, ID:M8x0.75



Se ha realizado pruebas con diferentes tipos de cuerdas para el uso del equipo, resultando la cuerda trenzada de hilo en poliéster de alta tenacidad con tratamiento de encerado, recomendando su lubricación antes del uso del equipo para evitar su deterioro y siendo indispensable sustituirlo periódicamente.

El tipo de papel que viene original con la máquina no cuenta con un registro, por lo que se ha probado con otros tipos de papel disponibles en el mercado, obteniendo resultados favorables al emplear papel químico térmico de bajo gramaje.

Mantenimiento Correctivo en sello de llave de flujo de rotámetro

Se evidencia la fuga en la llave de flujo de rotámetro ubicada en el tablero de la segunda etapa, misma que se considera un riesgo grave ya que debajo de dicho tablero se encuentra la caja de accionamiento del reóstato que alimenta al motor eléctrico DC compuesta de varios elementos alimentados con energía eléctrica.

Figura 31

Identificación de falla en sello de llave de flujo de rotámetro

Ubicación de Llave en Tablero



Extracción de Llave



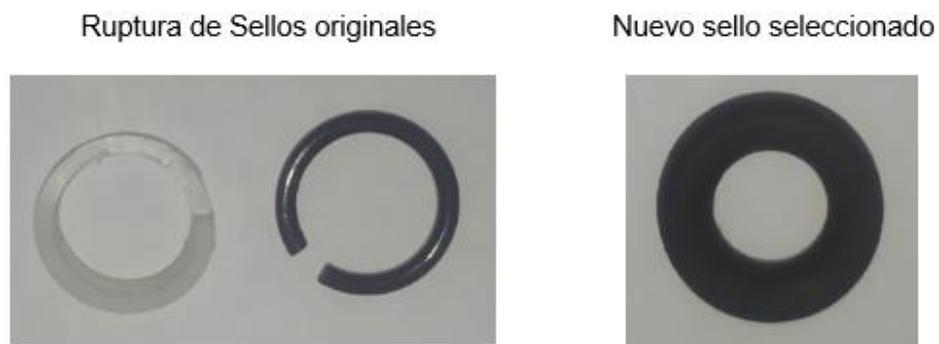
Alojamiento de llave



En el desmontaje de la llave se logra constatar la causa de la falla y es la ruptura parcial del sello espiral de material polímero y la falla completa del o-ring de nitrilo, tras la discontinuación de repuestos para la maquina se procede a reemplazar el sello con uno que se encuentre disponible en el mercado.

Figura 32

Sellos mecánicos



Nota: Lado izquierda sello espiral y nitrilo roto, lado derecho sello nuevo O-ring 5-211 PARKER.

Figura 33

Información Técnica de Proveedor de O-Ring 5-211 PARKER



Para la selección del o-ring adecuado se debe tomar al menos tres consideraciones generales de diseño en una junta tórica.

- Compresión por compresión de junta tórica
- Estiramiento instalado con junta tórica
- Porcentaje de llenado de junta tórica

Compresión por compresión de junta tórica.

$$\frac{(CS \text{ espesor de oring}) - Prof. \text{ de ranura} \left(\frac{OD - ID}{2} \right)}{CS \text{ espesor de oring}} \times 100\% \quad (33)$$

Criterio de Validación

En uso estático es válido en un valor entre 18% al 25%

Cálculos:

$$\frac{(4.75mm) - \left(\frac{17.5mm - 10mm}{2} \right)}{4.75mm} \times 100\% = \mathbf{21.05\%} \cong \mathbf{21\%}$$

Estiramiento instalado con junta tórica

$$\frac{ID \text{ ranura} - ID \text{ oring}}{ID \text{ oring}} \times 100\% \quad (34)$$

Criterio de Validación: En junta de nitrilo la regla general es de 0% al 5%

Cálculos:

$$\frac{10mm - 9.53mm}{9.53mm} \times 100\% = \mathbf{4.93\%} \cong \mathbf{5\%}$$

Porcentaje de llenado de junta tórica:

$$\frac{Volumen \text{ de oring} \left(\frac{\pi^2 * D * d^2}{4} \right)}{Vol. \text{ ranura} (Prof. \text{ ranura} Ancho \text{ de ranura} * \pi * (ID \text{ ranura} + Prof. \text{ ranura}))} \times 100\% \quad (35)$$

Criterio de Validación: 30% de espacio vacío o máximo 85% de relleno nominal

Cálculos:

$$\frac{\left(\frac{\pi^2 * (9.53mm + 4.75mm) * (4.75mm)^2}{4} \right)}{(3.75mm * 5.75mm * \pi * (10mm + 3.75mm))} \times 100\% = \mathbf{85.35\%} \cong \mathbf{85\%}$$

Mantenimiento preventivo de Reóstato de primera etapa

Durante la revisión del estado de las cajas de control para alimentar los motores DC se evidencia que el reóstato de la primera etapa presenta rastro de arco eléctrico (quemaduras en terminales) producto de un falso contacto eléctrico.

Figura 34

Evidencia de falso contacto eléctrico



Por lo que se realiza un mantenimiento de los reóstatos, haciendo una limpieza total, corrigiendo los contactos, eliminando impurezas de las escobillas, lubricando los rulimanes de las jaulas y barnizando el material resistivo.

Figura 35

Reóstato partes internas



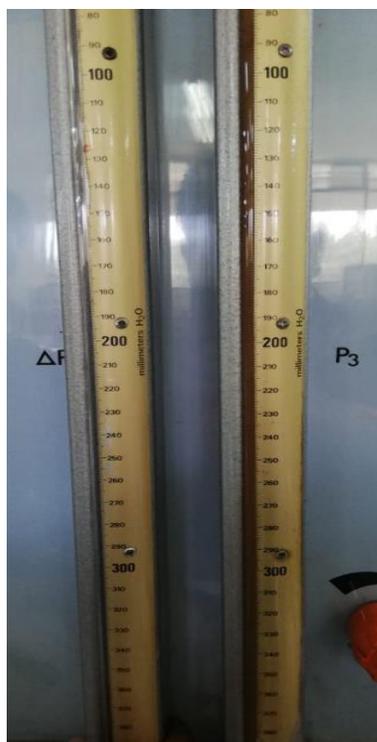
Nota: La imagen de lado izquierdo muestra el lubricado de rulimanes y la imagen de lado derecho muestra cómo se realizó el barnizado de reóstato.

Mantenimiento de Manómetros Diferenciales.

En la revisión de los manómetros diferenciales ubicados en la primera etapa, solo uno cuenta con líquido manométrico pero el tubo del instrumento presenta demasiada suciedad lo que dificulta la fácil apreciación del instrumento al momento de tomar la medida, los otros dos manómetros no cuentan con líquido manométrico, según reportes de los mantenimientos realizados, el primero de ellos con el tiempo pierde el líquido manométrico por fugas mientras que en el segundo el nivel que marca el instrumento se queda estancado.

Figura 36

Manómetros de columnas de agua



Nota: Comparativa de manómetro, de lado izquierdo manómetro luego de haberse realizado limpieza y lado derecho evidencia de manómetro con impurezas.

La limpieza se realizó con líquido limpia carburador y secado al ambiente, como se evidencia en la **Figura 36**, el resultado de la limpieza es indudable.

Para el llenado del líquido manométrico se consideró un fluido de la misma gravedad específica que tenía el líquido manométrico original (SG. 0.784 at 20°C – 68°F).

Figura 37

Líquido manométrico



Nota: Lado izquierdo recipiente de líquido manométrico original, lado derecho recipiente de líquido manométrico implementado.

En cuanto al manómetro que presento fugas se desarmó la carcasa protectora y se realizó pruebas en el mismo encontrando la fuga y corrigiéndola con soldadura al frío epoxi (Pegatanke), luego de 24 horas tiempo de curado sugerido por el producto, se realiza nuevas pruebas y sin evidencia de fugas, las características de este producto se encuentran detalladas en el anexo A.

Figura 38

Parte superior de manómetro sellado con soldadura en frío



Posteriormente se calibra cada uno los manómetros diferenciales con ayuda de un manómetro medidor de vacío (TESTO 552 – Vacuumstick).

Capítulo IV

Descripción de los elementos instalados en el sistema de monitoreo de datos

Para determinar los diferentes tipos de sensores que se van a instalar dentro del sistema de monitoreo, se tomó en cuenta las especificaciones técnicas de cada uno de ellos, así como el valor económico y su acceso dentro del mercado ecuatoriano.

Sensores de presión

El monitoreo de la presión de compresión es de suma importancia dentro de la seguridad de todo el sistema ya que el usuario debe tener en cuenta cuando se debe liberar la presión del tanque de almacenamiento para evitar que se accione la válvula de seguridad de dicho tanque que está bajo condiciones establecidas por el diseñador.

Para la selección de los sensores de presión debemos tener en cuenta las presiones máximas y mínimas con las que trabaja el compresor de doble etapa.

Tabla 6*Sensores de presión primera y segunda etapa*

Variable susceptible a medición	Variable susceptible a medición
Sensor 1	Presión a la entrada de la cámara de compresión de la primera etapa
Sensor 2	Presión a la salida de la cámara de compresión de la primera etapa
Sensor 3	Presión a la entrada de la cámara de compresión de la segunda etapa
Sensor 4	Presión a la salida de la cámara de compresión de la segunda etapa
Sensor 5	Presión diferencial de la placa orificio
Sensor 6	Presión a la salida de la placa orificio

Nota: Esta tabla muestra todos los sensores necesarios dentro del sistema de compresión de doble etapa.

Parámetros de medición de la presión

- Presión a la entrada de la cámara de compresión de la primera etapa: 400 [mm de H₂O]
- Presión a la salida de la cámara de compresión de la primera etapa: 14 [bar]
- Presión a la entrada de la cámara de compresión de la segunda etapa: 14 [bar]
- Presión a la salida de la cámara de compresión de la segunda etapa: 14 [bar]

- Presión diferencial de la placa orificio: 400 [mm de H₂O]
- Presión a la salida de la placa orificio: 400 [mm de H₂O]

Estos valores fueron obtenidos del documento del fabricante y dicha información fue contrastada con las caratulas de los sensores analógicos que están instalados de fabrica en el equipo de compresión de dos etapas.

De acuerdo al rango de operación se define que necesitamos dos tipos de sensores para medir todas las variables necesarias durante la puesta en marcha del equipo.

Sensor de presión línea de baja

Luego de realizar un análisis de varios sensores de presión que cumplan con las características técnicas requeridas y su accesibilidad dentro del mercado nacional se determinó que las opciones disponibles son:

- Sensor de presión diferencial *Freescale* MPXV5004DP
- Sensor de presión *Freescale* MPX2010DP

Por lo que mediante la aplicación de una matriz de selección se escogerá la opción que más se adapte a nuestras necesidades.

Tabla 7

Matriz de selección de sensor de presión línea de baja

Factores	Ponderación	Sensor	Sensor
		MPX10DP	MPXV5004DP
Características técnicas	30%	8	10
Costo	20%	10	9
Disponibilidad en el mercado	30%	9	10
Facilidad de montaje	20%	7	7

Factores	Ponderación	Sensor	Sensor
		MPX10DP	MPXV5004DP
Puntuación total	100%	8.5	9.2

Por medio de la matriz de selección se determina que el sensor MPXV5004DP cumple con las características técnicas requeridas.

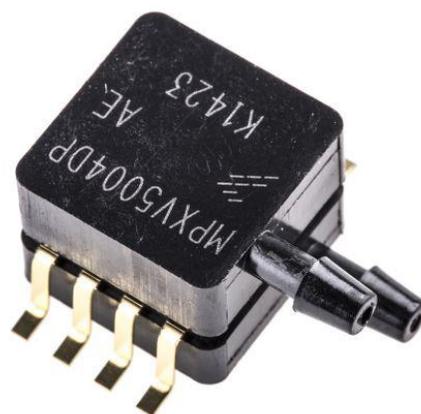
El transductor piezoresistivo de la serie MPXV5004 es un sensor de presión de silicio monolítico diseñado para una amplia gama de aplicaciones, pero particularmente aquellos que emplean un microcontrolador o microprocesador con entradas analógicas/digitales, para mayor información revisar anexo B.

Este tipo de sensor combina una galga extenso métrica implantada altamente sensible con avanzada técnicas de micro maquinado, para proporcionar una señal de salida analógica precisa y de alto nivel que sea proporcional a la presión aplicada.

(Freescale, 2015)

Figura 39

Sensor de presión diferencial MPXV5004



Nota: Tomando de (Freescale, 2015)

El sensor de presión diferencial MPXV5004 presenta las siguientes características:

Tabla 8

Características de sensor MPXV5004

Características	Tipo	Unidades
Rango de presión	0 - 3.92	kPa
	0 - 400	mm H2O
Voltaje de alimentación	5	V _{DC}
Temperatura de Operación	10 – 60	°C
Exactitud	±6.25%	N/A
Corriente de suministro	10	mA

Sensor de presión línea de alta

Luego de realizar un análisis de varios sensores de presión que cumplan con las características técnicas requeridas y su accesibilidad dentro del mercado nacional se determinó que las opciones disponibles son:

- Sensor de presión AKOZON
- Sensor de presión LEMORE

Por lo que mediante la aplicación de una matriz de selección se escogerá la opción que más se adapte a nuestras necesidades.

Tabla 9

Matriz de selección de sensor de presión línea de alta

Factores	Ponderación	Sensor AKOZON	Sensor LEMORE
Características técnicas	30%	10	9
Costo	20%	10	7
Disponibilidad en el mercado	30%	9	10
Facilidad de montaje	20%	6	6
Puntuación total	100%	8.9	8.3

Por medio de la matriz de selección se determina que el sensor AKOZON cumple con las características técnicas requeridas, misma que se encuentran en el anexo D.

Figura 40

Transductor de presión AKOZON



El sensor de presión AKOZON presenta las siguientes características:

Tabla 10*Características técnicas de sensor de presión AKOZON*

Características	Tipo	Unidades
Rango de presión	0 - 20	bar
	0 - 300	psi
Voltaje de alimentación	5	V _{DC}
Salida de tensión lineal	0.5 – 4.5	V _{DC}
Tipo de rosca	$\frac{1}{8}$ - 27	NPT
Corriente de suministro	20	mA

Sensores de temperatura

Para la selección de los sensores de temperatura debemos tener en cuenta las temperaturas máximas y mínimas del fluido de trabajo (aire).

Tabla 11*Sensores de temperatura primera y segunda etapa*

Variable susceptible a medición	Variable susceptible a medición
Sensor 1	Temperatura a la entrada de la cámara de compresión de la primera etapa
Sensor 2	Temperatura a la salida de la cámara de compresión de la primera etapa
Sensor 3	Temperatura a la entrada de la cámara de compresión de la segunda etapa
Sensor 4	Temperatura a la salida de la cámara de compresión de la segunda etapa
Sensor 5	Temperatura del aire comprimido a la entrada del intercambiador de calor
Sensor 6	Temperatura del aire comprimido a la salida del intercambiador de calor
Sensor 7	Temperatura de agua a la entrada del intercambiador de calor
Sensor 8	Temperatura de agua a la salida del intercambiador de calor

Parámetros de medición de la temperatura

- Temperatura a la entrada de la cámara de compresión de la primera etapa:
20 °C

- Temperatura a la salida de la cámara de compresión de la primera etapa:
100 °C
- Temperatura a la entrada de la cámara de compresión de la segunda etapa:
60 °C
- Temperatura a la salida de la cámara de compresión de la segunda etapa:
150 °C
- Temperatura del aire comprimido a la entrada del intercambiador de calor:
60 °C
- Temperatura del aire comprimido a la salida del intercambiador de calor: 60
°C
- Temperatura de agua a la entrada del intercambiador de calor: 20°C
- Temperatura de agua a la salida del intercambiador de calor: 20°C

Estos valores fueron obtenidos del documento del fabricante y dicha información fue contrastada con los históricos que se encuentran en los registros de las prácticas de laboratorio.

De acuerdo al rango de operación se define que necesitamos dos tipos de sensores de temperatura para medir todas las variables necesarias durante la puesta en marcha del equipo.

Sensor de temperatura línea de baja

Luego de realizar un análisis de varios sensores de temperatura que cumplan con las características técnicas requeridas y su accesibilidad dentro del mercado nacional se determinó que las opciones disponibles son:

- Sensor de temperatura DS18B20
- Sensor de temperatura LM35

Por lo que mediante la aplicación de una matriz de selección se escogerá la opción que más se adapte a nuestras necesidades.

Tabla 12

Matriz de selección de sensor de temperatura línea de baja

Factores	Ponderación	Sensor DS18B20	Sensor LM35
Características técnicas	30%	10	10
Costo	20%	10	5
Disponibilidad en el mercado	30%	9	9
Facilidad de montaje	20%	10	6
Puntuación total	100%	9.7	7.9

Por medio de la matriz de selección se determina que el sensor DS18B20 cumple con las características técnicas requeridas.

El sensor DS18B20 tiene una gran versatilidad por lo que este tipo de sensor cuenta con una protección tipo encapsulado que protege al sensor de cualquier agente externo, además este tipo de sensor puede derivar energía directamente desde la línea de datos eliminando la necesidad de una fuente de alimentación externa. El DS18B20 se comunica a través de un bus de un cable es decir que solo requiere de una línea de datos para la comunicación entre el microcontrolador y el sensor.

Por otro lado, el DS18B20 cuenta con un código de serie único de 64 bits para su control y programación mismo que permite el funcionamiento de varios DS18B20 en tiempo real, revisar anexo C.

Figura**41***Sensor de temperatura DS18B20*

El sensor de temperatura DS18B20 presenta las siguientes características:

Tabla 13*Características técnicas de sensor DS18B20*

Características	Tipo	Unidades
Voltaje de alimentación	3 - 5.5	V _{DC}
Temperatura de Operación	-55 - 125	°C
Precisión	± 0.5	°C
Corriente de suministro	4	mA
Protección de capsula metálica	N/A	N/A

Sensor de temperatura línea de alta

Luego de realizar un análisis de varios sensores de temperatura para la línea de alta que cumplan con las características técnicas requeridas y su accesibilidad dentro del mercado nacional se determinó que las opciones disponibles son:

- Sensor de temperatura Pt 100

- Sensor de temperatura termopar tipo K

Por lo que mediante la aplicación de una matriz de selección se escogerá la opción que más se adapte a nuestras necesidades.

Tabla 14

Matriz de selección de sensor de temperatura línea de alta

Factores	Ponderación	Sensor termopar tipo K	Sensor Pt 100
Características técnicas	30%	10	10
Costo	20%	9	6
Disponibilidad en el mercado	30%	9	9
Facilidad de montaje	20%	10	7
Puntuación total	100%	9.5	8.3

Por medio de la matriz de selección se determina que el sensor termopar tipo K cumple con las características técnicas requeridas.

Figura 42

Termopar tipo K



El sensor de temperatura termopar tipo K presenta las siguientes características:

Tabla 15*Características técnicas de termopar tipo K*

Características	Tipo	Unidades
Tipo de termopar	<i>Cromel - Alumel</i>	N/A
Temperatura de Operación	0 - 450	°C
Protección	Fibra de vidrio enmallada	N/A
Tipo tornillo	1/4	in

Sensores de velocidad

Para la selección de los sensores de velocidad debemos tener en cuenta las revoluciones máximas y mínimas con las que trabaja el compresor de doble etapa una vez puesto en marcha.

