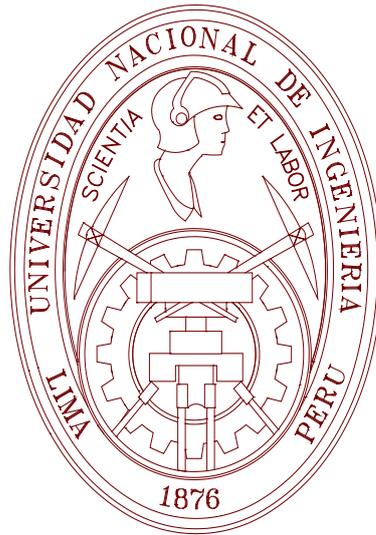


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



**AMPLIACION DE LA CAPACIDAD DE AIRE COMPRIMIDO DE
LA RED DE LA CENTRAL TERMoeLECTRICA DE ILO 1**

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

MARIO LUIS PANTA FARFAN

PROMOCION 2005-I

LIMA-PERU

2008

TABLA DE CONTENIDO

PRÓLOGO	1
CAPITULO I	3
INTRODUCCIÓN	3
1.1. Antecedentes	4
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo principal	17
1.2.2. Objetivos específicos	17
CAPITULO II	18
SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA INSTRUMENTOS DE CONTROL	18
2.1. Unidad de compresión	19
2.1.1. Tipos de compresores	20
2.1.2. Sistema de agua de enfriamiento de compresoras	29
2.2. Unidad de almacenamiento	31
2.3. Unidad de tratamiento del aire comprimido	35
2.3.1. Valores límites de contaminantes en el aire comprimido	36
2.3.2. Filtros de aire comprimido	40
2.3.3. Eliminación de la humedad	41
2.4. Conexión a la red	48
CAPITULO III	50
CÁLCULO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS	50
3.1. Compresor	50
3.1.1. Requerimiento de aire	50
3.1.2. Requerimiento de presión	50

III

3.2.	Tanque receptor	57
3.2.1.	Cálculo del volumen del tanque receptor	57
3.2.2.	Cálculo del espesor del tanque receptor	58
3.2.2.1.	Cálculo del espesor de la tapa semielíptica	58
3.2.2.2.	Cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico	59
3.3	Unidad de tratamiento del aire comprimido	59
3.3.1.	Cálculo de presión de punto rocío	60
3.3.2.	Filtro químico	63
3.4.	Descripción de equipos seleccionados	63
3.4.1.	Filtro químico	63
3.4.2.	Compresor tipo tornillo modelo Sierra H150W	66
3.4.2.1.	Sistema de aire comprimido	69
3.4.2.2.	Sistema de eliminación del condensado	71
3.4.2.3.	Sistema de lubricación	72
3.4.2.4.	Sistema de refrigeración	72
3.4.3.	Secador de adsorción regenerativo modelo TZ820	73
CAPITULO IV		76

CIMENTACIÓN Y MONTAJE ELECTROMECAÁNICO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA INSTRUMENTOS DE CONTROL.

4.1.	Ubicación de equipos: Filtros químicos, compresoras, tanque y secadores	76
4.2.	Cimentación	83
4.2.1.	Cálculo del diámetro de los pernos de anclaje	85
4.2.2.	Cálculo de la fundación de concreto	87
4.3.	Montaje Electromecánico	90
4.3.1.	Montaje Mecánico	90

IV

4.3.1.1. Materiales y colores utilizados en tuberías	93
4.3.1.2. Sistema de agua de enfriamiento para las compresoras	93
4.3.2. Montaje Eléctrico	96
4.3.2.1. Cálculo de la sección de los cables eléctricos	96
4.3.2.2. Estudios de coordinación y pruebas de dispositivos de protección	99
4.3.2.3. Medición de la resistencia de aislamiento de cables y motores	99
CAPITULO V	102
COSTOS DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO	102
CONCLUSIONES	110
RECOMENDACIONES	111
BIBLIOGRAFIA	112
PLANOS	
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Proceso de Generación de la CTILO1.	3
Figura 1.2	Actuadores neumáticos de pistón y de diafragma.	4
Figura 1.3	Compresoras Joy modelo WGO-9 libre de aceite de 157 scfm.	5
Figura 1.4	Compresoras Atlas Copco ZR-75 libre de aceite de 420 scfm.	5
Figura 1.5	Proceso de generación de la CTILO1 con la nueva Fundición.	6
Figura 1.6	Proceso de generación de la CTILO1 con la nueva Fundición.	7
Figura 1.7	Suministro de vapor de SPC a CTILO1 con la nueva Fundición.	7
Figura 1.8	Horno Isasmelt y caldera Oschatz de Fundición de SPC.	8
Figura 1.9	Sobrecalentador de vapor de Fundición de SPC.	8
Figura 2.1	Componentes del sistema de aire comprimido.	10
Figura 2.2	Tipos de compresores clasificados de acuerdo a su principio de trabajo.	11
Figura 2.3	Temperatura teórica de descarga adiabática para aire a 70 °F en la succión	12
Figura 2.4	Comparación teórica de potencia por cada 100 scfm requerida para una, dos y tres etapas de compresión adiabática.	13
Figura 2.5	Compresor de paletas deslizantes.	13
Figura 2.6	Compresor de lóbulos.	14
Figura 2.7	Rotores de una compresora de tornillos modelo Sierra de Ingersoll-Rand	14