Tabla 16*Sensores de velocidad primera y segunda etapa*

Variable susceptible a medición	Variable susceptible a medición
Sensor 1	Velocidad del cigüeñal del compresor de la primera etapa
Sensor 2	Velocidad del cigüeñal del compresor de la segunda etapa

Parámetros de medición de la velocidad

- Velocidad del cigüeñal del compresor de la primera etapa: 450 – 800 [rpm]
- Velocidad del cigüeñal del compresor de la segunda etapa: 450 – 800 [rpm]

Estos valores fueron obtenidos del documento del fabricante donde especifica el rango de velocidad a las que debe operar el equipo de compresión y dicha información fue contrastada con las caratulas de los sensores analógicos que están instalados de fábrica.

Luego de realizar un análisis de varios sensores de velocidad que mejor se adapten con las características técnicas requeridas y su accesibilidad dentro del mercado nacional se determinó que las opciones disponibles son:

- Sensor de Infrarrojos FC-51
- Sensor de velocidad HC-020K

Por lo que mediante la aplicación de una matriz de selección se escogerá la opción que más se adapte a nuestras necesidades.

Tabla 17

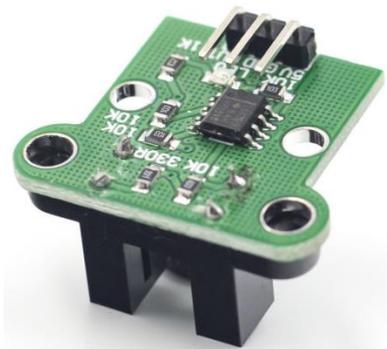
Matriz de selección de sensor de velocidad

Factores	Ponderación	Sensor de	Sensor de velocidad
		Infrarrojos FC-51	HC-020K
Características técnicas	30%	10	10
Costo	20%	10	10
Disponibilidad en el mercado	30%	9	9
Facilidad de montaje	20%	8	10
Puntuación total	100%	9.3	9.7

Por medio de la matriz de selección se determina que el sensor de velocidad HC-020K cumple con las características técnicas requeridas, dicha información se encuentra detallada en el anexo E.

Figura 43

Sensor de velocidad HC-020K



El sensor de velocidad HC-020K presenta las siguientes características:

Tabla 18

Características técnicas de sensor HC-020K

Características	Tipo	Unidades
Voltaje de alimentación	4.5 – 5.5	V
Frecuencia de medición	100	Khz
Precisión	0.01	mm
Resolución	20 líneas	N/A
Señal de salida	a, b, dos vías nivel TTL	N/A

Microcontrolador

Para la selección del dispositivo de adquisición de datos se tendrá en cuenta las características de los sensores seleccionados.

Luego de realizar un análisis de varios microcontroladores que mejor se adapten con las características técnicas requeridas y su accesibilidad dentro del mercado nacional se determinó que las opciones disponibles son:

- *National Instruments* NI myRIO1900
- *National Instruments* NI USB6210
- Arduino ATmega2560

Por lo que mediante la aplicación de una matriz de selección se escogerá la opción que más se adapte a nuestras necesidades.

Tabla 19

Matriz de selección de tarjeta microcontroladora

Factores	Ponderación	NI	NI	Mega
		myRIO1900	USB6210	2560
Características técnicas	30%	10	10	8
Costo	20%	6	8	10
Disponibilidad en el mercado	30%	7	7	10
Facilidad de montaje	20%	9	9	9
Puntuación total	100%	8.1	8.5	9.2

Por medio de la matriz de selección se determina que el microcontrolador ATmega2560 cumple con las características técnicas requeridas.

Figura 44

Arduino Mega 2560

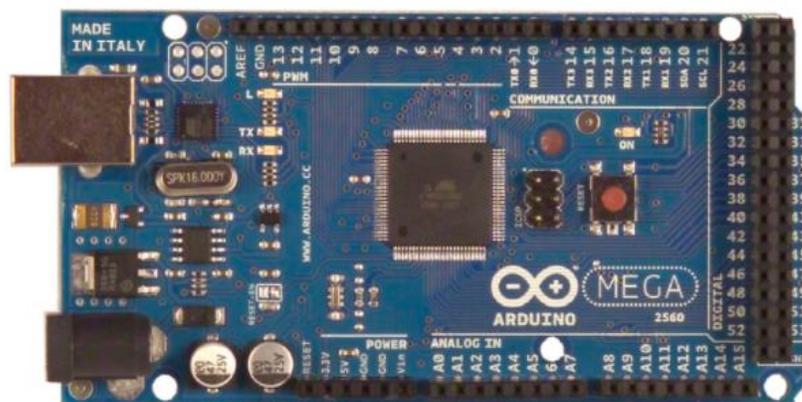


Tabla 20

Características técnicas de microcontrolador Arduino Mega

Características	Tipo	Unidades
Voltaje de alimentación	7 - 12	V
Voltaje de operación	5	V
Pines E / S digitales	54	N/A
Pines de entrada analógica	16	N/A
Memoria Flash	256	Kb
SRAM	8	Kb
EEPROM	4	Kb
Velocidad de reloj	16	MHz

Pantalla de monitoreo

Para la selección de la pantalla donde se visualizará la información se tendrá en cuenta las características del microcontrolador seleccionado.

Luego de realizar un análisis de varias pantallas que mejor se adapten con las características técnicas requeridas y su accesibilidad dentro del mercado nacional se determinó que las opciones disponibles son:

- Pantalla *Nextion*
- Pantalla *Tft*

Por lo que mediante la aplicación de una matriz de selección se escogerá la opción que más se adapte a nuestras necesidades.

Tabla 21

Matriz de selección de la pantalla de monitoreo

Factores	Ponderación	Pantalla Nextion	Pantalla Tft
Características técnicas	30%	10	8
Costo	20%	5	7
Disponibilidad en el mercado	30%	7	7
Facilidad de montaje	20%	9	9
Puntuación total	100%	7.9	7.7

Por medio de la matriz de selección se determina que la pantalla Nextion cumple con las características técnicas requeridas.

Figura 45*Pantalla Nextion NX4832T035***Tabla 22***Características técnicas de la pantalla Nextion*

Características	Tipo	Unidades
Resolución	320 x 240	px
Área de visualización	48.96 x 36.72	mm
ROM	32	MB
Color	65	K
Memoria Flash	256	b
RAM	8192	b
EEPROM	1024	b
Buffer de instrucciones	1024	b

Instalación de los elementos e implementación del circuito de acondicionamiento de señal

Es necesaria la instalación de un panel de control (tablero principal) dentro de nuestro sistema que proteja las conexiones y partes electrónicas de agentes externos como el polvo, agua y la manipulación de componentes de personas extrañas al laboratorio.

Tablero principal

En el tablero principal se encuentran los elementos tales como: fuentes de poder, placas de circuito impreso, pantalla táctil, sensores de presión diferencial, indicadores, interruptor y el microcontrolador. Los componentes dentro del tablero principal se encuentran ubicados de tal forma que faciliten el cableado, conexión y posicionamiento de cada uno de ellos.

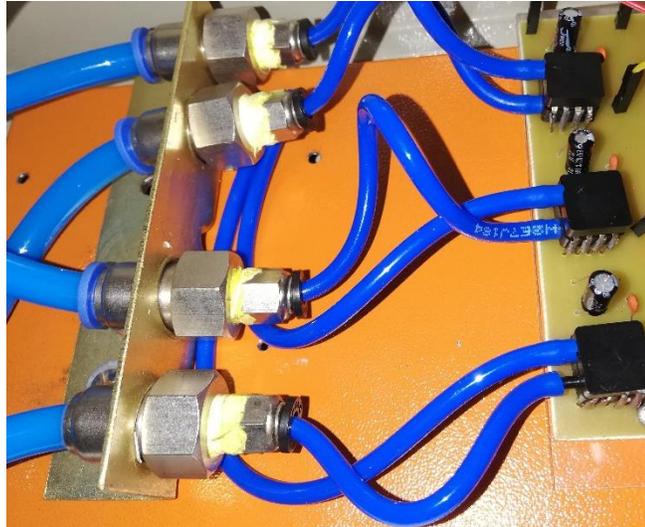
Instalación de los sensores de presión diferencial

Los sensores de presión diferencial se colocaron dentro del tablero principal para evitar la manipulación de dichos sensores y se los adecuó al equipo mediante acoples de conexión rápida y mangueras de poliuretano debido a que los sensores de la serie MPXV5004DP tienen un puerto de sensado doble de 4mm y el equipo de compresión trabaja con mangueras de poliuretano de 6 mm tal como se observa en la

Figura 46.

Figura 46

Sensores de presión diferencial con sus respectivos aditamentos



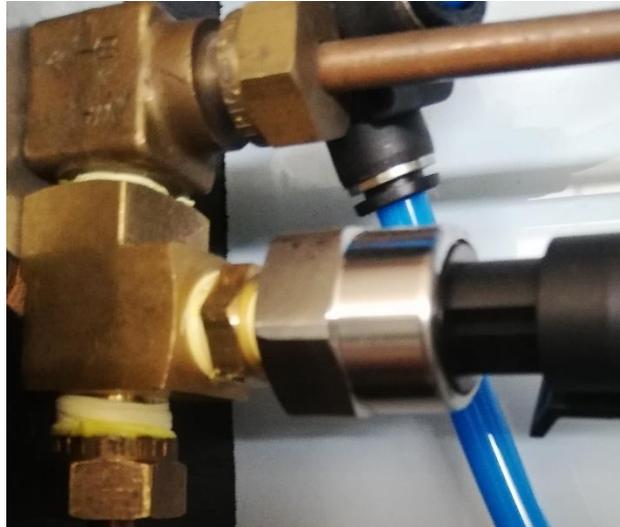
Instalación de los sensores de presión manométrica

Los sensores de presión se instalaron en la parte posterior de los compresores (gabinete propio del equipo) por facilidad ya que el equipo de compresión cuenta con una línea propia para los sensores analógicos, donde se colocó una “T” de bronce entre la línea de compresión y la línea de sensado.

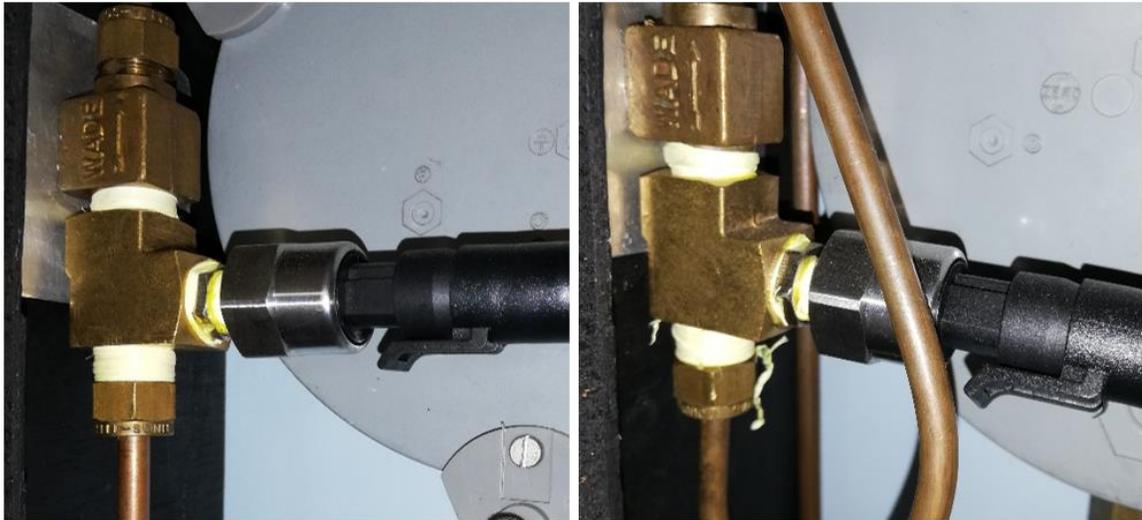
Sin embargo, la línea de compresión trabaja con una rosca de 1/4 " NPT y el sensor AKAZON tiene como entrada una rosca de 1/8 " NPT por lo que se optó por la opción de colocar un adaptador tipo *bushin* de 1/8 " a 1/4 " NPT como se puede ver en la **Figura 47**.

Figura 47

Sensor en compresor de alta primera etapa

**Figura 48**

Sensor en compresor de alta segunda etapa



(a)

(b)

Nota: (a) Sensor en compresor a la entrada de aire segunda etapa, (b) Sensor en compresor a la salida de aire segunda etapa

Instalación de termopares

Para la instalación de los termopares tipo K, al igual que con el sensor de presión fue necesario realizar algunas adecuaciones.

En la **Figura 49** se observa cómo se modificó un aditamento tipo “T” donde se colocó un adaptador de bronce que permita la inserción correcta y rápida del termopar tipo tornillo

Figura 49

Sensor en cañería de alta primera etapa



Figura 50

Sensor de temperatura en cañería de alta primera etapa



(a)

(b)

Nota: (a) Termopar en cañería a la entrada de cámara de compresión segunda etapa,
(b) Termopar en cañería a la salida de cámara de compresión segunda etapa.

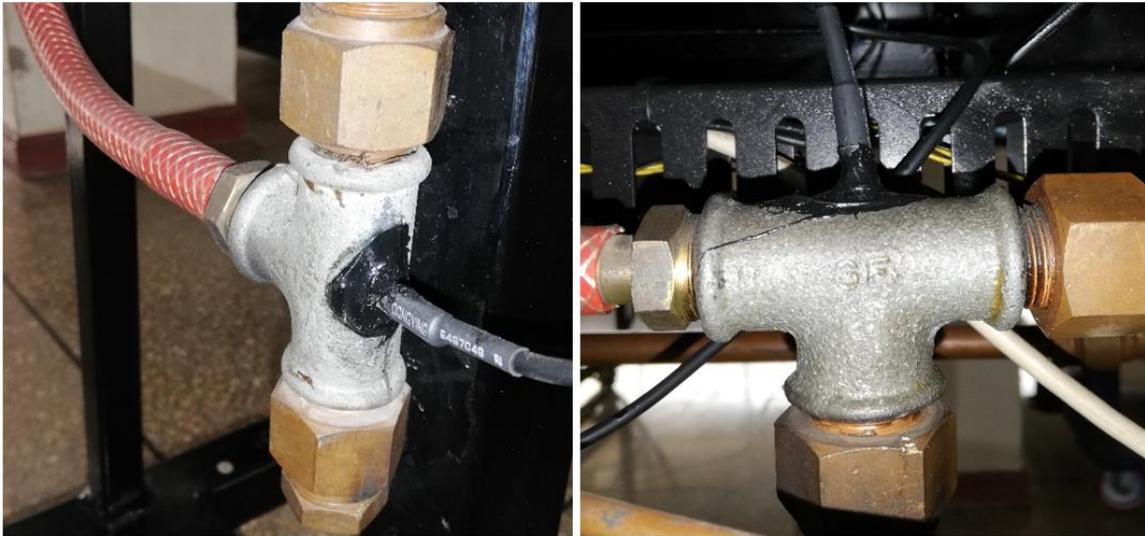
Instalación de sensores de temperatura

En la instalación de los encapsulados DS18B20 por facilidad se aprovecharon los puntos de conexión, al igual que con los termopares tipo K, se necesitó únicamente de perforar y sellar la línea de conexión.

En la **Figura 51** se observa los encapsulados ya instalados.

Figura 51

Sensor de temperatura tipo encapsulado en accesorio tipo "T"

***Instalación de encoders***

El sistema de compresión dispone de dos tacómetros, una para cada etapa de compresión. Estos tacómetros están conectados al eje del compresor mediante una banda de transmisión de relación 1:1, por lo que se aprovechó dicho componente para la instalación de los encoders y se adaptó el disco codificado al eje tal y como se muestra en la **Figura 52**.

Figura 52

Montaje de encoders



(a)

(b)

Nota: (a) Muestra cómo se realizó la instalación del sensor de velocidad al igual que el disco codificado al eje del compresor de la primera etapa, (b) Muestra cómo se realizó la instalación del sensor de velocidad al igual que el disco codificado al eje del compresor de la segunda etapa.

Implementación de circuitos de acondicionamiento

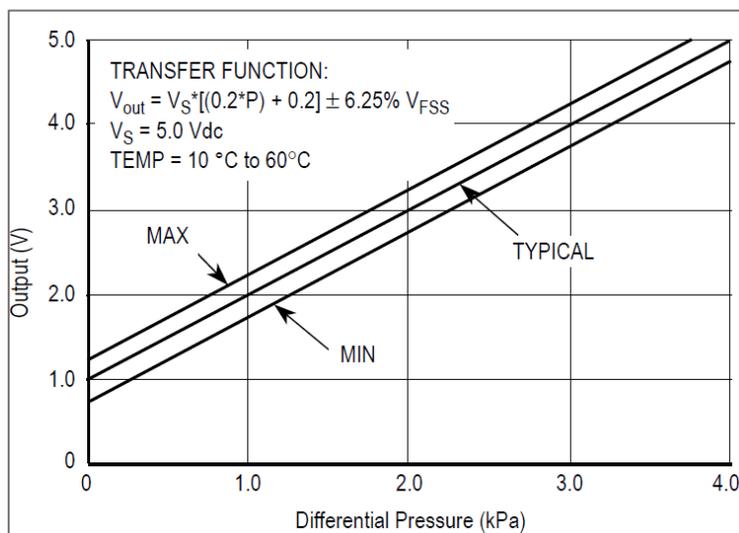
Una vez establecido el dispositivo de control y todas a características pertinentes de cada sensor se implementa el circuito de acondicionamiento para la señal de salida para que pueda ser adquirida y procesada por el microcontrolador.

Acondicionamiento de la señal del sensor de presión

La **Figura 53** muestra una linealidad entre el nivel de voltaje de salida y la presión diferencial por lo que su acondicionamiento resulta ser más sencillo ya que el fabricante nos proporciona dicho circuito de desacoplamiento tanto de la fuente de alimentación y el filtrado de salida.

Figura 53

Respuesta del sensor de presión MPXV5004DP



Nota: Tomado de (Freescale, 2015)

Modelo matemático para el sensor de presión MPXV5004DP

$$V_{out} = V_S \cdot [(0.2 \cdot P) + 0.2] \pm 6.25\% \quad (36)$$

Donde:

V_{out} : voltaje de salida [V]

V_S : voltaje de alimentación [V]

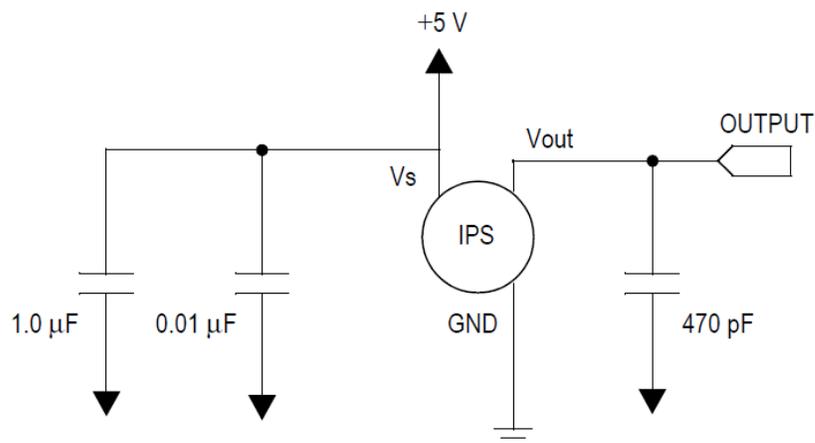
P : presión diferencial [kPa]

De acuerdo con la ecuación (36), para una entrada de 5 V como voltaje de alimentación se tiene una señal de salida de 4 V y por consecuencia se tiene una presión diferencial de 4 kPa actuando en el sensor de presión, es decir para un voltaje de salida de 1V se tiene una presión diferencial de 0 kPa y para un voltaje de salida de 5V se tiene una presión diferencia de 4 kPa. Sin embargo, debido a que el dispositivo controlador cuenta con entradas analógicas es necesario implementar un circuito de

acondicionamiento, mismo que ya viene especificado por el fabricante. Es importante señalar que el circuito debe ser independiente para cada sensor de presión diferencial.