VI

Figura 2.8	Vista de corte de los elementos de la compresora de tornillos.	15
Figura 2.9	Compresora tipo tornillo libre de aceite enfriada con aire.	16
Figura 2.10	Accesorios del tanque receptor de aire comprimido.	18
Figura 2.11	Instalación de un sistema de aire comprimido puede producir diferentes clases de calidad según la Norma ISO 8573.1	22
Figura 2.12	Secado por enfriamiento.	25
Figura 2.13	Secador por absorción	26
Figura 2.14	Secado por adsorción.	27
Figura 2.15	Red de aire comprimido para instrumentos de control de CTILO1.	28
Figura 3.1	Rangos aproximados de aplicación para la mayoría de compresores, el eje “y” es la presión de trabajo en psig .	30
Figura 3.2	Filtro químico contra la contaminación gaseosa corrosiva.	36
Figura 3.3	Diagrama de flujo del compresor modelo Sierra H150W.	38
Figura 3.4	Desecante alúmina activada y una magnificación de una sección mostrando poros.	41
Figura 3.5	Diagrama de proceso de secado regenerativo con aire seco.	42
Figura 4.1	Distancias mínimas del filtro químico.	43
Figura 4.2	Esquema de instalación típica del filtro químico.	43
Figura 4.3	Esquema de la toma remota de aire de la compresora Sierra 150 hp .	44
Figura 4.4	Esquema de Instalación típica de equipos de Ingersoll-Rand.	44
Figura 4.5	Diagrama de flujo del sistema de aire comprimido.	45
Figura 4.6	Esquema de ubicación de los equipos.	46

VII

Figura 4.7	Diagrama de fuerzas de los equipos.	47
Figura 4.8	Diagrama del sistema agua de enfriamiento para las Compresoras.	53
Figura 4.9	Cálculo del conductor de fuerza de las compresoras mediante el software Cepermetic para Windows.	54
Figura 4.10	Cálculo del conductor de fuerza de los secadores y válvula solenoides mediante el software Cepermetic para Windows.	55
Figura 4.12	Fotografía durante el montaje electromecánico.	56
Figura 4.13	Fotografía durante el montaje electromecánico.	56
Figura 4.14	Fotografía del sistema de aire comprimido en operación.	57

LISTA DE TABLAS Y CUADROS

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Capacidad instalada y suministro garantizado de aire comprimido para instrumentos de control de CTILO1.	6
Tabla 3.1	Presión de trabajo del compresor.	29
Tabla 4.1	Cálculo de la fuerza sísmica según Norma E.030: Diseño Sismorresistente.	47
Tabla 4.2	Cálculo de las reacciones (R1).	48
Tabla 4.3	Esfuerzos permisibles por tracción y por corte.	48
Tabla 4.4	Cálculo de fuerza por tracción y por corte actuante.	48
Tabla 4.5	Esfuerzo actuante sobre el piso y medidas de la fundación de concreto.	49
Tabla 4.6	Verificación de la fundación debido a los esfuerzos por corte y por flexión.	50
Tabla 4.7	Longitud de la tubería de impulsión para distintos diámetros de tuberías.	51

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1	Especificaciones del servicio de suministro de aire comprimido para instrumentos de control.	2
Cuadro 2.1	Concentración máxima de contaminantes en el agua de enfriamiento.	17
Cuadro 2.2	Calidad del aire comprimido según Norma ISO 8573.1	20
Cuadro 2.3	Calidad de aire para diferentes aplicaciones según Pneurop.	
Cuadro 3.1	Comparación de potencia y presión de compresores.	29
Cuadro 3.2	Características de equipos de Ingersoll Rand y Atlas Copco: compresora, secador y filtro químico.	
	31	
Cuadro 3.3	Data atmosférica anual 2007 de CTILO1.	33
Cuadro 4.1	Variables para el cálculo de la fuerza sísmica.	47
Cuadro 5.1	Costos de inversión inicial del sistema de aire comprimido.	58
Cuadro 5.2	Resumen de costos en USD y % de la inversión inicial.	59
Cuadro 5.3	Flujo de amortización.	60
Cuadro 5.4	Flujo de caja (2008 - 2017) en condiciones actuales.	60
Cuadro 5.5	Flujo de caja (2008 - 2017) en condiciones renegociadas.	61