Figura 54

Circuito de acondicionamiento del sensor MPXV5004DP



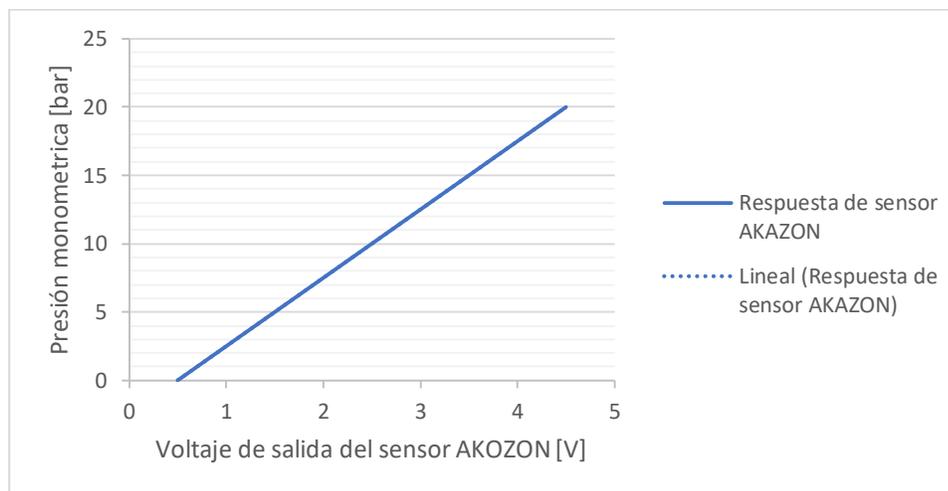
Nota: Tomado de (Freescale, 2015)

Por otra parte, los sensores de presión AKAZON con los que se está trabajando tienen una salida mínima de 0.5 V para una presión de 0 bares y una máxima de 4.5 V para una presión de 20 bares, valores con los que el microcontrolador trabaja ya que el pin conversor ADC soporta hasta 5 V.

Esto se puede observar en la **Figura 55**, que representa la respuesta del sensor.

Figura 55

Respuesta de sensor AKOZON



A partir de la **Figura 55** se obtuvo el modelo matemático que representa la salida de voltaje y la presión manométrica.

$$P = 5 \cdot V_{out} - 2,5 \quad (37)$$

Donde:

P : presión manométrica [bar]

V_{out} : voltaje de salida [V]

En la práctica, el compresor de doble etapa trabaja a una presión manométrica que alcanza los 15 bares como máximos valores, pero el fabricante recomienda la presión de trabajo de 12 bares ya que a dicha presión se libera la válvula de seguridad por lo que el sensor de presión funcionaria por debajo de los voltajes máximos de operación del microcontrolador.

Es importante señalar que las mismas consideraciones se tiene en cada etapa de compresión debido a que se puede trabajar únicamente con una sola etapa.

Acondicionamiento de la señal del Encoder

En el caso de los encoders estos tienen como salida una secuencia de pulsos que son registrados por los pines del microcontrolador por esta razón no es necesario

implementar un circuito acondicionador debido a la versatilidad del sensor de velocidad HC-020K.

Este tipo de sensor al recibir un voltaje de alimentación de 5 V la secuencia de pulsos que entrega es de 5 V con una amplitud del mismo valor.

Acondicionamiento de la señal del sensor de temperatura DS18B20

El encapsulado DS18B20 por sus características no requiere de un circuito de acondicionamiento de señal debido a que su salida ocupa una comunicación *One Wire* misma que es recibida a través de un pin digital del microcontrolador.

Sin embargo, el fabricante especifica que se requiere conectar una resistencia *pull up* en el pin de datos, esto permite mantener un estado alto cuando no se transmite datos para no solapar las comunicaciones y que el microcontrolador pueda detectar el inicio de comunicación con el sensor.

El fabricante establece que para una distancia menor a 5 m la resistencia que debe implementarse es de 4.7 k Ω y si se excede esta distancia la resistencia disminuye a 1 k Ω .

Acondicionamiento de la señal de los termopares

Los termopares del tipo transductor presentan una salida de voltaje demasiado pequeña y resulta complicado conectar dicha señal al ADC del microcontrolador por lo que, se optó en instalar una tarjeta de control MAX6675 la misma que se conecta con el microcontrolador por medio de una interfaz SPI unidireccional.

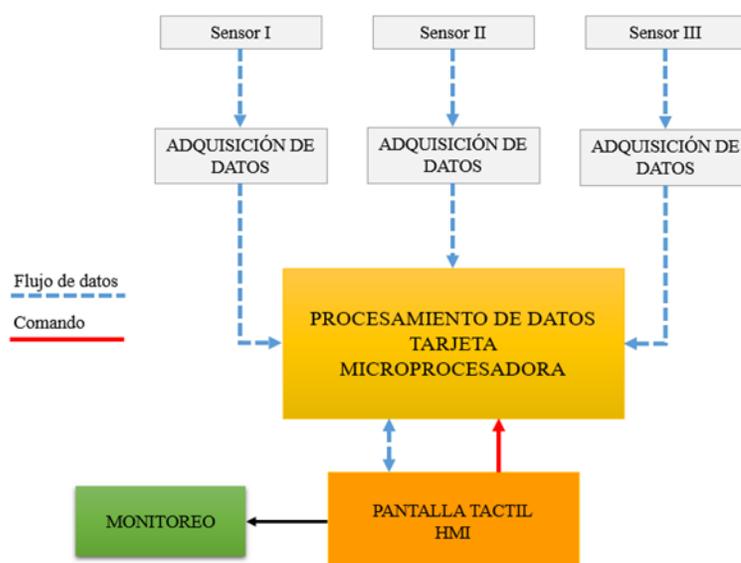
La tarjeta de control amplifica, compensa y convierte el voltaje generado por el termopar a una señal digital. Es importante tener en cuenta que la tarjeta de control MAX6675 cuenta con compensación de junta fría.

Diseño e implementación del interfaz humano maquina

Una vez instalados dentro del tablero principal todos los sensores, circuitos de acondicionamiento y otros elementos eléctricos es de suma importancia contar con un sistema de monitoreo de datos y para ello la **Figura 56** nos permite entender de mejor manera el sistema de monitoreo de datos desde otro punto de vista, en este caso desde la perspectiva del software, misma que al usuario le permite interpretar con mayor facilidad los valores de respuesta de los distintos sensores instalados en la máquina.

Figura 56

Arquitectura del programa



El compresor de dos etapas requiere la implementación de un sistema de monitoreo de datos, independiente para cada etapa debido a que el sistema de compresión puede operar solo con la primera etapa previo a unas modificaciones en la línea de aire de recibidor.

La HMI para la primera etapa de compresión necesita registrar las diferentes variables de cada sensor tal como se indica en la **Tabla 23**

Variables susceptibles a medición de la primera etapa de compresión.

La **Tabla 24** muestra todas las variables a ser medidas para la segunda etapa de compresión.

El anexo F muestra de mejor manera la conexión entre etapas y las variables a ser registradas.

Tabla 23

Variables susceptibles a medición de la primera etapa de compresión

No. Sensor	Variables susceptibles a medición
Sensor 1	Presión de entrada a la cámara de compresión
Sensor 2	Presión a la salida de la cámara de compresión
Sensor 3	Caída de presión a la salida de la primera etapa
Sensor 4	Presión a la salida de la primera etapa
Sensor 5	Temperatura a la entrada de la cámara de compresión
Sensor 6	Temperatura a la salida de la cámara de compresión
Sensor 7	Temperatura a la salida de la primera etapa
Sensor 8	Velocidad del cigüeñal del compresor

Tabla 24

Variables susceptibles a medición de la segunda etapa de compresión

No. Sensor	Variables susceptibles a medición
Sensor 1	Presión de entrada a la cámara de compresión
Sensor 2	Presión a la salida de la cámara de compresión

No. Sensor	Variables susceptibles a medición
Sensor 3	Temperatura de la entrada de aire al intercambiador de calor
Sensor 4	Temperatura de salida de aire del intercambiador de calor
Sensor 5	Temperatura de la entrada de agua al intercambiador de calor
Sensor 6	Temperatura de la salida de agua del intercambiador de calor
Sensor 7	Temperatura del aire a la entrada de la cámara de compresión
Sensor 8	Temperatura del aire a la salida de la cámara de compresión
Sensor 9	Velocidad del cigüeñal del compresor

Una vez identificadas cada una de las señales a digitalizar se procede a configurar la tarjeta controladora (arduino), asignando a cada una el tipo de variable y dirección que va a tener dentro del código de programación y a su vez establecer cada dirección que envía arduino a la pantalla *Nextion*.

La comunicación entre la pantalla *Nextion* y Arduino Mega, se lo llevara a cabo empleando una velocidad de comunicación de 9600 baudios, ya que esta velocidad es la más óptima para este tipo de dispositivos.

La **Figura 57** muestra la pantalla de inicio para el monitoreo de datos de la primera etapa de compresión donde se puede apreciar opciones de navegación que permite al usuario entender de mejor manera el sistema de compresión de aire, así como la visualización de todas las variables que se miden durante el funcionamiento del compresor, el código de programación de esta etapa se encuentra en el Anexo J.

Esta ventana presenta las siguientes herramientas de navegación:

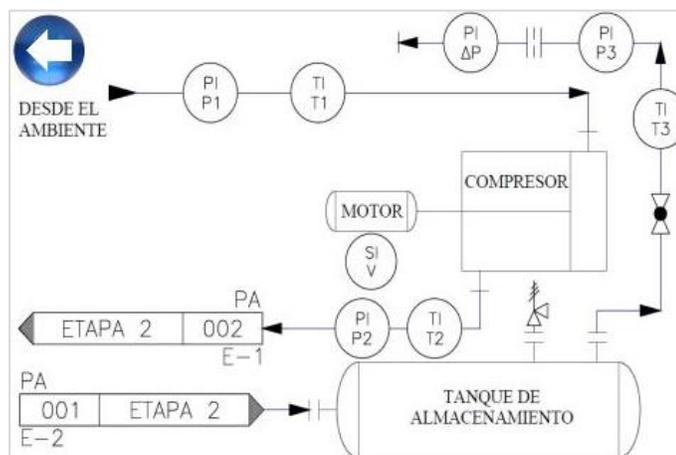
- Información del equipo de trabajo PID para la primera etapa de compresión (Info).
- Monitoreo de variables del sistema de compresión (Datos)

Figura 57

Pantalla de inicio HMI primera etapa

**Figura 58**

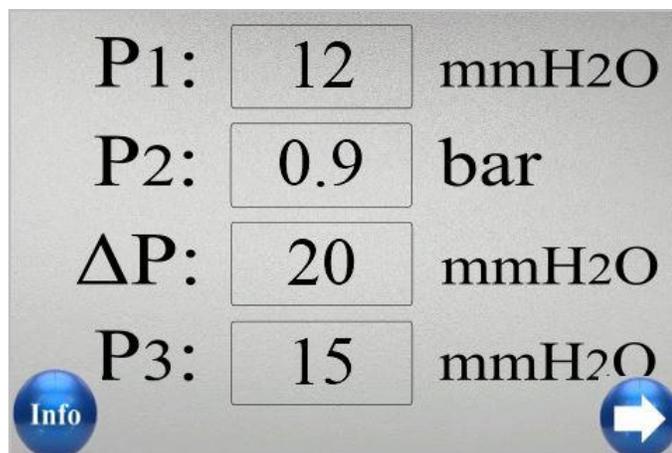
PID primera etapa de compresión



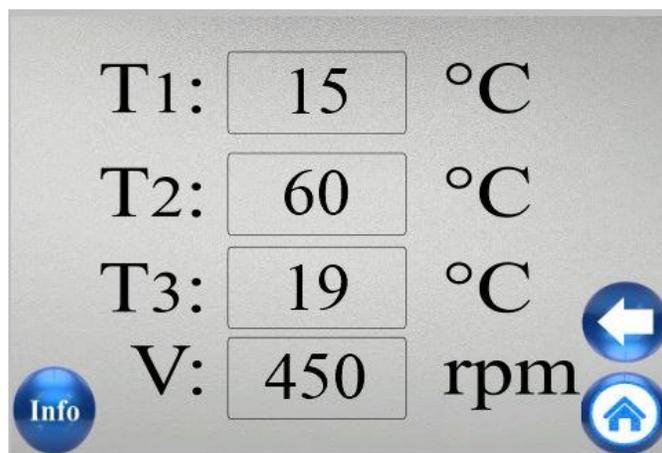
En la **Figura 59** se muestra la pantalla de monitoreo general y las opciones de navegación entre las diferentes pantallas, así como las respectivas unidades de cada una de las variables que se están registrando durante el proceso de compresión.

Figura 59

Pantalla de monitoreo general del sistema de compresión primera etapa

**Figura 60**

Pantalla de monitoreo auxiliar del sistema de compresión primera etapa



Por otro lado, para la segunda etapa de compresión se tuvo en cuenta que la HMI de monitoreo presenta más opciones de navegación ya que esta etapa cuenta con dos formas de operación:

- Compresión de aire con intercambiador de calor
- Compresión de aire sin intercambiador de calor

En la **Figura 61** se presenta la pantalla de inicio para el monitoreo de datos de la segunda etapa de compresión donde se puede apreciar opciones de navegación que permite al usuario entender de mejor manera el sistema de compresión de aire, así como la visualización de todas las variables que se miden durante el funcionamiento del compresor, el código de programación para esta etapa se encuentra en el Anexo K.

Figura 61

Pantalla de inicio HMI segunda etapa



Figura 62

Pantalla de opciones de operación para sistema de compresión segunda etapa



Figura 63

PID del proceso de compresión través del intercambiador de calor

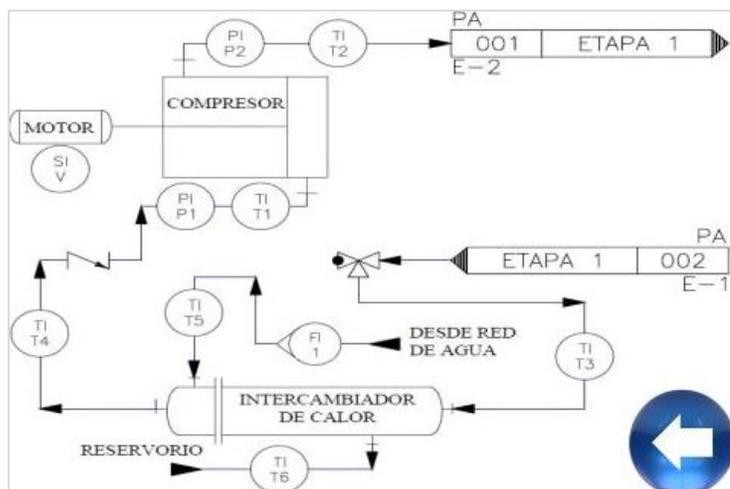


Figura 64

PID del proceso de compresión segunda etapa forma directa

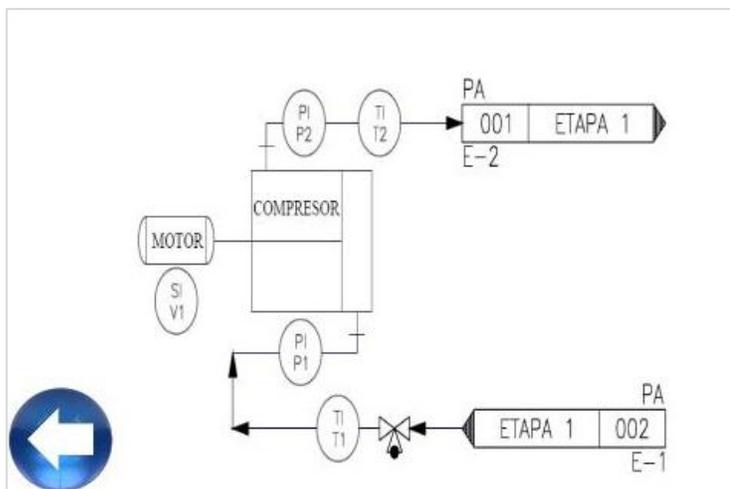
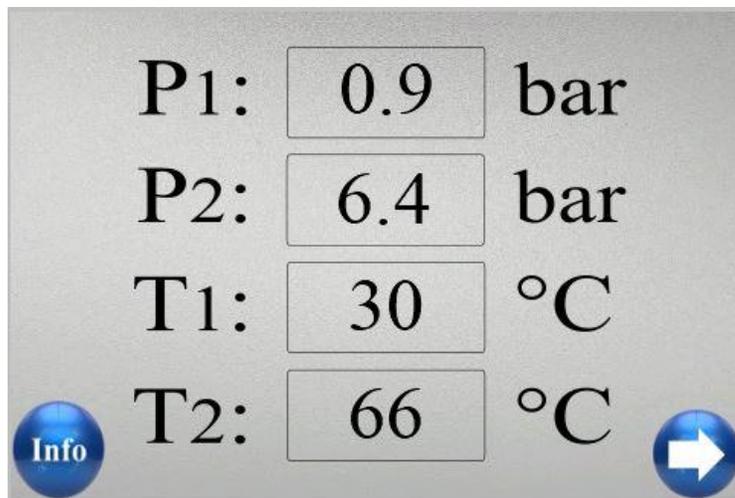


Figura 65

Pantalla de monitoreo general del sistema de compresión segunda etapa

**Figura 66**

Pantalla de monitoreo general del sistema de compresión segunda etapa

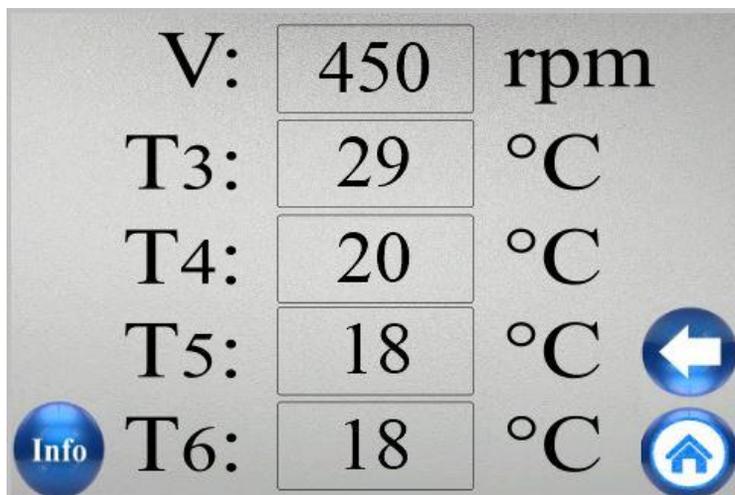


Figura 67

Primera etapa de compresión



Nota: La imagen muestra el equipo completo de la primera etapa de compresión junto al su respectivo gabinete eléctrico, graficador y medidores de humedad y temperatura.