SIGLAS

ACB	Air circuit breaker.
API	American Petroleum Institute.
ASME	American Society of Mechanical Engineers.
bhp	Britain horse power.
CAGI	Compressed Air & Gas Institute
CO ₂	Dióxido de carbono.
CPVC	Policloruro de vinilo clorado.
CTILO1	Central Termoeléctrica de Ilo 1.
FRP	Fibra de vidrio reforzada de poliéster.
gpm	Galones por minuto.0
H ₂	Hidrógeno.
in	inch ó pulgada.
ISO	International Standards Organization.
kPa	Kilo pascal.
LRFD	Load resistant factor design.
NTE	Norma Técnica de Edificaciones.
NTP	Norma Técnica Peruana.
OSHAS	Occupational Health and Safety Assessment Series
PAMA	Programa de adecuación de medio ambiente.
PNEUROP	European Committee of Compressors, Vacuum Pumps and Pneumatic Tools.
psig	Pound square in gauge ó libra fuerza/pulgada ² manométrica.
ppm	Partes por millón.
RNE	Reglamento Nacional de Edificaciones.

XI

rpm	Revoluciones por minuto.
scfm	Standard cubic foot for minute ó pie cúbico estándar por minuto.
SEIN	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional.
SO ₂	Dióxido de azufre.
SPC	Southern Perú Copper.
TIE IN	Punto de conexión.
TIR	Tasa interna de rentabilidad.
USD	United State dollars ó dólares americanos.
VAN	Valor actual neto.

PRÓLOGO

La presente Tesis se ha dividido en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Introducción, describe brevemente los vínculos entre Enersur y Southern Perú Copper, el proceso de generación térmica y las redes de aire comprimido de la Central Térmica de Ilo 1, el proyecto de ampliación y modernización de la Fundición de Southern y lo que implica este proyecto para la Central en ampliar la capacidad instalada de la red de aire comprimido para instrumentos de control. También se detalla el objetivo principal y los objetivos específicos.

Capítulo 2, trata sobre los fundamentos teóricos para el desarrollo de la tesis, describe los componentes del sistema de aire comprimido para instrumentos de control, donde se desarrolla la unidad de compresión, tipos de compresores, la unidad de almacenamiento, la unidad de filtrado y secado, los valores límites de contaminantes en el aire comprimido y la conexión a la red, además de algunos conceptos que serán usados en la evolución del informe de tesis.

Capítulo 3, esta dedicado al cálculo y selección de los componentes del sistema de aire comprimido, se desarrolla el requerimiento de aire y de presión, la capacidad de flujo de aire y la presión de descarga del compresor, selección del tipo de

compresor, comparación y selección de propuestas, cálculo del volumen y espesor del tanque receptor, cálculo del punto de rocío, tipo de secador y descripción breve de los equipos de la propuesta seleccionada.

Capítulo 4, comprende la cimentación y montaje electromecánico del sistema de aire comprimido para instrumentos de control, desarrolla el diagrama de flujo del sistema de aire comprimido y la ubicación de equipos, el diseño civil que comprende el cálculo del diámetro de los pernos de anclaje y de la fundación de concreto, la parte electromecánica donde se calcula el dimensionamiento de las tuberías de aire y de agua de enfriamiento para las compresoras, cálculo de la sección de los cables eléctricos, los estudios de coordinación, pruebas de dispositivos de protección y la medición de la resistencia de aislamiento de cables y motores.

Capítulo 5, desarrolla el costo del sistema de aire comprimido para instrumentos de control en lo que respecta a equipos principales (compresoras, secadores, tanque y filtros químicos), materiales eléctricos e instrumentación y mecánicos, y el servicio por terceros de montaje e instalación, dando la inversión inicial. También desarrolla el financiamiento de una parte de la inversión inicial y el análisis de los costos y evaluación económica mediante el empleo de herramientas financieras, de valor actual neto (VAN) y la tasa interna de rentabilidad (TIR).

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Enersur es una empresa dedicada a la generación de energía eléctrica y tiene dentro de las instalaciones de la fundición de Southern Perú Copper (SPC) a la Central Termoeléctrica de Ilo 1 (CTILO1), que abastece de energía eléctrica al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

En 1997, Enersur compró la planta de fuerza de la fundición de cobre de Southern Perú Copper (SPC) y la denomina Central Termoeléctrica de Ilo1 (CTILO1). Enersur y SPC suscribieron un contrato energético que incluye un contrato de servicio de suministro de 1 200 scfm de aire comprimido para instrumentos de control de la fundición de cobre.