Figura 68

Segunda etapa de compresión



Nota: La imagen muestra el equipo completo de la segunda etapa de compresión junto al su respectivo gabinete eléctrico y graficador.

Prueba de variables de sensores analógicos y digitales

Luego de la implementación del sistema de monitoreo de datos, así como de la lectura de los mismo es de suma importancia asegurarse de que la adquisición de las variables que participan durante el proceso de compresión tenga concordancia con lo que se está midiendo con los instrumentos analógicos y digitales. Por consiguiente, para cada variable que necesita ser monitoreada se ha realizado pruebas que permitan conocer la exactitud del sistema de monitoreo.

Estas pruebas han sido de suma importancia, debido a que nos permite realizar ajustes dentro del sistema de manera que se pueda obtener datos confiables durante la operación del compresor de dos etapas.

Presión de línea de alta

Tabla 25

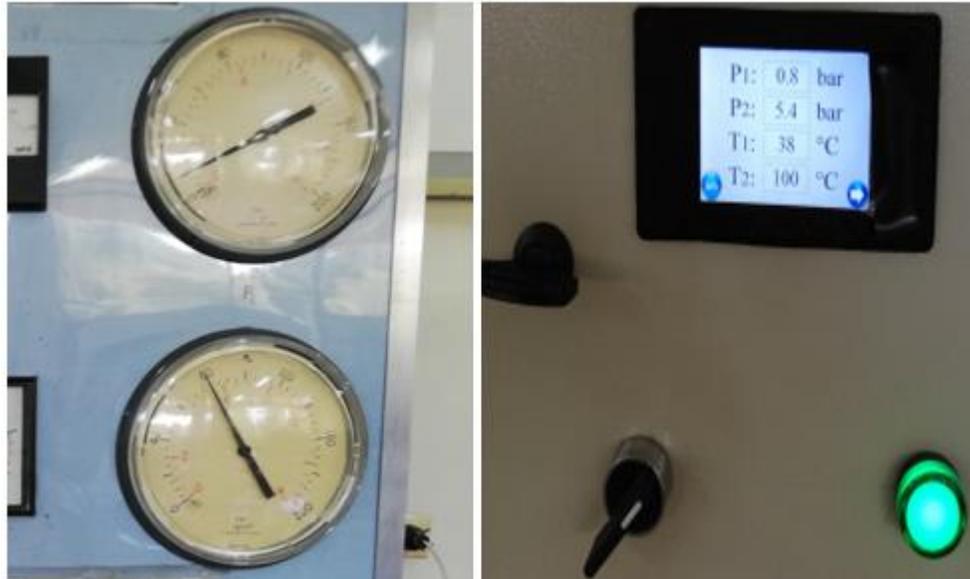
Resultado de la prueba de funcionamiento de presión de línea de alta

HMI (bar)	Sensor analógico (bar)	Error %
4.3	4.5	4%
5.1	5	2%
8.2	8	2%
6.1	6	2%
5.8	5.7	2%
5.3	5.2	2%
6.8	7	3%
6.6	6.5	2%
6.7	6.5	3%
5.4	5.5	2%
0.8	0.9	10%

En base a los datos obtenidos se puede concluir que si bien se tiene un error máximo cercano al 10% esto se debe a que el instrumento analógico presenta una resolución baja de 0.5 bares mientras que el instrumento digital tiene una resolución de 0.1 bares.

Tabla 26

Lectura de variables de presión de línea de alta



Nota: La imagen de la izquierdo muestra la lectura de los manómetros analógicos mientras que la imagen de lado derecho muestra los datos obtenidos por medio de la HMI.

Velocidad de compresión

Tabla 27

Resultado de la prueba de funcionamiento del compresor

HMI (rpm)	Sensor analógico (rpm)	Error %
464	450	3%
496	500	1%
589	550	7%
629	600	5%
645	650	1%
710	700	1%
766	750	2%

De acuerdo a los resultados que se muestra en la **Tabla 27** se concluye que el máximo error de lectura se da la poca resolución del tacómetro ya que presenta una mínima lectura de 50 rpm mientras que la HMI presenta una resolución mucho mayor.

Figura 69

Lectura de variable de velocidad de eje de compresor



Nota: La imagen de la izquierdo muestra la lectura del tacómetro analógico mientras que la imagen de lado derecho muestra los datos obtenidos por medio de la HMI.

Temperatura

Tabla 28

Resultado de la prueba de funcionamiento de los sensores de temperatura

HMI (°C)	Sensor analógico (°C)	Error %
22	20	10%
21	20	5%
22	20	10%
21	22	5%
81	79	3%
83	80	4%
84	81	4%
88	85	4%
19	22	14%
17	15	13%

La **Tabla 28** muestra un error máximo de 14% debido a que la resolución del instrumento analógico es de 5 °C lo que hace que este valor aumente, pero se considera que es un error aceptable debido a que la aguja del selector de temperatura al momento de leer el instrumento se puede considerar una aproximación de una unidad.

Figura 70

Lectura de instrumentos de temperatura



Nota: La imagen de lado izquierdo se muestra la lectura del selector de temperaturas (T3) y la imagen de lado derecho se muestra la HMI para la temperatura (T3)

Capítulo V

Cálculos y Análisis de Resultados

En el presente capítulo se presentará un ejemplo de cálculo que es referencia para la obtención de todos los parámetros dependientes necesarios para el posterior análisis de resultados, se presenta un ejemplo debido a que dichos cálculos son repetitivos, sin embargo, además de los ejemplos de cálculos se presentara la tabla completa de tabulación de datos, la tabla de resultados y las gráficas comparativas para el análisis respectivo.

Nomenclatura:

Primera Etapa

- N1 [rpm]: Revoluciones por minuto del eje del compresor
- P1 [mmH₂O]: Presión manométrica a la entrada del compresor
- T1 [°C o K]: Temperatura a la entrada del compresor
- P2 [bar]: Presión manométrica a la salida del compresor
- T2 [°C o K]: Temperatura a la salida del compresor
- T3 [°C o K]: Temperatura previo a la placa orificio
- ΔP [mmH₂O]: Diferencia de presión en placa orificio
- P3 [mmH₂O]: Presión manométrica a la salida de la placa orificio
- A [amperio]: Amperaje de motor eléctrico
- V [voltio]: Voltaje de motor eléctrico
- F [kN]: Fuerza del dinamómetro
- HR_in [%]: Humedad Relativa a la entrada del proceso
- Tbs_in [°C]: Temperatura de bulbo seco a la entrada del proceso
- HR_out [%]: Humedad Relativa a la salida del proceso
- Tbs_out [°C]: Temperatura de bulbo seco a la salida del proceso

Segunda Etapa:

- N_2 [rpm]: Revoluciones por minuto del eje del compresor
- P_1 [bar]: Presión manométrica a la entrada del compresor
- P_2 [bar]: Presión manométrica a la salida del compresor
- T_1 [°C o K]: Temperatura a la entrada del compresor
- T_2 [°C o K]: Temperatura a la salida del compresor
- T_3 [°C o K]: Temperatura a la entrada del intercambiador de calor
- T_4 [°C o K]: Temperatura a la salida del intercambiador de calor
- T_5 [°C o K]: Temperatura de entrada del agua al intercambiador de calor
- T_6 [°C o K]: Temperatura de entrada del agua al intercambiador de calor
- Q [lt/min]: Caudal de agua en el intercambiador de calor
- A [amperio]: Amperaje de motor eléctrico
- V [voltio]: Voltaje de motor eléctrico
- F [kN]: Fuerza del dinamómetro

Datos Experimentales:

Compresor Primera Etapa:

- Diámetro de cilindro: 66.7 mm
- Carrera del pistón: 63.5 mm
- Número de cilindros: 2

Compresor de Segunda Etapa:

- Diámetro de cilindro: 50.8 mm
- Carrera del pistón: 50.8 mm
- Número de cilindros: 2

Presión Atmosférica (Valle de los Chillos – Ecuador): $P_0 = 1.027$ bar

Constante de resorte en indicador diagramador: $k_c = 0.391$ bar/min

Para el ejemplo de cálculos tanto de la primera y segunda etapa con uso de intercambiador de calor se usará como datos de entrada los que se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 29

Datos de entrada para los ejemplos de cálculo

Primera Etapa		Segunda Etapa	
Parámetro	Valor [Unidad]	Parámetro	Valor [Unidad]
N1	550 [rpm]	N2	550 [rpm]
ΔP	40 [mmH ₂ O]	P1	0.8 [bar]
P1	15 [mmH ₂ O]	P2	5.3 [bar]
P2	1 [bar]	T1	19 [°C]
P3	20 [mmH ₂ O]	T2	97 [°C]
T1	21 [°C]	T3	38 [°C]
T2	82 [°C]	T4	16 [°C]
T3	19 [°C]	T5	16 [°C]
A	4 [A]	T6	16 [°C]
V	160 [V]	A	4 [A]
F	18 [kN]	V	140 [V]
		F	17 [kN]
		Q	3 [lt/min]

- Cálculo de masa de aire

Para este cálculo es necesario hacer referencia a las características de la placa orificio según BS 1042 con $d = 12.7 \text{ mm}$ y $D = 25.4 \text{ mm}$

$$\dot{m}_a = 6.574 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P_3}{T_3}} \quad \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (38)$$

Donde:

$$P_3 = 0.098 \times 10^{-3} * P_3' + P_0 \text{ [bar]} \quad (39)$$

$$P_3 = 0.098 \times 10^{-3} * 20 + 1.027 = 1.029 \text{ [bar]}$$

$$T_3 = T_3' + 273 \text{ [K]} \quad (40)$$

$$T_3 = 19 + 273 = 292 \text{ [K]}$$

$$\dot{m}_a = 6.574 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{40 * 1.029}{292}} = 0.00247 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

- Cálculo de relación de presión:

$$r_{pi} = \frac{P_2'}{P_1'} \quad (41)$$

Donde:

i: índice 1 si es primera etapa y 2 si es segunda etapa

$$P_1' = P_1 + P_0 \text{ [bar]} \quad (42)$$

$$P_1' = 0.098 \times 10^{-3} * 15 + 1.027 = 1.028 \text{ [bar]} \text{ (Primera Etapa)}$$

$$P_1' = 0.8 + 1.027 = 1.827 \text{ [bar]} \text{ (Segunda Etapa)}$$

$$P_2' = P_2 + P_0 \text{ [bar]} \quad (43)$$

$$P_2' = 1 + 1.027 = 2.027 \text{ [bar]} \text{ (Primera Etapa)}$$

$$P_2' = 5.3 + 1.027 = 6.327 \text{ [bar]} \text{ (Segunda Etapa)}$$

$$r_{p1} = \frac{2.027}{1.028} = 1.971$$

$$r_{p2} = \frac{6.327}{1.827} = 3.463$$

- Cálculo de relación de temperatura:

$$r_{ti} = \frac{T_2'}{T_1'} \quad (44)$$

Donde:

i: índice 1 si es primera etapa y 2 si es segunda etapa

$$T_1' = T_1 + 273 \text{ [K]} \quad (45)$$

$$T_1' = 21 + 273 = 294 \text{ [K]} \quad (\text{Primera Etapa})$$

$$T_1' = 19 + 273 = 292 \text{ [K]} \quad (\text{Segunda Etapa})$$

$$T_2' = T_2 + 273 \text{ [K]} \quad (46)$$

$$T_2' = 82 + 273 = 355 \text{ [K]} \quad (\text{Primera Etapa})$$

$$T_2' = 97 + 273 = 370 \text{ [K]} \quad (\text{Segunda Etapa})$$

$$r_{t1} = \frac{355}{294} = 1.207$$

$$r_{t2} = \frac{370}{292} = 1.267$$

- Cálculo del valor del índice politrópico:

$$n_i = \frac{\ln(r_p)}{\ln(r_p) - \ln(r_t)} \quad (47)$$

Donde:

i: índice 1 si es primera etapa y 2 si es segunda etapa

$$n_1 = \frac{\ln(1.971)}{\ln(1.971) - \ln(1.207)} = 1.385$$

$$n_2 = \frac{\ln(3.463)}{\ln(3.463) - \ln(1.267)} = 1.235$$

- Cálculo del trabajo politrópico:

$$W_{p_i} = m_a R_{gas} T_{in} \left(\frac{n}{n-1} \right) \left[(r_p)^{1-\frac{1}{n}} - 1 \right] \quad (48)$$

Donde:

i: índice 1 si es primera etapa y 2 si es segunda etapa

$$W_{p_1} = 0.00247 \left[\frac{kg}{s} \right] * 0.2871 \left[\frac{kJ}{kg * K} \right] * 294 [K] \left(\frac{1.385}{1.385-1} \right) \left[(1.971)^{1-\frac{1}{1.385}} - 1 \right]$$

$$W_{p_1} = 0.1555 [kW]$$

$$W_{p_2} = 0.00247 \left[\frac{kg}{s} \right] * 0.2871 \left[\frac{kJ}{kg * K} \right] * 292 [K] \left(\frac{1.235}{1.235-1} \right) \left[(3.463)^{1-\frac{1}{1.235}} - 1 \right]$$

$$W_{p_2} = 0.2900 [kW]$$

- Cálculo de la eficiencia volumétrica:

$$n_{vol} = \frac{\text{Flujo de volumen inducido}}{\text{Flujo de barrido}}$$

$$n_{vol} = \frac{\text{Flujo de masa de aire real}}{\text{Barrido de flujo de masa de aire en las mismas condiciones}}$$

$$\text{Barrido de flujo de masa de aire en las mismas condiciones} = \frac{2 \rho V_s N}{60} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (49)$$

Obteniendo las siguientes constantes para los próximos cálculos:

$$\frac{2 \rho V_s N}{60} = 0.0091 \times 10^{-3} N_1 \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (\text{Primera Etapa}) \quad (50)$$

$$\frac{2 \rho V_s N}{60} = 1.1964 \times 10^{-3} N_2 \cdot \frac{P_1}{T_1} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (\text{Segunda Etapa}) \quad (51)$$

En la ecuación anterior, los términos de presión y temperatura son necesarios ya que la unidad de la segunda etapa tiene un aire de entrada a una presión P1 y temperatura T1

Procediendo con el cálculo respectivo:

$$n_{vol1} = \frac{\dot{m}_a}{0.0091 \times 10^{-3} * N_1} * 100\% \quad (52)$$

$$n_{vol1} = \frac{0.00247}{0.0091 \times 10^{-3} * 550} * 100\% = 49.31\%$$

$$n_{vol2} = \frac{\dot{m}_a * T_1}{1.1964 \times 10^{-3} * N_2 * P_1} * 100\% \quad (53)$$

$$n_{vol2} = \frac{0.00247 * 292}{1.1964 \times 10^{-3} * 550 * 1.827} * 100\% = 59.95\%$$

- Cálculo del Trabajo Isotérmico:

$$W_{iso_i} = \dot{m}_a R_{gas} T_{in_i} \ln(r_{p_i}) \quad (54)$$

Donde:

$$R_{gas} = 0.2871 \left[\frac{kJ}{kg * K} \right]$$

i: indice 1 si es primera etapa y 2 si es segunda etapa

$$W_{iso_1} = \dot{m}_a R_{gas} T_1 \ln(r_{p1}) = 0.00247 \left[\frac{kg}{s} \right] * 0.2871 \left[\frac{kJ}{kg * K} \right] * 294 [K] * \ln(1.971)$$

$$W_{iso_1} = 0.141 [kW]$$

$$W_{iso_2} = \dot{m}_a R_{gas} T_1 \ln(r_{p2}) = 0.00247 \left[\frac{kg}{s} \right] * 0.2871 \left[\frac{kJ}{kg * K} \right] * 292 [K] * \ln(3.463)$$

$$W_{iso_2} = 0.257 [kW]$$

- Cálculo de Trabajo Indicado

$$W_{i_i} = \frac{Z * pm_i * A_i * S_i * N_i * 10^2}{60} \quad (55)$$

Donde:

i: indice 1 si es primera etapa y 2 si es segunda etapa

A_i : Área del pistón [m^2]

S_i : Carrera del pistón [m]

Z : Número de cilindros

$$pm_i = \frac{K * Ad}{X_s} \quad (56)$$

Donde:

K : Constante del resorte de graficador = $0.391 \left[\frac{bar}{mm} \right]$

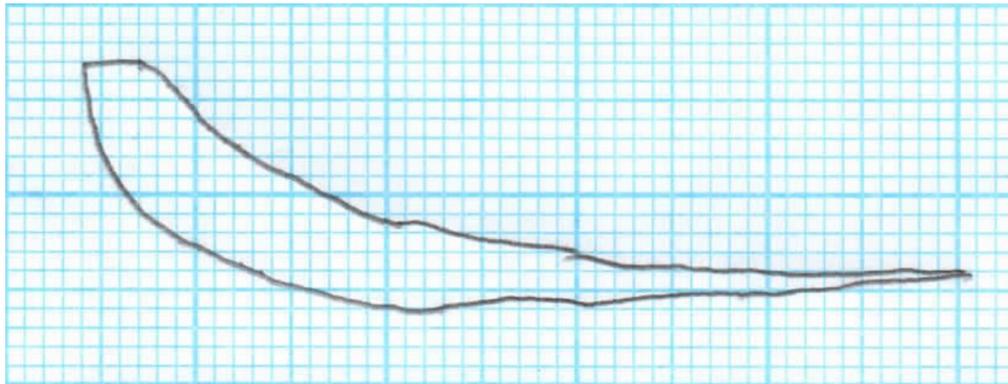
Ad : Área del diagrama de graficador [mm^2]

X_s : Carrera del diagrama de graficador [mm]

Para el ejemplo se ha utilizado el diagrama real obtenido del graficador en la primera etapa con intercambiador de calor a 550 rpm, como se puede evidenciar en la **Figura 71**.

Figura 71

Diagrama real obtenido del graficador.



Nota: El diagrama indicado, es una reproducción en papel milimétrico del diagrama real, con el objetivo de mejorar la apreciación.

Por consiguiente, se obtiene los siguientes datos:

Ad : 122.7 [mm^2]

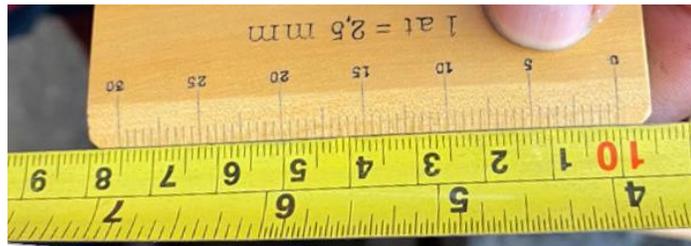
X_s : 45.76 [mm]

Previo a continuar los cálculos se debe convertir los datos antes obtenidos a la escala real que se obtiene con ayuda de una regla (ver **Figura 72**) propia del fabricante del graficador mecánico *Maihak*.

Escala determinada 0.4 (10mm escala regla a 25mm regla milimétrica)

Figura 72

Comparación regla graficador con escala normal milimétrica.



Nota: Como dato informativo, cada graficador mecánico, viene con su regla con escala determinada dependiendo del diámetro según el modelo.

Aplicando la escala se obtiene los siguientes datos que servirán para continuar el ejemplo de cálculos:

$$Ad: 19.632 [mm^2]$$

$$Xs: 18.304 [mm]$$

Por consiguiente:

$$pm_1 = \frac{0.391 \left[\frac{bar}{mm} \right] * 19.632 [mm^2]}{18.304 [mm]} = 0.41937 \left[\frac{bar}{mm} \right]$$

$$W_{i_1} = \frac{2 * 0.41937 \left[\frac{bar}{mm} \right] * 0.00349 [m^2] * 0.0635 [m] * 550 * 10^2}{60} = 0.1705 [kW]$$

- Cálculo de Trabajo Mecánico:

$$W_{mec_i} = \frac{2 * \pi * N_{elect} * Tq}{1000} [kW] \quad (57)$$

Donde:

i : indice 1 si es primera etapa y 2 si es segunda etapa

N_{elect} : Velocidad de motor eléctrico

Tq : Torque [Nm]

$$N_{elect} = \frac{3.53 * N_i}{60} \left[\frac{rev}{seg} \right] \quad (58)$$

$$Tq = F_i * R \text{ [Nm]} \quad (59)$$

Donde:

i : indice 1 si es primera etapa y 2 si es segunda etapa

F : Fuerza perpendicular a eje de motor, medido en dinamómetro [N]

R : Radio de brazo de freno [m]

Por lo tanto, para facilidad de cálculos las ecuaciones (58) y (59) se reemplazan en la ecuación (57), obteniendo la siguiente:

$$W_{mec_i} = 0.0591 \times 10^{-3} * N_i * F_i \quad [kW] \quad (60)$$

$$W_{mec_1} = 0.0591 \times 10^{-3} * 550 * 18 = 0.585 \text{ [kW]}$$

- Cálculo de Trabajo Eléctrico:

Potencia de motor eléctrico = Potencia de Armadura + Potencia de Campo

$$W_{elect_i} = \frac{V_i * A_i}{1000} + \frac{220 * 0.4}{1000} \text{ [kW]} \quad (61)$$

$$W_{elect_i} = \frac{(V_i * A_i) + 88}{1000} \quad (62)$$

Donde:

i : indice 1 si es primera etapa y 2 si es segunda etapa

Potencia de campo está dado por proveedor, 220 V (D.C) y 0.4 A

$$W_{elect_1} = \frac{(160 * 4) + 88}{1000} = 0.728 \text{ [kW]} \quad (63)$$

- Cálculo de Eficiencia Isotérmica:

$$\eta_{iso_i} = \frac{W_{iso_i}}{W_{i_i}} \times 100\% \quad (64)$$

Donde:

i: índice 1 si es primera etapa y 2 si es segunda etapa

$$\eta_{iso_1} = \frac{0.1413}{0.1705} \times 100\% = 82.87\%$$

- Cálculo de Eficiencia Isotérmica General:

$$\eta_{isoG_i} = \frac{W_{iso_i}}{W_{mec_i}} \times 100\% \quad (65)$$

Donde:

i: índice 1 si es primera etapa y 2 si es segunda etapa

$$\eta_{isoG_i} = \frac{0.1413}{0.5851} \times 100\% = 24.15\%$$

- Cálculo de Eficiencia Mecánica:

$$\eta_{mec_i} = \frac{W_{i_i}}{W_{mec_i}} \times 100\% \quad (66)$$

Donde:

i: índice 1 si es primera etapa y 2 si es segunda etapa

$$\eta_{mec_i} = \frac{0.1706}{0.5851} \times 100\% = 29.16\%$$

- Cálculo de Relación Térmica del Inter enfriador

$$\varepsilon = \frac{\text{Caída de temperatura del lado caliente}}{\text{Max. caída de temperatura disponible}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_5} \quad (67)$$

$$\varepsilon = \frac{38 - 16}{38 - 15} = 0.9565$$

A continuación, se presenta las tablas de recopilación de datos:

Tabla 30

Primera Etapa sin Intercambiador de calor

Primera etapa sin intercambiador de calor												
N1 [rpm]	450				550				650			
ΔP [mmH ₂ O]	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
P ₁ [mm H ₂ O]	12	12	12	12	16	16	15	16	17	17	17	17
P ₂ [bar]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P ₃ [mm H ₂ O]	16	11	15	18	6	11	15	18	7	11	15	19
T ₁ [°C]	13	14	14	14	15	15	15	15	16	20	20	21
T ₂ [°C]	65	65	65	65	75	75	76	79	80	85	85	88
T ₃ [°C]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	15	15	15
A [A]	4.5	4	4	4	4.1	4	4.1	4	4.1	4.1	4.1	4.1
V [V]	120	138	138	138	160	160	160	160	175	175	175	175
F [kN]	19	16	17	17	18	18	18	18	18	18	18	18
Ad [mm ²]	4.0753				13.9534				20.3037			
Xs [mm]	18.68				18.928				19.008			
HR_in [%]	37				38				38			
Tbs_in [°C]	23				23.1				23.7			
HR_out [%]	36				36				35			
Tbs_out [°C]	23.5				23.6				24.3			

Tabla 31

Segunda Etapa sin Intercambiador de calor

Segunda etapa sin intercambiador de calor												
N1 [rpm]	450				550				650			
ΔP [mmH ₂ O]	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
P ₁ [bar]	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.8
P ₂ [bar]	6	5.8	5	4.3	6.3	6	5.7	5.2	6	5.9	5.8	5.5
T ₁ [°C]	24	26	27	28	30	31	34	36	32	34	36	36
T ₂ [°C]	69	70	71	71	82	84	85	87	91	91	93	93
A [A]	4	4	4.5	3	4	4	4	4	4	4	4	4
V [V]	120	120	120	120	150	150	150	150	160	160	160	160
F [kN]	16	16	16	15	17	17	17	17	17	17	17	17
Caudal [lt/min]	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ad [mm ²]	17.8827				26.2155				28.2055			
Xs [mm]	18.228				18.4				18.808			

Tabla 32

Primera Etapa con Intercambiador de calor

Primera etapa con intercambiador de calor												
N1 [rpm]	450				550				650			
ΔP [mmH ₂ O]	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
P ₁ [mm H ₂ O]	12	12	12	12	15	15	15	15	17	17	17	17
P ₂ [bar]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P ₃ [mm H ₂ O]	7	11	14	19	6	11	16	20	7	11	15	19
T ₁ [°C]	16	19	20	20	20	20	20	21	21	21	21	20
T ₂ [°C]	56	65	70	70	79	80	81	82	85	86	87	88
T ₃ [°C]	15	16	17	17	19	19	19	19	19	20	20	20
A [A]	4	3.5	3.5	3.8	4	4	4	4	4	4	4	4
V [V]	130	135	135	130	160	160	160	160	170	170	170	170
F [kN]	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Ad [mm ²]	10.934				19.632				20.602			
Xs [mm]	18.28				18.304				18.616			
HR _{in} [%]	39				39				38			
T _{bs_in} [°C]	23.1				23.2				23.5			
HR _{out} [%]	37				37				36			
T _{bs_out} [°C]	23.6				23.7				24.4			

Tabla 33

Segunda Etapa con Intercambiador de calor

Segunda etapa sin intercambiador de calor												
N1 [rpm]	450				550				650			
ΔP [mmH ₂ O]	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
P ₁ [bar]	0.8	0.7	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8
P ₂ [bar]	7	6.2	5.8	5	6.1	6.1	5.8	5.3	6.4	6.4	6.3	5.9
T ₁ [°C]	15	16	16	17	17	19	19	19	19	19	19	19
T ₂ [°C]	70	80	82	83	92	95	97	97	104	105	107	107
T ₃ [°C]	22	25	29	30	35	35	36	38	40	40	42	44
T ₄ [°C]	15	16	15	16	16	16	16	16	17	17	17	18
T ₅ [°C]	14	15	15	15	15	15	15	16	15	15	16	16
T ₆ [°C]	14	15	15	15	15	15	15	16	16	16	16	16
A [A]	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
V [V]	120	120	120	120	140	140	140	140	160	160	160	160
F [kN]	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	16
Caudal [lt/min]	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ad [mm ²]	24.2				25.709				29.608			
Xs [mm]	18.148				18.348				18.472			

Tabla 34

Resultados sin Intercambiador de calor

Resultados sin intercambiador de calor												
N1 [rpm]	450				550				650			
ΔP [mmH ₂ O]	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
ma [kg/s]	0.0013	0.0018	0.0022	0.0025	0.0013	0.0018	0.0022	0.0025	0.0013	0.0018	0.0022	0.0025
Rp1st	1.9715	1.9715	1.9715	1.9715	1.9707	1.9707	1.9709	1.9707	1.9705	1.9705	1.9705	1.9705
Rt1st	1.1818	1.1777	1.1777	1.1777	1.2083	1.2083	1.2118	1.2222	1.2215	1.2218	1.2218	1.2279
Rp2nd	4.3190	4.1961	3.7044	3.2741	4.2426	4.0689	3.8952	3.6057	4.3190	4.2575	3.9531	3.5725
Rt2nd	1.1515	1.1472	1.1467	1.1429	1.1716	1.1743	1.1661	1.1650	1.1934	1.1857	1.1845	1.1845
n1st	1.3265	1.3175	1.3175	1.3175	1.3869	1.3869	1.3950	1.4201	1.4183	1.4192	1.4192	1.4340
n2nd	1.1067	1.1059	1.1167	1.1269	1.1231	1.1293	1.1274	1.1352	1.1375	1.1332	1.1405	1.1533
nvol 1st	30.61%	43.27%	53.01%	61.22%	25.03%	35.40%	43.37%	50.09%	22.94%	32.17%	39.41%	45.51%
nvol 2nd	42.49%	60.49%	74.34%	86.14%	33.40%	47.40%	58.64%	68.16%	32.72%	46.17%	53.63%	58.55%
Wpl 1st	0.0760	0.1077	0.1319	0.1523	0.0774	0.1094	0.1343	0.1557	0.0781	0.1110	0.1359	0.1579
Wpl 2nd	0.1679	0.2338	0.2624	0.2749	0.1706	0.2355	0.2812	0.3082	0.1756	0.2445	0.2859	0.3059
Wis 1st	0.0699	0.0991	0.1214	0.1402	0.0703	0.0994	0.1218	0.1406	0.0705	0.1002	0.1228	0.1423
Wis 2nd	0.1563	0.2182	0.2448	0.2569	0.1575	0.2170	0.2601	0.2852	0.1605	0.2243	0.2624	0.2807
pm 1st [bar]	0.0853	0.0853	0.0853	0.0853	0.2882	0.2882	0.2882	0.2882	0.4177	0.4177	0.4177	0.4177
pm 2nd [bar]	0.6050	0.6050	0.6050	0.6050	0.3800	0.3800	0.3800	0.3800	0.5450	0.5450	0.5450	0.5450
Wi 1st [kW]	0.0284	0.0284	0.0284	0.0284	0.1172	0.1172	0.1172	0.1172	0.1853	0.1853	0.1853	0.1853
Wi 2nd [kW]	0.0934	0.0934	0.0934	0.0934	0.0717	0.0717	0.0717	0.0717	0.1122	0.1122	0.1122	0.1122
Wmec 1st [kW]	0.5053	0.4255	0.4521	0.4521	0.5851	0.5851	0.5851	0.5851	0.6383	0.6383	0.6383	0.6383
Wmec 2nd [kW]	0.4255	0.4255	0.4255	0.3989	0.4521	0.4521	0.4521	0.4521	0.6028	0.6028	0.6028	0.6028
Wselect 1st [kW]	0.6280	0.6400	0.6400	0.6400	0.7440	0.7280	0.7440	0.7280	0.8055	0.8055	0.8055	0.8055
Wselect 2nd [kW]	0.5680	0.5680	0.5080	0.4480	0.6880	0.6880	0.6880	0.6880	0.7280	0.7280	0.7280	0.7280
nisotG 1st	13.82%	23.29%	26.85%	31.01%	12.01%	16.99%	20.81%	24.03%	11.05%	15.70%	19.24%	22.29%
nisotG 2nd	36.74%	51.27%	57.54%	64.41%	34.83%	48.01%	57.54%	63.09%	26.62%	37.21%	43.52%	46.57%
nmech 1st	5.62%	6.67%	6.28%	6.28%	20.04%	20.04%	20.04%	20.04%	29.04%	29.04%	29.04%	29.04%
nmech 2nd	21.96%	21.96%	21.96%	23.42%	15.87%	15.87%	15.87%	15.87%	18.62%	18.62%	18.62%	18.62%

Tabla 35

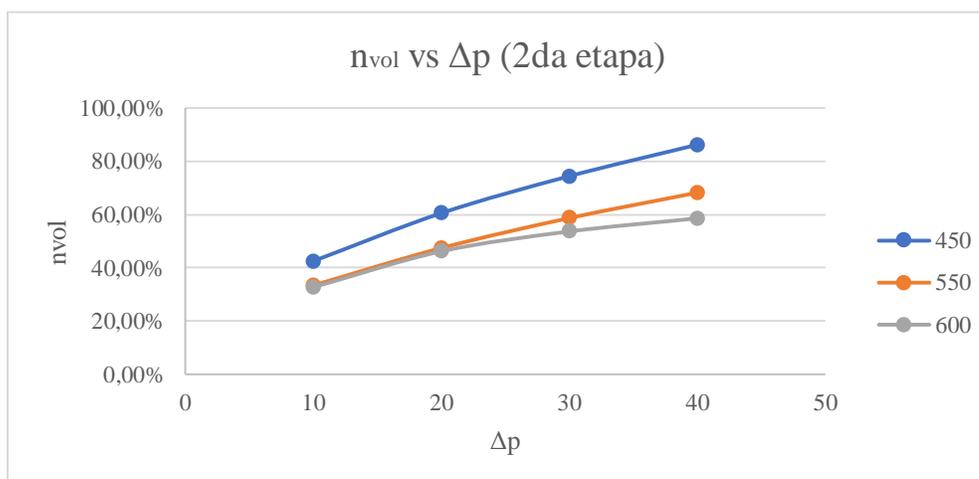
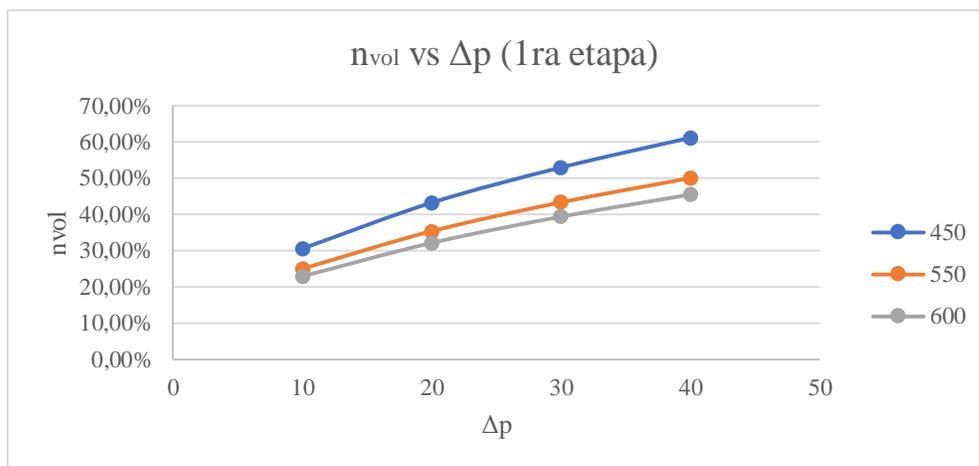
Resultados con Intercambiador de calor

Resultados con intercambiador de calor												
N1 [rpm]	450				550				650			
ΔP [mmH ₂ O]	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
ma [kg/s]	0.0012	0.0018	0.0021	0.0025	0.0012	0.0017	0.0021	0.0025	0.0012	0.0017	0.0021	0.0025
Rp1st	1.9715	1.9715	1.9715	1.9715	1.9709	1.9709	1.9709	1.9709	1.9705	1.9705	1.9705	1.9705
Rt1st	1.1384	1.1575	1.1706	1.1706	1.2014	1.2048	1.2082	1.2075	1.2177	1.2211	1.2245	1.2321
Rp2nd	4.3935	4.1847	4.1961	3.7044	3.9009	3.9009	3.7367	3.4631	4.0651	3.8542	3.8023	3.7915
Rt2nd	1.1910	1.2215	1.2284	1.2276	1.2586	1.2603	1.2671	1.2671	1.2911	1.2945	1.3014	1.3014
n1st	1.2361	1.2747	1.3023	1.3023	1.3706	1.3785	1.3865	1.3848	1.4092	1.4174	1.4257	1.4444
n2nd	1.1339	1.1625	1.1674	1.1857	1.2033	1.2047	1.2189	1.2355	1.2228	1.2366	1.2457	1.2463
nvol 1st	30.33%	42.82%	52.36%	60.48%	24.64%	34.85%	42.70%	49.31%	22.59%	31.90%	39.07%	45.12%
nvol 2nd	36.36%	54.50%	70.74%	81.99%	29.75%	42.37%	51.91%	59.95%	27.46%	36.76%	45.03%	54.86%
Wpl 1st	0.0747	0.1074	0.1326	0.1532	0.0773	0.1094	0.1343	0.1556	0.0780	0.1104	0.1354	0.1563
Wpl 2nd	0.1661	0.2306	0.2833	0.2997	0.1571	0.2240	0.2665	0.2900	0.1652	0.2247	0.2733	0.3149
Wis 1st	0.0699	0.0998	0.1224	0.1414	0.0704	0.0996	0.1220	0.1413	0.0706	0.0997	0.1221	0.1406
Wis 2nd	0.1520	0.2083	0.2551	0.2700	0.1398	0.1991	0.2362	0.2570	0.1450	0.1970	0.2389	0.2753
pm 1st [bar]	0.2339	0.2339	0.2339	0.2339	0.4194	0.4194	0.4194	0.4194	0.4327	0.4327	0.4327	0.4327
pm 2nd [bar]	0.5214	0.5214	0.5214	0.5214	0.5479	0.5479	0.5479	0.5479	0.6267	0.6267	0.6267	0.6267
Wi 1st [kW]	0.0778	0.0778	0.0778	0.0778	0.1706	0.1706	0.1706	0.1706	0.1920	0.1920	0.1920	0.1920
Wi 2nd [kW]	0.0805	0.0805	0.0805	0.0805	0.1034	0.1034	0.1034	0.1034	0.1291	0.1291	0.1291	0.1291
Wmec 1st [kW]	0.4787	0.4787	0.4787	0.4787	0.5851	0.5851	0.5851	0.5851	0.6383	0.6383	0.6383	0.6383
Wmec 2nd [kW]	0.4521	0.4521	0.4521	0.4521	0.5526	0.5526	0.5526	0.5526	0.6028	0.6028	0.6028	0.6028
Welect 1st [kW]	0.6080	0.6145	0.6145	0.5820	0.7280	0.7280	0.7280	0.7280	0.7680	0.7680	0.7680	0.7680
Welect 2nd [kW]	0.5680	0.5680	0.5680	0.5680	0.6480	0.6480	0.6480	0.6480	0.7280	0.7280	0.7280	0.7280
nisotG 1st	14.61%	20.84%	25.58%	29.54%	12.03%	17.02%	20.85%	24.16%	11.06%	15.62%	19.14%	22.02%
nisotG 2nd	33.62%	46.06%	56.43%	59.72%	25.29%	36.03%	42.74%	46.51%	24.05%	32.67%	39.62%	45.66%
nmec 1st	16.26%	16.26%	16.26%	16.26%	29.16%	29.16%	29.16%	29.16%	30.08%	30.08%	30.08%	30.08%
nmec 2nd	17.81%	17.81%	17.81%	17.81%	18.72%	18.72%	18.72%	18.72%	21.41%	21.41%	21.41%	21.41%
ϵ	0.875	0.9	1	0.9333	0.95	0.95	0.9524	1	0.92	0.92	0.9615	0.9286