En el 2005, Southern Perú Copper amplía y moderniza su fundición de cobre, lo que implica un incremento de 400 scfm en la demanda de aire comprimido, frente al nuevo requerimiento CTILO1 amplía la capacidad instalada de la red de aire comprimido para instrumentos de control.

CTILO1 me encarga la ampliación de la red de aire comprimido para instrumentos de control, donde debo de llevar a cabo las siguientes actividades: diseño, cálculo,

selección y compra de equipos, supervisión en las obras civiles y montaje electromecánico, comisionado y puesta a punto de los diferentes equipos y entrega de manuales de operación y mantenimiento.

La Tesis se constituye en la ampliación de la capacidad instalada de la red de aire comprimido de CTILO1 para suministrar en la cantidad y calidad de aire comprimido a los instrumentos de control de manera confiable y segura al cliente Southern Perú Copper (SPC).

1.1 ANTECEDENTES

Southern Perú Copper (SPC) vende su planta de Fuerza a Enersur en 1997. Enersur denomina a la ex planta de fuerza de SPC, La Central Termoeléctrica de Ilo1 (CTILO1) que está ubicada dentro del área de la fundición de cobre de SPC, localizada a 17 km al norte del Puerto de Ilo, distrito de Pacocha, provincia de Ilo, departamento de Moquegua.

Enersur y SPC suscribieron en 1997, un contrato de compra y venta de energía eléctrica que incluye un contrato de servicio dentro del cual se establece el suministro de aire comprimido limpio y seco para los instrumentos neumáticos de control de los hornos de fundición, planta de ácido y oxígeno con las especificaciones del cuadro 1.1:

Cuadro 1.1: Especificaciones del servicio de suministro de aire comprimido para instrumentos de control.

It	DESCRIPCIÓN	SERVICIO: AIRE PARA INSTRUMENTOS		
			Cantidad	Unidad
1	Especificaciones técnicas	Presión	100	psig
		Temperatura	80	F
2	Usuario	Hornos de fundición Planta de ácido & oxígeno		
3	Requerimiento		1 200	scfm

Fuente: Contrato de service agreement de Enersur con SPC, 1997.

La Central comprende las siguientes instalaciones principales:

- Edificio de la Planta de Fuerza, incluyendo dos turbogeneradores a diesel 2 de 35MW.
- Cuatro Calderas de fuego directo.
- Dos turbinas a vapor General Electric de 66 MW.
- Dos turbinas a vapor Frame 6 de 22 MW.
- Un generador eléctrico de emergencia de 3,3 MW.
- Dos plantas desalinizadoras .
- Poza de captación de agua de mar.
- Sistemas auxiliares: sistemas de enfriamiento, almacenamiento y suministro de combustible, lubricación, de aire comprimido, de reposición de agua, entre otros, necesarios para la generación de energía eléctrica.

La producción de agua para alimentación de calderas se obtiene de dos plantas desalinizadoras de 55 m³/h (240 gpm) cada una y con una planta desmineralizadora de 23 m³/h (100 gpm).

Las cuatro calderas de fuego directo utilizan petróleo residual de 500 SSF de viscosidad. La figura 1.1 muestra el proceso de generación termoeléctrica de CTILO1:

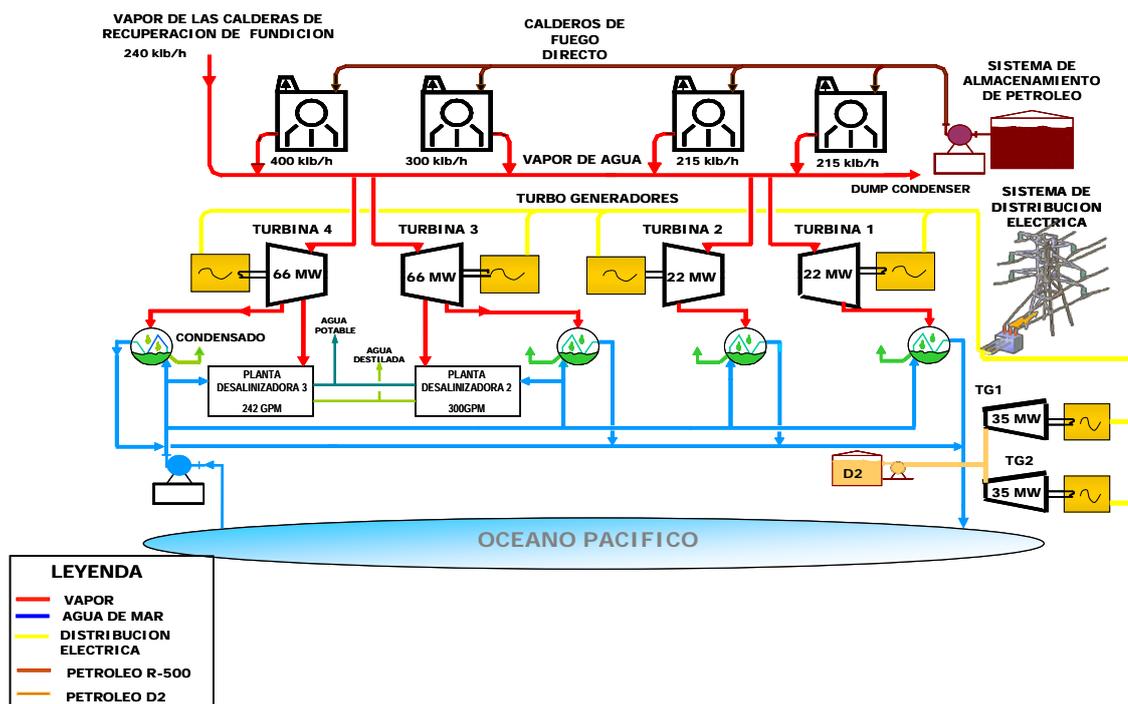


Figura 1.1: Proceso de Generación de la CTILO1.

Fuente: Diagramas de procesos de CTILO1, Enersur, 2003

Como se muestra en la figura 1.1 las cuatro calderas de recuperación de calor de los hornos de fundición de cobre de SPC y las cuatro calderas de fuego directo, envían vapor sobrecalentado para accionar las turbinas. Para transmitir la energía eléctrica generada hasta los centros de consumo. La Central cuenta con una subestación formada por interruptores, transformadores y barras de distribución. En ella, se eleva el nivel de tensión desde 13,8 kV (tensión de generación) hasta 138 kV. La energía eléctrica es transmitida hacia las minas de Cuajone y Toquepala,

Refinería de Ilo, Fundición de Ilo, así como al SEIN. La subestación y los sistemas de transmisión son de propiedad de SPC, quien cuenta con las respectivas concesiones. La Central está interconectada al SEIN a través de la subestación de Moquegua (220 kV).

La Central emplea agua de mar como agua de enfriamiento, para lo cual se cuenta con una instalación de toma de agua (intake) con 6 bombas de 23 000 gpm cada una.

CTILO1 cuenta con tres redes de aire comprimido y se describen brevemente:

1.- Red de aire comprimido para servicio general.- formada por dos compresoras tipo tornillo marca Atlas Copco, de dos etapas, enfriadas con agua, de 663 scfm de capacidad cada una, la presión manométrica de trabajo es 6,8 bar (100 psig). El aire comprimido para servicio general se utiliza:

- Como fluido de enfriamiento y sello de los visores, quemadores, encendedores y sopladores de hollín de las calderas de fuego directo.
- Para atomizar el petróleo diesel 2 de los encendedores y quemadores de las calderas.
- Para trabajos generales y limpieza de equipos.

El diagrama de flujo del sistema de aire comprimido de servicio general de CTILO1 se muestra en el Plano N° ILO1-A-QE-FD-042.

2.- Red de aire comprimido para soplado.- cuenta con tres compresoras tipo pistón, de tres etapas y 1 035 scfm cada una, enfriadas con agua y con una presión manométrica de trabajo de 17,2 bar (250 psig). El aire comprimido para soplado se utiliza para:

- Soplar el hollín, cenizas y otros depósitos del interior de las calderas de recuperación de calor de fundición y para las calderas de fuego directo de la Central.
- Operar los interruptores de potencia de aire comprimido (air circuit breakers ó ACB)
- Arrancar el grupo generador de emergencia diesel.

El diagrama de flujo del sistema de aire comprimido para soplado de CTILO1 se muestra en el Plano N° ILO1-AISE-QE-FD-046

- 3.- Red de aire comprimido para instrumentos de control.- Llamada así porque suministra aire comprimido a los instrumentos de control de procesos, es decir, a los instrumentos finales de un lazo de control por los cuales se realizan las variaciones deseadas en las magnitudes físicas que son objeto del control. Por ejemplo a los actuadores neumáticos de las válvulas de control que pueden ser del tipo pistón y de diafragma como lo muestra la figura 1.2, donde la posición de la válvula es función de la señal de control de presión.