Resultados y Análisis de Gráficas:

Figura 73

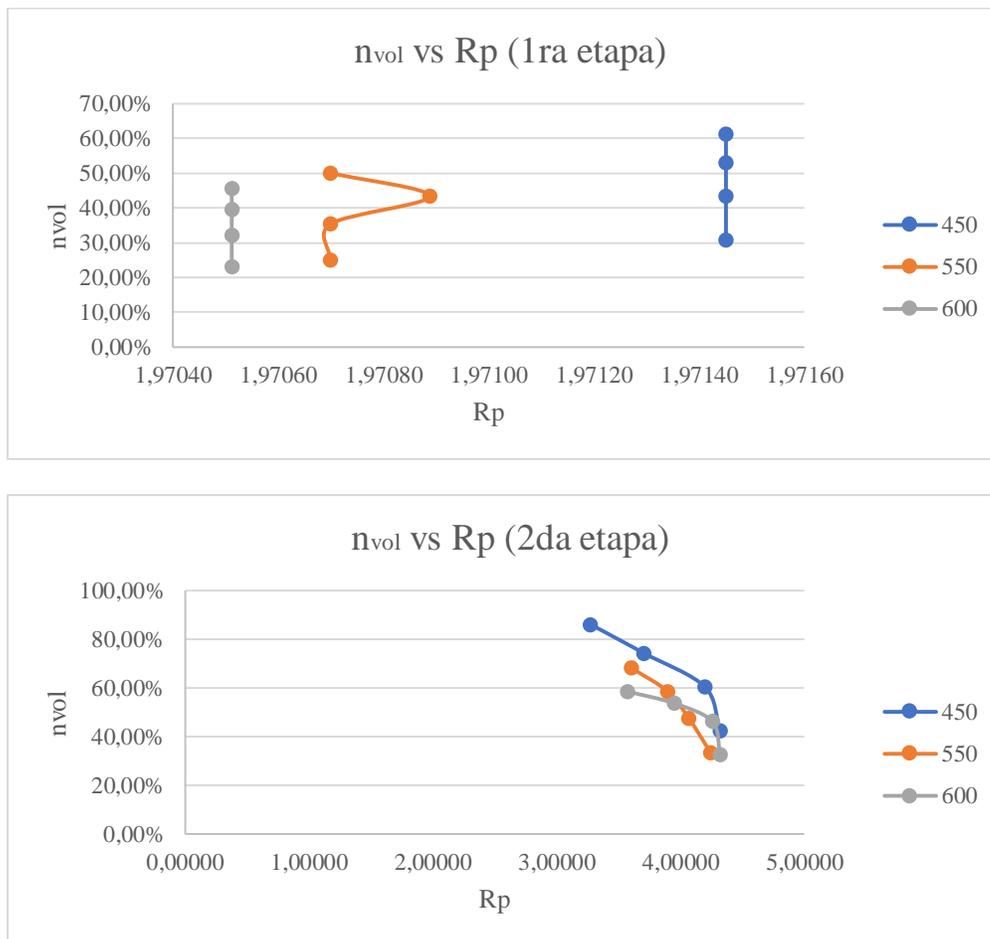
Sin Intercambiador de Calor: Eficiencia volumétrica vs Diferencial de presión placa orificio. (1era y 2da Etapa)

**Análisis:**

El diferencial de presión de la placa orificio afecta directamente al flujo másico del sistema, mismo que afecta a la eficiencia volumétrica de cada etapa, pudiendo determinar que, a mayor diferencial de presión, mayor cantidad de flujo másico y mayor eficiencia volumétrica, sin embargo, la diferencia que marca se debe al volumen de barrido de cada compresor, generando mayor eficiencia a menor volumen de barrido. (Primera etapa 60% máx.; segunda etapa 80% máx.)

Figura 74

Sin Intercambiador de Calor: Eficiencia volumétrica vs Relación de presión. (1era y 2da Etapa)



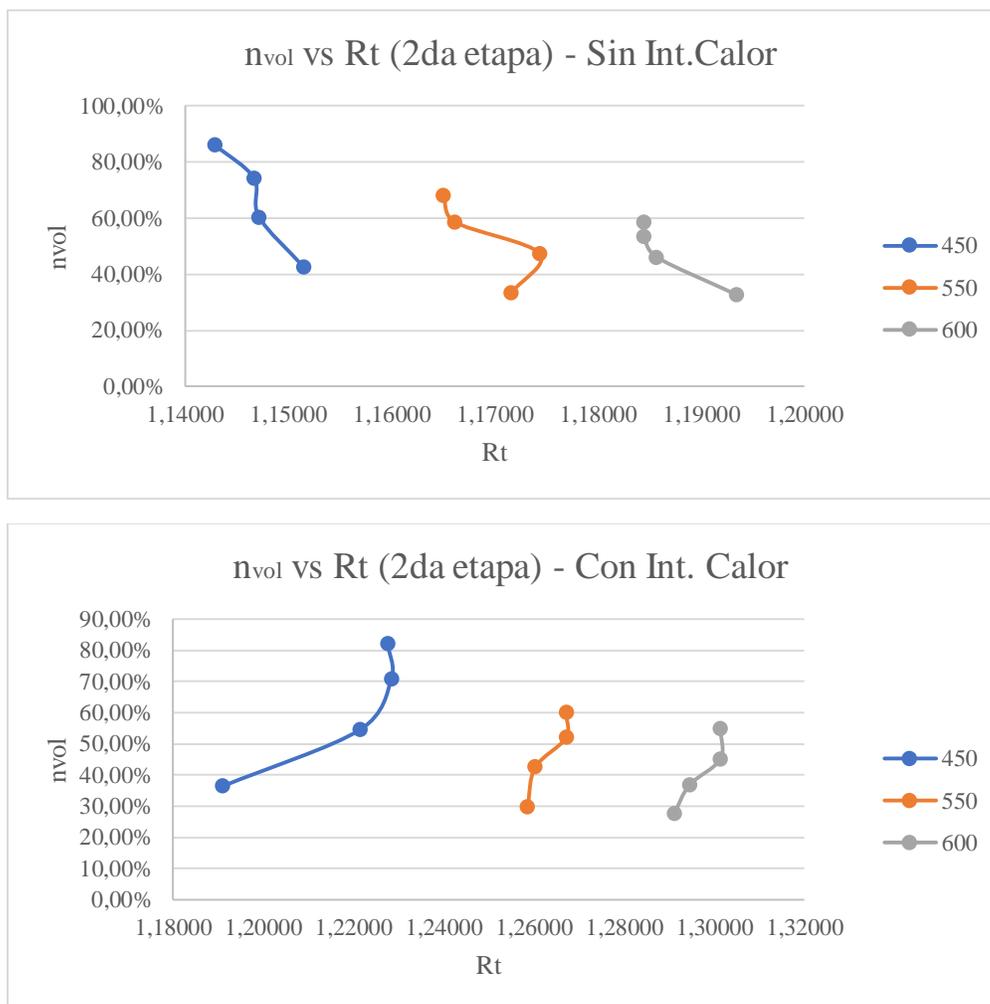
Análisis:

En la **Figura 74** se puede determinar que la relación de presión aumenta si la velocidad de compresión disminuye, y a su vez la eficiencia volumétrica disminuye a razón que la velocidad aumenta ya que este parámetro afecta al flujo de barrido, la diferencia entre etapas se debe a que en la primera no existe parámetros previos al proceso de compresión, como si ocurre en la segunda etapa donde a la entrada ingresa aire con temperatura y presión de descarga de la primera etapa, debido a que en una primera etapa el compresor mueve un gran volumen de aire a baja presión y la segunda

etapa mueve un volumen de aire menor en comparación a la primera etapa, pero a una presión mucho más alta.

Figura 75

Eficiencia volumétrica vs Relación de temperatura, con y sin intercambiador de calor



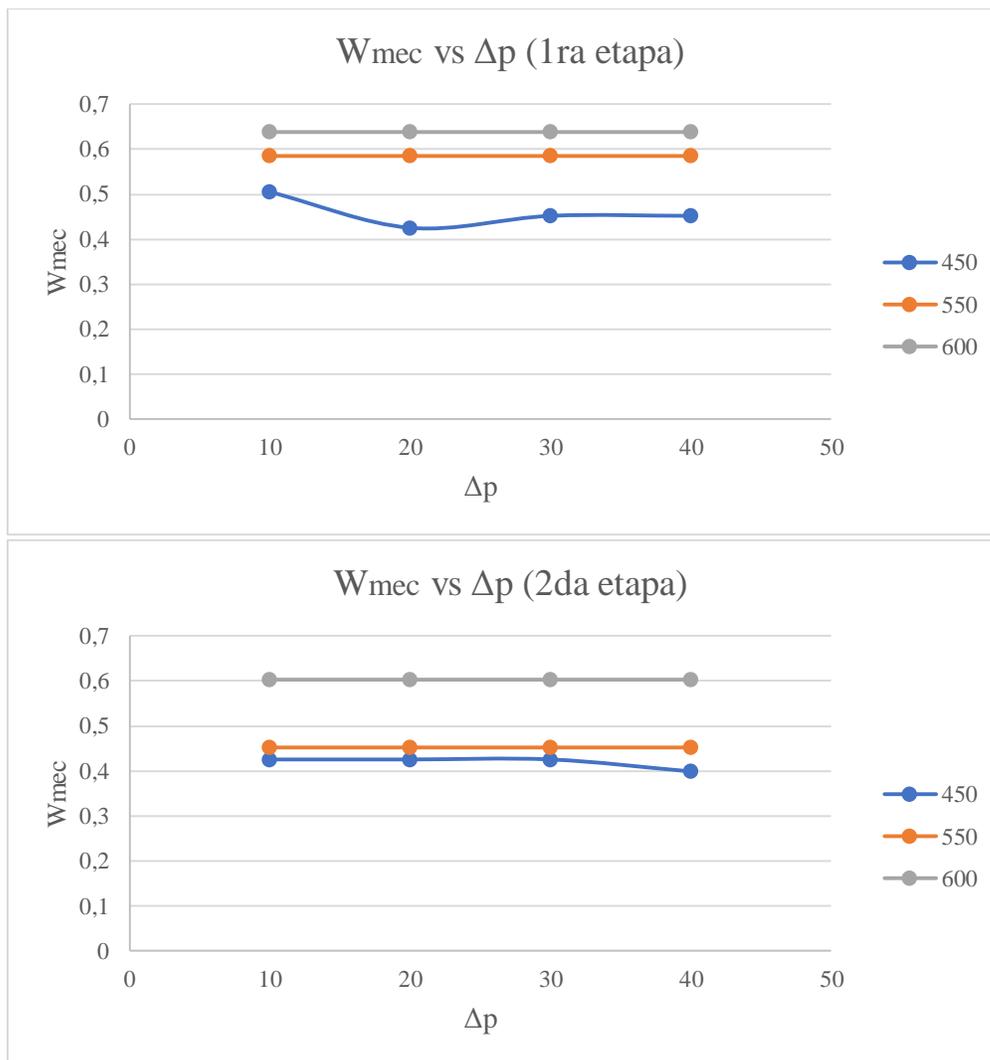
Análisis:

En la **Figura 75**, se evidencia que sin el intercambiador de calor la eficiencia volumétrica disminuye a razón que la relación de la temperatura aumenta, mientras que, con el uso del intercambiador de calor, la eficiencia volumétrica aumenta a razón que aumenta también la relación de temperatura, esto debido a que la masa de carga fresca comparado con la temperatura de descarga genera lo antes expuesto.

Figura 76

Sin Intercambiador de Calor: Trabajo mecánico vs Diferencial de presión placa orificio.

(1era y 2da Etapa)

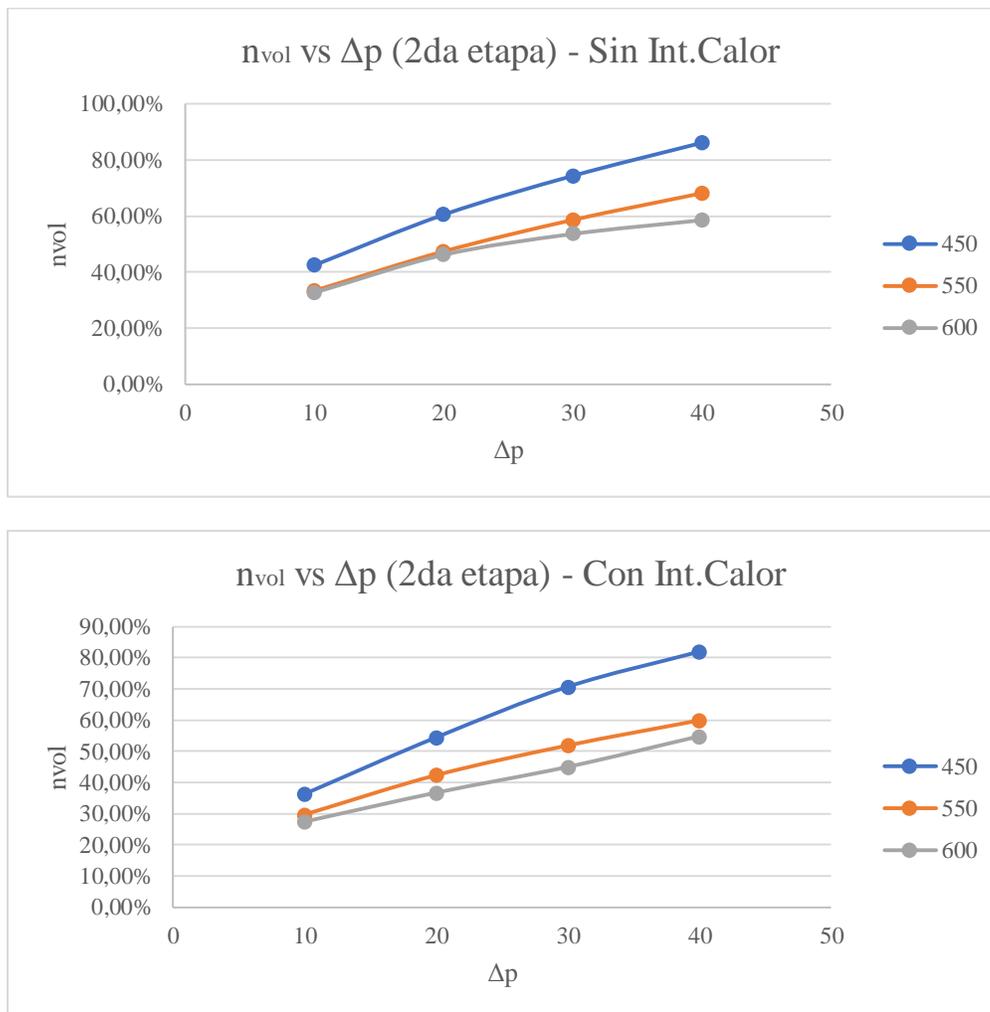


Análisis:

En la **Figura 76**, se puede comprobar que el trabajo mecánico, no se ve afectado por la variación del flujo másico producido por el cambio de diferencial de presión de la placa orificio, además se comprueba que a mayor velocidad se produce un mayor trabajo mecánico, y esto no se ve afectado por el uso o no del intercambiador de calor.

Figura 77

Eficiencia volumétrica vs Diferencia de presión placa orificio, con y sin intercambiador de calor.

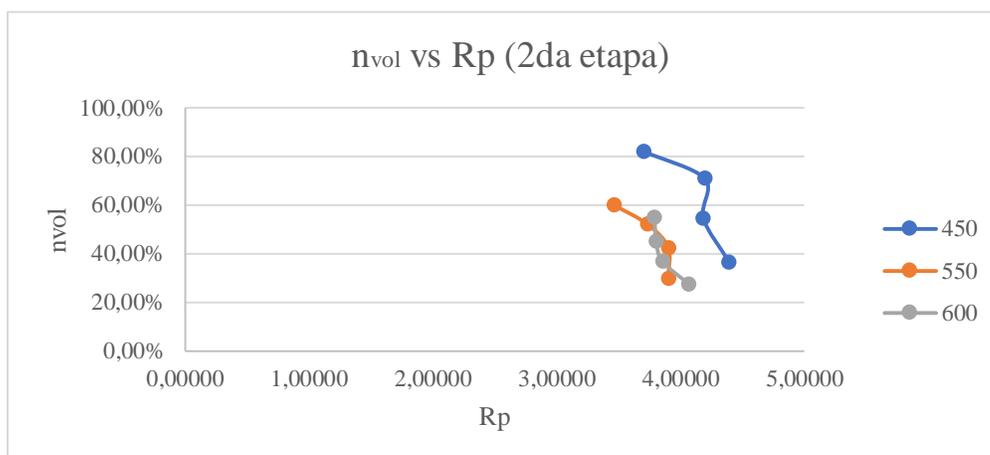
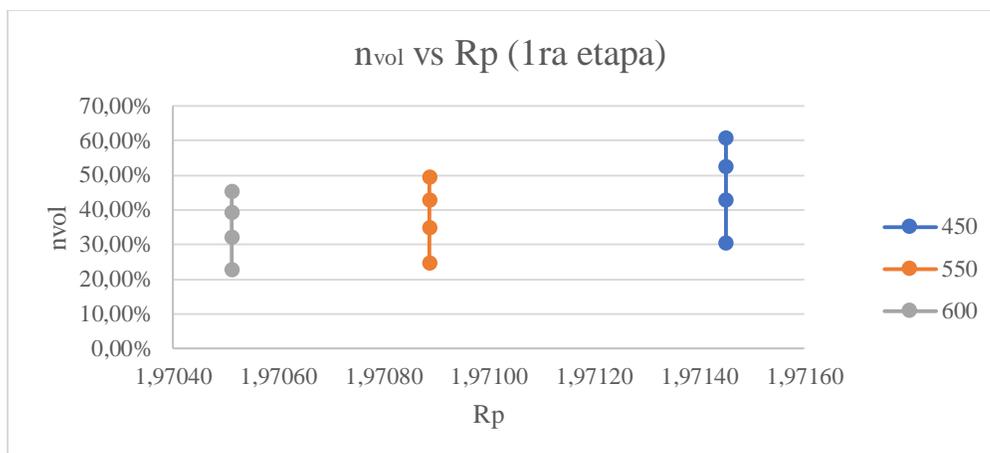


Análisis:

A partir de la **Figura 77** se evidencia que a mayor temperatura de descarga sin intercambiador de calor, la eficiencia volumétrica aumenta debido a que la masa de aire tiene una mayor temperatura producida por la compresión de la primera etapa, y con el uso de intercambiador dicha masa tiene carga fresca la cual reduce la eficiencia volumétrica, además se comprueba que al aumentar el flujo másico producido por el diferencial de presión de la placa orificio aumenta la eficiencia volumétrica.

Figura 78

Con Intercambiador de Calor: Eficiencia volumétrica vs Relación de presión.