Figura 1.2: Actuadores neumáticos de pistón y de diafragma.

Fuente: Especialización en Automática: Válvulas, Universidad Pontificia Bolivariana

La red de aire comprimido para instrumentos de control de CTILO1 suministra el fluido de trabajo a los actuadores neumáticos de las válvulas de control de las cuatro turbinas a vapor, de las cuatro calderas, del grupo diesel, de las plantas desalinizadoras, de la planta desmineralizadora, sistemas auxiliares y a través de tres tuberías se suministra aire comprimido a los instrumentos de control de la fundición de SPC.

El aire comprimido de esta red se utiliza en algunos procesos como para generar ozono, para desplazar el dióxido de carbono (CO_2) de la carcasa de los generadores para mantenimientos mayores y para el proceso de regeneración de resinas de la planta desmineralizadora, Para estas aplicaciones el aire debe ser limpio y seco.

La capacidad instalada de la red de aire de comprimido para instrumentos de control de CTILO1 es 1 625 scfm y está constituida por siete compresoras libres de aceite y enfriadas por agua. Cinco compresoras son reciprocantes tipo pistón marca Joy modelo WGO-9 y dos son compresoras rotativas tipo tornillo marca Atlas Copco, Las cinco compresoras marca Joy modelo WGO-9 libres de aceite son de una etapa y un cilindro de doble efecto de 157 scfm cada una. Tres funcionan permanentemente y dos están de respaldo, la figura 1.3 muestra las compresoras Joy:



Figura 1.3: Compresoras Joy modelo WGO-9 libre de aceite de 157 scfm .

Fuente: CTILO1, 2007

Las dos compresoras marca Atlas Copco modelo ZR-75, tipo tornillo libre de aceite de 420 scfm cada una, una funciona constantemente y la otra permanece de respaldo, la figura 1.4 muestra las compresoras Atlas Copco:



Figura 1.4: Compresoras Atlas Copco ZR-75 libre de aceite de 420 scfm .

Fuente: CTILO1, 2007

El Plano N° ILO1-AINS-QE-FD-029 muestra el diagrama de flujo de la red de aire comprimido para instrumentos de control de CTILO1. La capacidad instalada de la red es 1 625scfm, pero en redes de aire comprimido con deficiente o pobre mantenimiento las pérdidas por fugas pueden ser tan altas que están entre el 20 y 30% de la capacidad instalada, mientras que el porcentaje de pérdidas por fugas pueden ser menores al 10 % en redes con muy buen mantenimiento. Se considera 20% en pérdidas por fugas por ser una planta antigua (40 años) y con mantenimiento regular, para el calcular el suministro de aire comprimido para instrumentos de control que garantiza la central.

La tabla 1.1 muestra la capacidad instalada y el suministro de aire comprimido para instrumentos de control que se garantiza así como las pérdidas por fugas:

Tabla 1.1: Capacidad instalada y suministro garantizado de aire comprimido para instrumentos de control de CTILO1.

Compresoras	Capacidad Instalada (scfm)	Suministro total (scfm)	Suministro Garantizada (scfm)	Suministro Garantizado (scfm)
Joy	5 x 157 scfm	785	3 x 157	471
Atlas Copco	2 x 420 scfm	840	1 x 420	420
Total (scfm)		1 625		891
Pérdidas por fugas 20% (scfm)		325		178
Capacidad Neta (scfm)		1 300		713

Fuente: Datos de placa de Equipos.

CTILO1 garantiza un suministro de 891 scfm, para el consumo de SPC y de CTILO1 el cual no considera pérdidas por fugas manteniendo una alta confiabilidad por tener compresoras de respaldo. La Central consume el 30% (267 scfm) y SPC el 70 % (624 scfm) y tomando en cuenta que el requerimiento por contrato de servicios es 1 200 scfm, entonces, no se cuenta con la capacidad instalada para suministrar el requerimiento por contrato y a la vez el consumo propio de la central,

por lo tanto, si aumentaría el consumo de aire comprimido para instrumentos de control y si se requiere mantener el grado de confiabilidad de suministro se debe ampliar la capacidad instalada de la red.

En el 2005, con el objetivo de cumplir su programa de adecuación de medio ambiente (PAMA), SPC amplía y moderniza su fundición de cobre traducido en el cambio de sus cuatro hornos de 35 ton/h de concentrado de cobre cada uno por un solo horno denominado Isasmelt de 180 ton/h de concentrado de cobre y sus cuatro calderas recuperadoras de calor de 60 ton/h de vapor sobrecalentado cada una, por una nueva caldera recuperadora de calor denominada Oschatz de 220 ton/h de vapor saturado, una nueva planta de ácido, una nueva planta de oxígeno, un sobrecalentador de vapor y una nueva subestación; entonces la operación de generación de CTILO1 con la nueva fundición se muestran en las figuras 1.5 y 1.6:

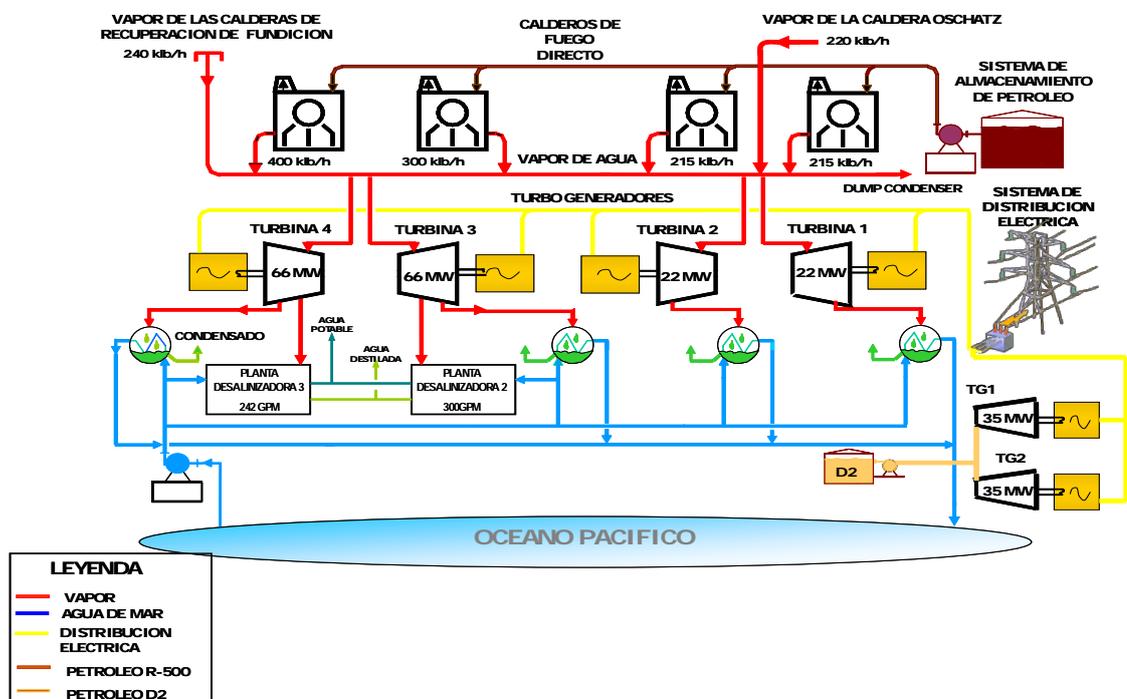


Figura 1.5: Proceso de generación de la CTILO1 con la nueva Fundición.

Fuente: Diagramas de procesos de CTILO1, Enersur, 2008.