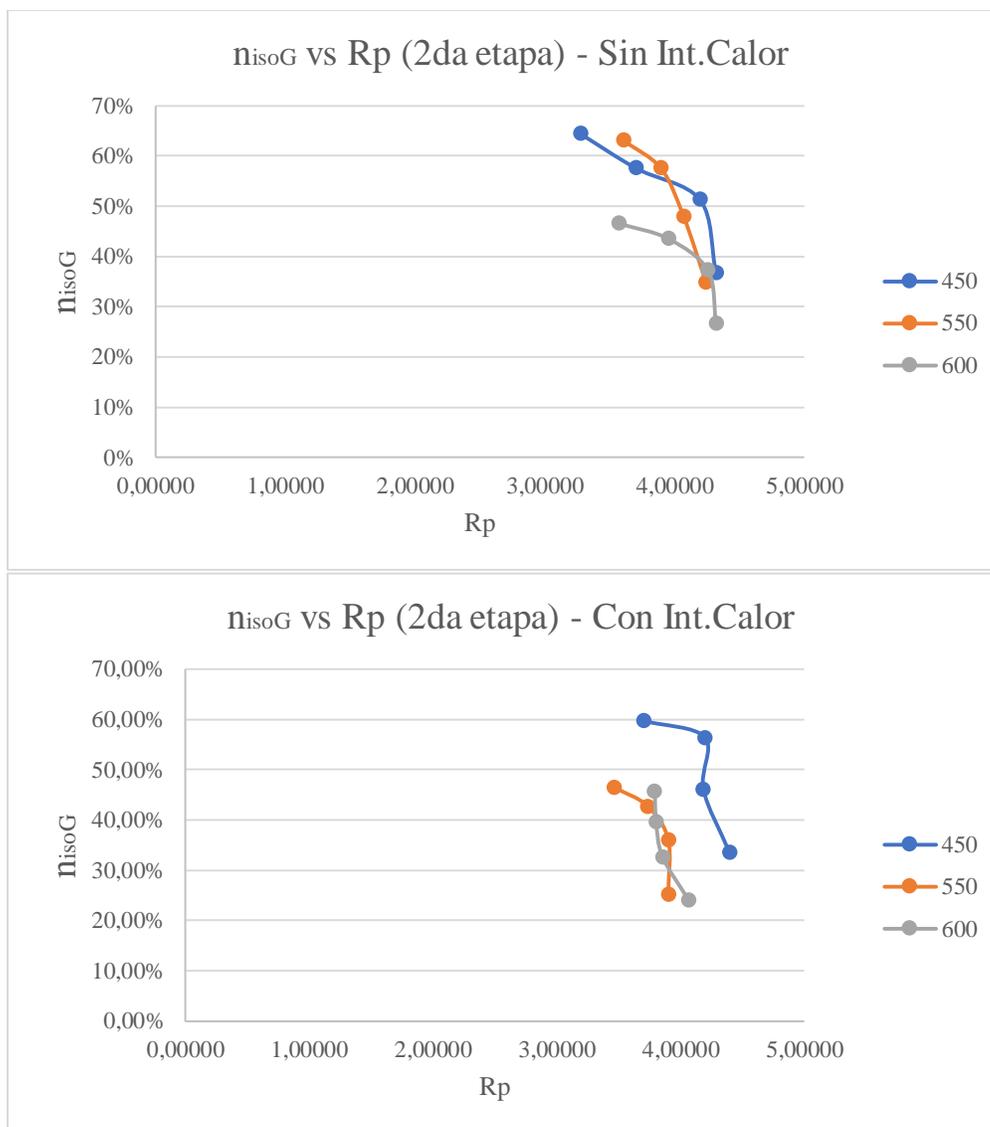


Análisis:

En la presente se puede evidenciar una vez más que la relación de presión aumenta si la velocidad de compresión disminuye, y a su vez la eficiencia volumétrica disminuye a razón que la velocidad aumenta y la diferencia entre etapas se debe a que en la primera no existe parámetros previos al proceso de compresión, como si ocurre en la segunda etapa donde en la entrada ingresa aire con temperatura y presión de descarga de la primera etapa, la importancia de este análisis radica sobre la eficiencia volumétrica que si se lo compara con la **Figura 74** esta disminuye producto del uso del intercambiador de calor.

Figura 79

Eficiencia Isotérmica General vs Relación de presión, con y sin intercambiador de calor.



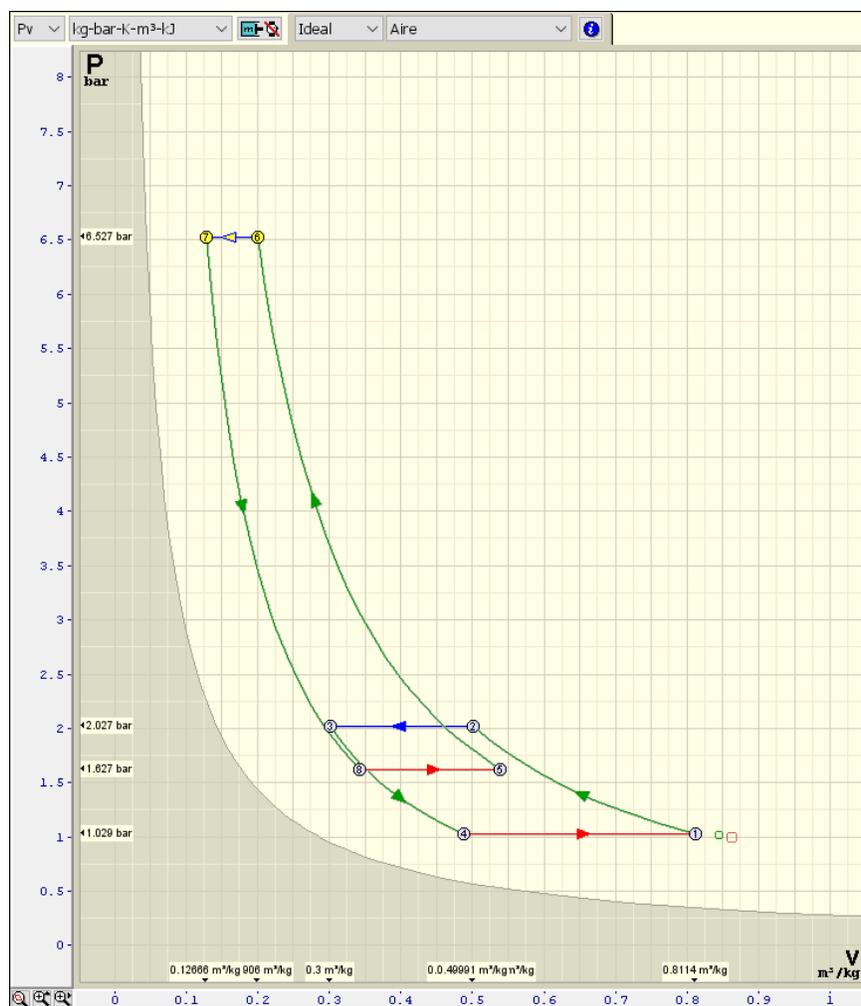
Análisis:

De acuerdo a la **Figura 79**, la eficiencia isotérmica general del proceso, aumenta en el caso de sin intercambiador de calor debido a que la masa de aire se ve afectada por la temperatura que se genera durante la primera etapa de compresión, por lo contrario en el caso de uso del intercambiador de calor la masa de aire caliente se refresca en el mismo al atravesarlo antes de la entrada a la segunda etapa, lo que hace que la eficiencia isotérmica general disminuya, por otro lado la temperatura aumenta a

medida que aumenta la relación de compresión. Parte de este calor no puede evitar sumarse al sobrecalentamiento de la succión, reduciendo así la capacidad.

Figura 80

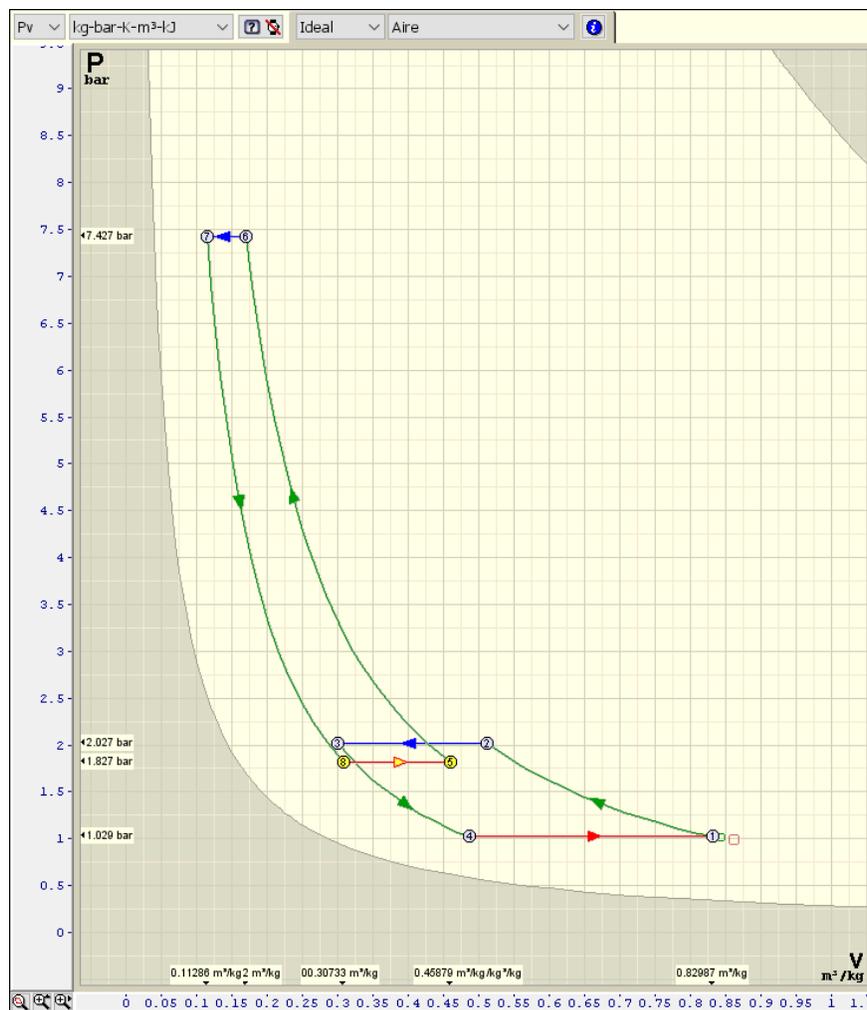
Diagrama P-V, sin intercambiador de calor $N=600$ rpm y $\Delta p=40$.



Nota: Diagrama realizado en software Termograf. V5.7, con los parámetros obtenidos.

Figura 81

Diagrama P-V, con intercambiador de calor $N=600 \text{ rpm}$ y $\Delta p=40$.



Nota: Diagrama realizado en software Termograf. V5.7, con los parámetros obtenidos

Capítulo VI

Descripción operacional y análisis de psicometría

Puesta en marcha

1. Abra la válvula de control de flujo de masa de aire en el panel de instrumentos y asegúrese de que la presión del tanque de almacenamiento sea cero.
2. Colocar los graficadores en ambas unidades de compresión.
3. Encienda el tablero principal de las dos unidades de compresión.
4. Encienda el interruptor de ENCENDIDO / APAGADO de las cajas de control y asegúrese de que la perilla de control de cada reóstato esté en cero.
5. Mueva la perilla de control del reóstato de cada caja de control para obtener una velocidad de aproximadamente 450 rpm en ambos motores.
6. Cierre la válvula de flujo de masa de aire en el panel de instrumentos para permitir que se acumule presión en el tanque de almacenamiento.
7. Permita que los compresores se calienten.
8. Verifique que todos los instrumentos estén registrando lecturas y ajuste el equilibrio del resorte del brazo de torsión.
9. Cuando la presión alcanza aproximadamente 6 bares, abra lentamente la válvula de flujo de masa de aire para mantener la presión, vigilando los niveles del manómetro.
10. Registre los datos necesarios de presiones, temperaturas, velocidades, fuerzas, voltajes y corrientes.
11. Al finalizar, mover el reóstato de velocidad a cero de cada una de las etapas simultáneamente y apagar el equipo desde la caja de control.

Precauciones operativas

- El compresor puede funcionar dentro de las siguientes condiciones.
- Las válvulas de seguridad están instaladas en las partes necesarias del sistema y limitarán la operación a una presión máxima de aproximadamente 11 bar.
- No es deseable operar el compresor a velocidades inferiores a 450 rpm, ya que, con una alta presión de descarga, la carga alternativa puede producir un deslizamiento excesivo de la correa.
- Las unidades deben ser apagadas al mismo tiempo y siempre se debe drenar el condensado del tanque de almacenamiento y del intercambiador de calor luego de realizada la práctica.
- Para detener la unidad, solo es necesario mover rápidamente la perilla de control a cero y apagarla.
- Cuando se detenga la unidad, drene el condensado del depósito tanto del intercambiador de calor como del tanque de almacenamiento, a través de su respectiva válvula de drenaje provista.
- El intercambiador de calor puede activarse o desactivarse para el arranque, si se conecta el intercooler es necesario que el suministro de agua este operativo, ya que se pueden producir temperatura del aire bastantes altas provenientes de la primera etapa.
- La parada de emergencia de la unidad se puede lograr mediante el uso del interruptor ON / OFF.

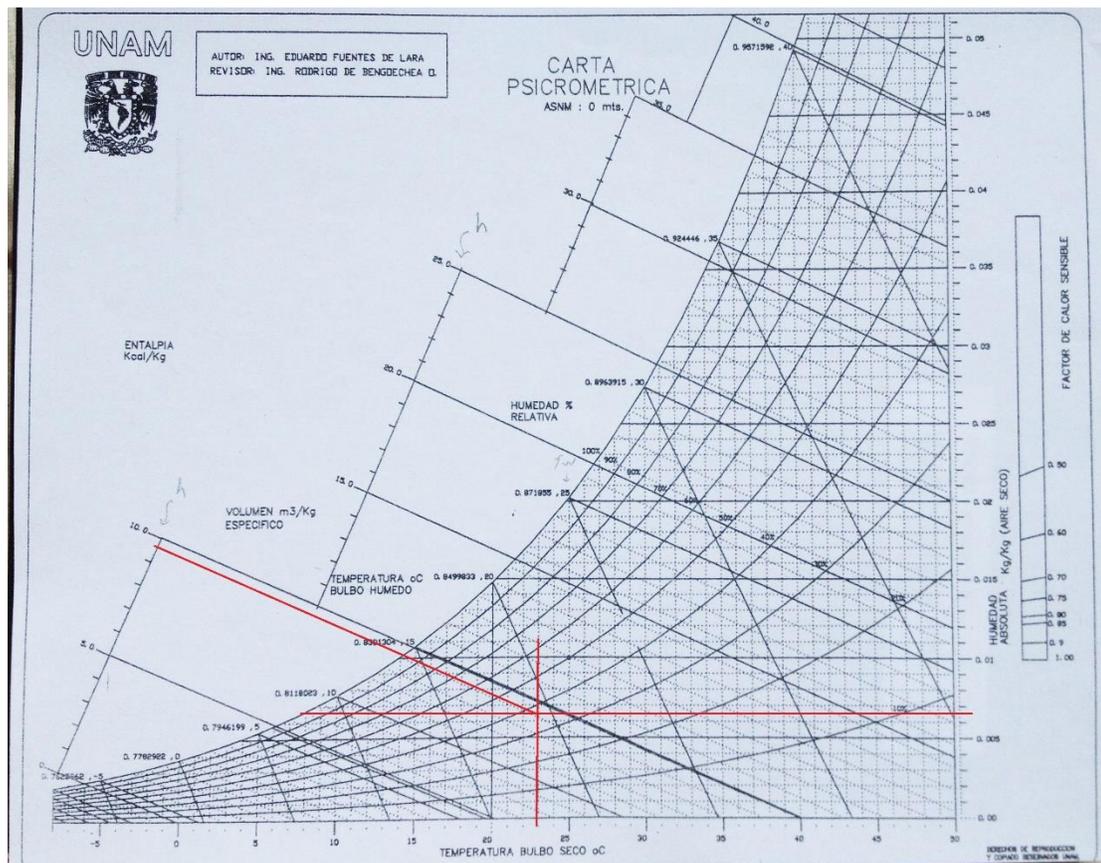
Nota: La perilla de control tendría que volver a cero antes de que la unidad pudiera reiniciarse debido al sistema de bloqueo en la caja de control.

Análisis de Psicometría

Como un aporte adicional en el proyecto se presenta el análisis de psicometría, a continuación, se desarrolla mediante dos métodos la obtención de parámetros fundamentales para el análisis psicométrico, el uno mediante el uso de la carta psicométrica (ver *Figura 82*) y en segundo lugar se presenta como apoyo la obtención de los mismos parámetros mediante el software Computer-Aided Thermodynamic Tables 3, CATT3 Versión 1.0. (Ver *Figura 83*) y Anexo G.

Figura 82

Carta Psicométrica a la entrada del sistema sin Intercambiador de calor a 450 rpm



A continuación, se presentan los datos obtenidos de la cada carta psicométrica, con la variación de datos de entrada siendo la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa (Ver **Tabla 30** y **Tabla 32**) tanto del sistema de compresión sin intercambiador

de calor y con intercambiador de calor, a la entrada y salida del sistema, con la variación de rpm correspondiente según el caso, vale indicar que de ser necesario verificar estos valores se lo puede hacer acudiendo al Anexo H, donde se presenta todas las cartas psicométricas ya mencionadas.

Tabla 36

Cuadro Resumen de Datos de Carta Psicométrica, en compresión sin intercambiador de calor

#	Dry Bulb Temp (Tbs)	Wet Bulb Temp (Twet)	Enthalpy (Ht)	Enthalpy (Ht)	Absolute Humidity (Habs)	Relative Humidity (HR)	Dew Point Temp (Tdew)	Compression Speed (N)	Location
	°C	°C	kcal/kg (dry air)	kJ/kg (dry air)	kg water/kg dry air	%	°C	rpm	In/Out
1	23	14.2	9.6	40.17	0.0065	37	7.8	450	In
2	23.5	14.6	9.9	41.42	0.0066	36	7.8	450	Out
3	23.1	14.5	9.7	40.58	0.0069	38	8.1	550	In
4	23.6	14.5	9.8	41	0.0065	36	8	550	Out
5	23.7	15	10	41.84	0.0069	38	8.2	600	In
6	24.3	15.1	10.1	42.26	0.0068	35	8	600	Out

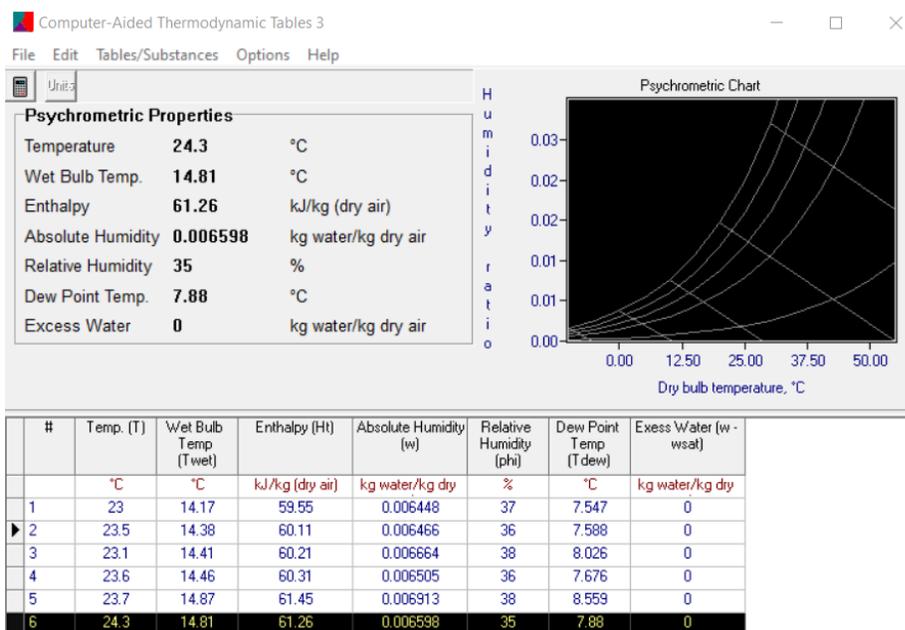
Tabla 37

Cuadro Resumen de Datos de Carta Psicrométrica, en compresión con intercambiador de calor

#	Dry Bulb Temp (Tbs)	Wet Bulb Temp (Twet)	Enthalpy (Ht)	Enthalpy (Ht)	Absolute Humidity (Habs)	Relative Humidity (HR)	Dew Point Temp (Tdew)	Compression Speed (N)	Location
	°C	°C	kcal/kg (dry air)	kJ/kg (dry air)	kg water/kg dry air	%	°C	rpm	In/Out
1	23.1	15.9	9.9	41.42	0.007	39	9	450	In
2	23.6	14.5	9.7	40.58	0.0066	37	8	450	Out
3	23.2	15	10	41.84	0.007	39	9	550	In
4	23.7	15	10	41.84	0.0069	37	8	550	Out
5	23.5	14.5	9.8	41	0.0067	38	7.9	600	In
6	24.4	15.1	10.1	42.26	0.0068	36	8.5	600	Out

Figura 83

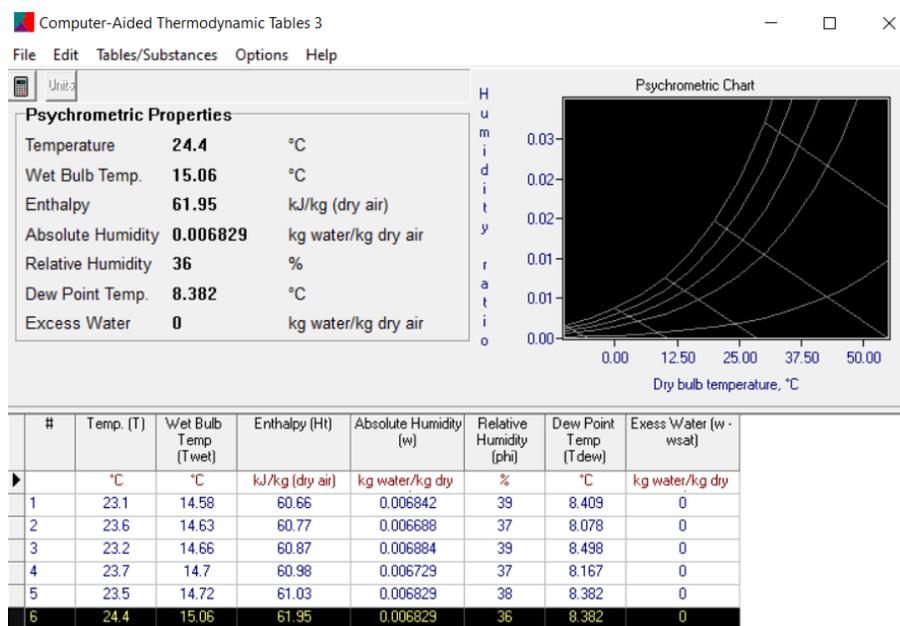
Parámetros de psicometría obtenidos con Software CATT3 sin intercambiador de calor.



Nota: Tomado de software Computer-Aided Thermodynamic Tables 3, Versión 1.0

Figura 84

Parámetros de psicometría obtenidos con Software CATT3 con intercambiador de calor.

**Tabla 38**

Determinación de Errores Porcentuales en el ejemplo del sistema de compresión sin intercambiador de calor con 450 rpm

Parámetros determinados:	%Error
Tbh_in [°C]	0.21
Tw_in [°C]	3.35
Habs_in [kgwater/kgair]	0.81
h_in [kJ/kg]	3.25

Como se puede ver en última tabla, dichos errores son menores al 5% lo que hace confiable el uso del software para fines netamente académicos, como observación los errores producidos principalmente se da en la determinación de los parámetros de forma manual de la carta psicométrica.

Capítulo VII

Análisis económico

Materiales y equipos

Al finalizar el proyecto es necesario detallar el costo total del mismo, incluyendo costo de elementos y dispositivos utilizados tanto en la parte de recuperación del equipo como en la parte de la puesta a punto para su funcionamiento óptimo, además del costo de los elementos para la implementación de los instrumentos digitales, así como los costos de mano de obra, dichos costos se presentarán en las siguientes tablas:

Tabla 39

Costos de recuperación y puesta a punto del equipo

No.	Descripción	Cantidad	Costo	
			Unitario	Total
1	Limpieza por ultrasonido de válvulas	2	\$ 62.00	\$ 124.00
2	Construcción de entredós	1	\$ 53.00	\$ 53.00
3	Construcción de eje principal cigüeñal	1	\$ 45.00	\$ 45.00
4	Limpieza de cámara cilíndrica y anillos	2	\$ 60.00	\$ 120.00
5	Limpieza de Carter	2	\$ 20.00	\$ 40.00
6	Cuerpo de llave de accionamiento	1	\$ 95.00	\$ 95.00
7	Mando de llave de accionamiento	1	\$ 45.00	\$ 45.00
8	Anillo y tuerca	1	\$ 10.00	\$ 10.00
9	Eslabones	2	\$ 20.00	\$ 40.00
10	Bocines para eslabones	4	\$ 10.00	\$ 40.00
11	Tornillos perforados para hilo	4	\$ 5.00	\$ 20.00

No.	Descripción	Cantidad	Costo	
			Unitario	Total
12	Rodillo de guía y soporte	1	\$ 20.00	\$ 20.00
13	O-rings para llave de rotámetro	2	\$ 0.56	\$ 1.12
14	Juegos de carbones	2	\$ 1.15	\$ 2.30
15	Fusibles	4	\$ 0.38	\$ 1.52
16	Corrección de falso contacto	2	\$ 15.40	\$ 30.80
17	Servicio de barnizado	2	\$ 5.80	\$ 11.60
18	Servicio de prueba de funcionamiento de reóstatos	2	\$ 5.00	\$ 10.00
19	Líquido limpia carburador	1	\$ 1.50	\$ 1.50
20	Líquido manométrico 200ml	1	\$ 35.50	\$ 35.50
21	Servicio de calibración	3	\$ 25.00	\$ 75.00
22	Termómetros de Hg	2	\$ 4.00	\$ 8.00
23	Tornillos, arandelas, mangueras, acoples, aceite, etc.	1	\$ 32.00	\$ 32.00
	Subtotal 1			\$ 861.34

Nota: Parte de los materiales y equipos fueron facilitados por el laboratorio.

Tabla 40*Costos de implementación de monitoreo de datos*

No.	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Sensor de presión AKOZON	3	\$ 80.00	\$ 240.00
2	Sensor de presión MPXV5004	3	\$ 24.75	\$ 74.25
3	Módulo encoders B83609 HC-020K	2	\$ 8.00	\$ 16.00
4	Termopar tipo K	3	\$ 9.00	\$ 27.00
5	Sensor Ds18b20	4	\$ 7.00	\$ 28.00
6	Modulo Max6675	3	\$ 4.50	\$ 13.50
7	Pantalla Nextion 3.5 pulgadas	2	\$ 52.50	\$ 105.00
8	Arduino Mega 2250	2	\$ 30.00	\$ 60.00
9	Higrómetros	2	\$ 7.00	\$ 14.00
10	Case de pantalla 3.5 pulgadas	2	\$ 10.00	\$ 20.00
11	Gabinete metálico	2	\$ 23.76	\$ 47.52
12	Indicador luminoso	2	\$ 4.50	\$ 9.00
13	Selector On/Off	2	\$ 2.10	\$ 4.20
14	Manguera automatización M6	8	\$ 1.20	\$ 9.60
15	Tomacorriente 110V	2	\$ 3.00	\$ 6.00
16	Cable concéntrico #14	7	\$ 0.85	\$ 5.95
17	Tee (H-M-H) 1/4"	3	\$ 3.23	\$ 9.69
18	Bushing 1/4" x 1/8"	3	\$ 0.89	\$ 2.67
19	Fuente 12V-3A	1	\$ 13.39	\$ 13.39
20	Tee rápida 1/4"	4	\$ 1.50	\$ 6.00
21	Manguera Vinyi reforzada	6	\$ 1.96	\$ 11.76

No.	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
22	Llave D/Manguera 1/2"	1	\$ 4.27	\$ 4.27
23	Unión hembra	1	\$ 2.52	\$ 2.52
24	Canaleta ranurada	1	\$ 5.00	\$ 5.00
25	Unión reductora M6 - M4	4	\$ 1.50	\$ 6.00
26	Manguera automatización M4	1	\$ 0.80	\$ 0.80
27	Fibra de vidrio	1	\$ 25.00	\$ 25.00
28	Caja de higrómetros	1	\$ 5.00	\$ 5.00
29	Mecanizado y soldadura Tee de bronce	3	\$ 10.00	\$ 30.00
	Subtotal 2			\$ 802.12

Costos indirectos

Tabla 41

Costos indirectos

Cantidad	Descripción	Costo Total
1	Asesoría programación	\$ 85.00
1	Servicios: luz y agua	\$ 35.00
1	Transporte	\$ 48.00
1	Insumos de oficina	\$ 22.00
	Subtotal 3	\$ 190.00

Costos directos*Remuneración a docente***Tabla 42***Remuneración de docente (tutor de tesis)*

Nombre	Cargo	Tiempo (hora)	Valor (hora)	Valor total
Dr. Reinaldo García	Tutor de tesis	70	\$ 20	\$ 1400.00
			Subtotal 4	\$ 1400.00

*Remuneración a estudiantes***Tabla 43***Remuneración de estudiantes responsables del proyecto*

Nombre	Cargo	Tiempo (hora)	Valor (hora)	Valor total
Sr. Cristhian Guano	Responsable del proyecto	400	\$ 2.38	\$ 952.00
Sr. Pablo Nepas	Responsable del proyecto	400	\$ 2.38	\$ 952.00
			Subtotal 5	\$ 1904.00

Costo total de proyecto**Tabla 44***Costo total de proyecto*

Descripción	Costo Total
Sub-Total 1	\$ 861.34
Sub-Total 2	\$ 802.12
Sub-Total 3	\$ 190.00
Sub-Total 4	\$1400.00
Sub-Total 5	\$ 1904.00
TOTAL	\$ 5157.46

El costo total del proyecto es de \$ 5157.46, este valor refleja todos los costos antes mencionados.

Capítulo VIII

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- La recuperación y puesta a punto del equipo de compresión de doble etapa se encuentra en condiciones operativas que aseguran el correcto funcionamiento de los sistemas tanto eléctricos, electrónicos y mecánicos del equipo garantizando así, la seguridad de los estudiantes y docentes durante la realización de las prácticas de laboratorio de la asignatura de Termodinámica Aplicada.
- Se logró determinar que el sistema de monitoreo de datos proporciona al operario una pronta interpretación de lectura de los instrumentos digitales, así como la reducción del error visual en los sé que incurre al utilizar instrumentos de medición análogos.
- La rehabilitación del graficador de accionamiento mecánico del compresor de doble etapa hizo posible establecer longitudes de carrera dentro del diagrama, así como áreas de ciclo real de compresión, parámetros necesarios para el cálculo de la potencia que absorbe el compresor posibilitando así con valores más cercanos a la realidad, se desarrollen de mejor forma las prácticas de laboratorio correspondiente a las asignaturas de Termodinámica y Termodinámica Aplicada.
- Con el método de comparación de gráficas entre parámetros se pudo realizar un análisis específico del comportamiento entre cada variable y cómo influye estos en el proceso termodinámico, representados en los resultados de las variables dependientes como, eficiencias, trabajos, índices politrópicos, etc.

- En términos generales se evidencia la reducción del trabajo de compresión con la utilización de un intercambiador de calor entre etapas, según las pruebas realizadas en el equipo dicha reducción alcanza un máximo de 5.74% respecto al trabajo de compresión sin la utilización de un intercambiador de calor entre etapas debido a que el trabajo que necesita el compresor disminuye conforme se reduce la temperatura del fluido, comprobando así que se produce un enfriamiento entre etapas que reduce el trabajo de compresión.
- Mediante las gráficas P-V obtenidas de cada caso del sistema de compresión de dos etapas con y sin intercambiador de calor y mediante la utilización del software Termograf, se concluye que, con la presencia de un interenfriador entre las etapas, se logra obtener a la salida del sistema obtener una presión 13.8% más alta de descarga, y a la vez ayuda a que la presión entre las etapas no reduzca demasiado.
- Se presenta como análisis adicional el uso de las temperaturas de bulbo seco y humedad relativa, para determinar el resto de parámetros psicométricos con ayuda de la carta psicométrica y comprobar dichos valores con el software CATT3, obteniendo resultados confiables con fines académicos.
- Tanto la guía de práctica como el manual de usuario son documentos fundamentales para el correcto funcionamiento del equipo y el éxito del desarrollo correcto de la práctica, sobretodo en el cumplimiento del objetivo de aprendizaje para la formación de futuros profesionales.

Recomendaciones

- Antes de comenzar la practica en el compresor de doble etapa se debe verificar el nivel de aceite utilizando la varilla de nivel y si es necesario rellenar se debe utilizar el aceite Shell Corena Oil D37 o su equivalente.
- Para la obtención de datos de las prácticas de laboratorio se debe esperar que las temperaturas se estabilicen para tener datos más exactos ya que se está comprimiendo un volumen considerable de aire.
- Para poder realizar una mejor comparativa entre los resultados sin intercambiador de calor y con intercambiador de calor es recomendable establecer las mismas condiciones iniciales tales como temperatura ambiente, tiempo de inactividad previo al inicio de la práctica (mínimo 30 min) y el tiempo de funcionamiento del equipo previo al registro de datos.

Referencias

- Agüero, M. (2017). *Sistema de adquisición de datos*. Obtenido de <http://materias.df.uba.ar/mta2019c1/files/2014/08/Adquisicion-de-datos-Aguero.pdf>
- Ambrozik, A., Kurczyński, D., & Łagowski, P. (Diciembre de 2017). Method for Determining Volumetric Efficiency and Its Experimental Validation. *Transport and Aerospace Engineering*, 5-17.
- Berrío, L., & Ochoa, S. (2007). Generación de aire comprimido: Compresores en Neumática Básica. En S. O. Luis Berrío, *Generación de aire comprimido: Compresores en Neumática Básica* (págs. 26-27). Colombia: Fondo Editorial ITM.
- Bloch, H. (2006). *How a compressor works "A Practical Guide to COmpressor Technology*. New Jersey: John wiley & Sons.
- Buenaño, R. (2001). *Historial de registro de mantenimiento*. Quito.
- Cengel, Y. A. (2012). Termodinámica. En *Termodinámica* (pág. 71). México, D.F.: McGraw-Hill.
- Company, G. (2018). *Procesos industriales - Termodinámica*.
- Davalos, P. (2010). *Máquinas y Equipos Térmicos II*. Veracruz.
- Dossat, R. (1986). *Principios de refrigeración, traducido del ingles por Armando Garza Cardenas*. México: Universal.
- Everett, R. V. (2010). *Transient Air Dynamics Modeling for an Advanced Alternative Fueled Engine*. Obtenido de https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/47310/Ryan_Everett_Honors_Thesis.PDF?sequence=1&isAllowed=y
- Fernández, P. (2008). *Libros sobre Ingeniería Energética*. Obtenido de Compresores: <http://es.pfernandezdiez.es/>

- Freescale. (05 de 2015). *Data Sheet Technical Data*. Obtenido de <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPXV5004G.pdf>
- Gutierrez, M., & Iturralde, S. (2017). *Fundamentos Basicos de Instrumentacion y Control*. Santa Elena: Instrumentación aplicada a la.
- Hoyos, B. A., & Mejía, M. C. (2009). *Fundamentos de termodinámica clásica para ingeniería*. Medellín: Colección Facultad de Minas 120 años.
- Hoyos, B., & Mejia, M. (2009). *Fundamentos de la Termodinámica Clásica para Ingeniería*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Instruments, N. (2021). *ACADEMIA EN LATINOAMÉRICA DOCUMENTS*. Obtenido de <https://www.ni.com/es-cr.html>
- Jiménez, J. A., Gutiérrez, C. D., & Barbosa, J. G. (2014). *Termodinámica*. México: Patria.
- Joy-IT. (19 de 07 de 2017). *JOY-IT*. Obtenido de <https://gzhls.at/blob/ldb/5/e/9/9/a2f20497f81bf5eff4e887cdce13885c583e.pdf>
- Kejuruteraan, F. (s.f.). *Thermodynamics II*. Obtenido de <http://www.fkm.utm.my/~mohsin/sme2423/03.compressors/03.compressors.pdf>
- Kindler, H., & Kynast, H. (2001). *Matemática aplicada para la técnica del automóvil*. Eschborn - Alemania: GTZ, Sociedad Alemana de Cooperación Técnica.
- Manrique, J. (2005). Termodinámica. En J. Á. Valadez, *Termodinámica* (pág. 14). México: Alfaomega.
- Martínez, A. d. (2007). *Termotecnia basica para ingenieros quimicos: procesos termodinamicos y maquinas*. Cuenca - España: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- Mocada, L. (2014). *Bombas, Compresores y Ventiladores*. Trujillo: GIANPERCY.
- Montes, D. (2015). *Termodinámica y cenemática de la compresión del gas natural*. Ciudad de México.

- Muñoz, M., & Rovira de Antonio, A. (2014). *Máquinas Térmicas*. Madrid - España: UNED.
- Nextion. (2011). *Nextion*. Obtenido de <https://nextion.tech/datasheets/nx3224t024/>
- Rodriguez, J. (1990). *Introducción a la Termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería*. Mexico: UTN.
- Sanchez, J. A. (2006). *Instrumentacion y control avanzado de procesos*. España: Ediciones Díaz de Santos.
- Taylor, B. (12 de 10 de 2020). *Tanques receptores de aire*. Obtenido de Fluid-Aire Dynamics: <https://fluidairedynamics.com/everything-you-should-know-about-compressed-air-receiver-tanks/>
- Toapanta, O. (2009). *Implementación de un análisis de mantenimiento basado en condiciones de los compresores reciprocantes y de tornillo*. Riobamba.
- Villalba, H. (2011). *Motores de corriente continua*. Mexico: MCL Ledesma.
- Walter, J. (15 de Febrero de 2013). *THE ENGINEER INDICATOR*. Obtenido de Archiving Industry: <https://www.archivingindustry.com/Indicator/contentback.htm>
- Yanez, D. (2020). Obtenido de Lifeder.com: <https://www.lifeder.com/instrumentos-medir-presion/#>
- Zahurul, H. (2018). *Volumetric Efficiency of Engines*. Obtenido de http://zahurul.buet.ac.bd/ME417/ME417_VolumetricEfficiency.pdf

Anexo A: Características pegamento epóxico PEGATANKE

Anexo B: Ficha técnica MPXV5004DP

Anexo C: Ficha técnica DS18B20

Anexo D: Ficha técnica AKOZON

Anexo E: Ficha técnica HC-020K

Anexo F: PID proceso de doble etapa de compresión

Anexo G: Parámetros software CATT

Anexo H: Cartas Psicométricas

Anexo I: Guía de práctica de laboratorio

Anexo J: Código de programación primera etapa

Anexo K: Código de programación segunda etapa