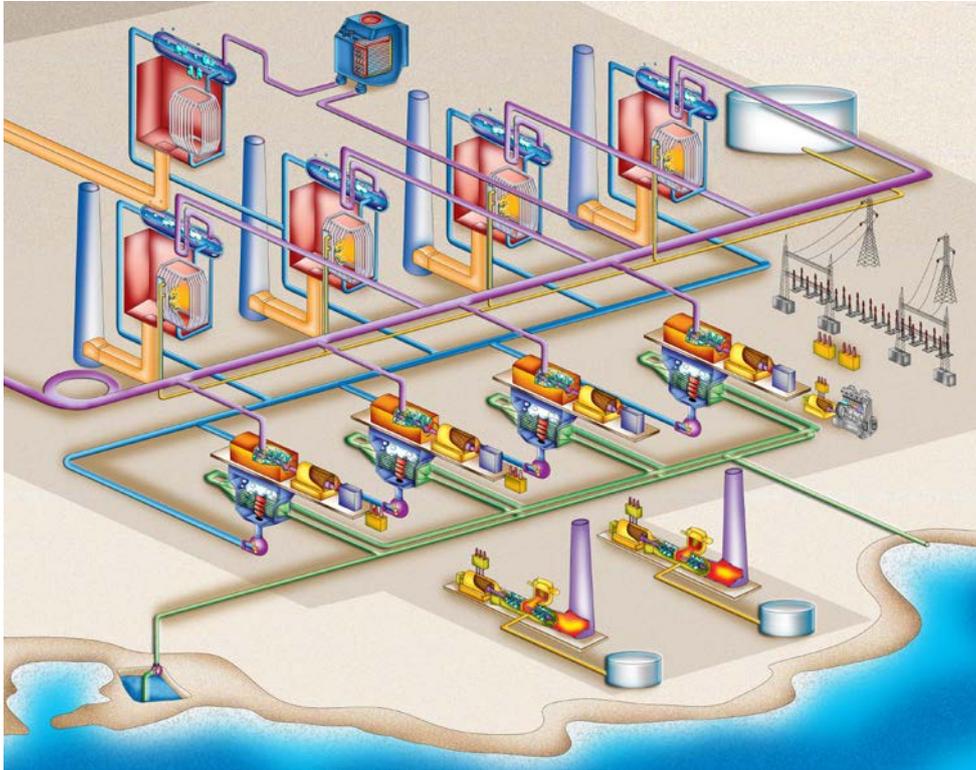


Figura 1.6: Proceso de generación de la CTILO1 con la nueva Fundición.

Fuente: Diagramas de procesos de CTILO1, Enersur, 2008.

La figura 1.7 muestra el suministro de vapor de la nueva fundición a CTILO1, con equipos y válvulas de control que requieren del suministro de aire comprimido seco.

Se describe brevemente la operación de la nueva fundición de cobre de SPC:

Los gases de escape del horno de fundición de cobre llamado Isasmelt por acción de un ventilador ingresan al hogar de la nueva caldera recuperada de calor Oschatz para generar vapor saturado a 940 psi y 275 °F y por dos tuberías se envía el vapor saturado: una tubería direcciona el vapor saturado al sobrecalentador para llevarlo a 490 °C (910 °F) a la misma presión para accionar las turbinas, la otra línea de vapor saturado va al sistema de sobrecarga de vapor, esta línea es usada como bypass del sobrecalentador.

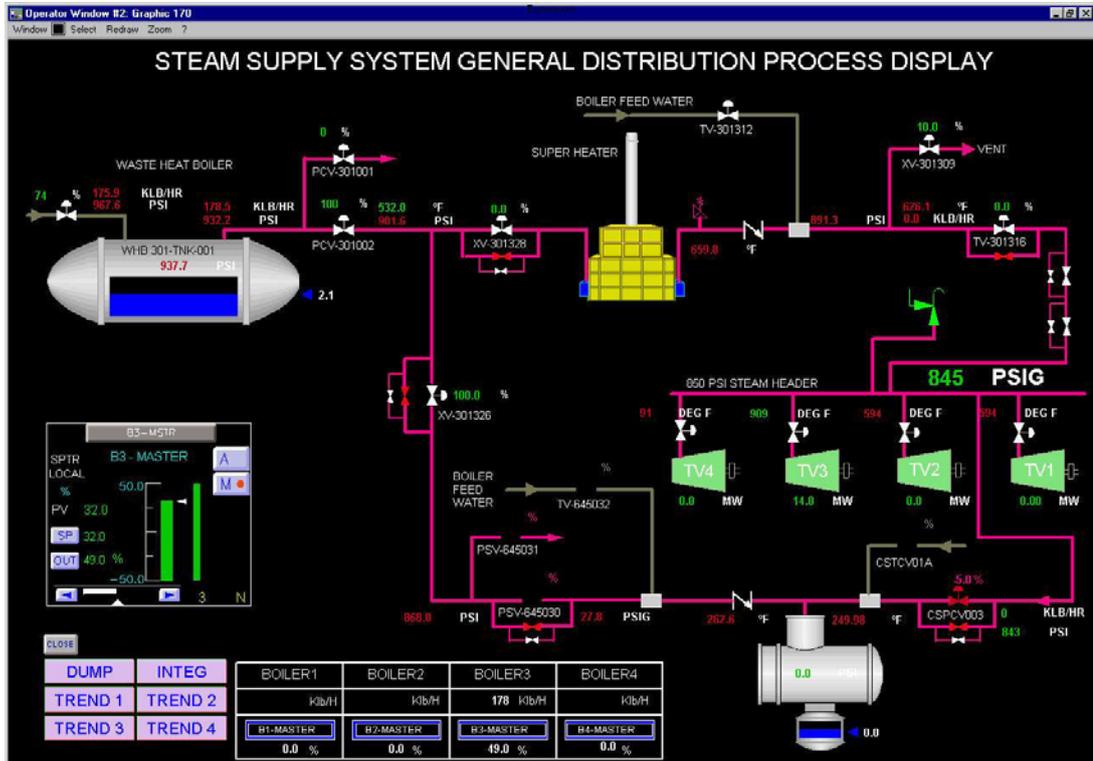


Figura 1.7: Suministro de vapor de SPC a CTILO1 con la nueva Fundición.

Fuente: Software Symphony.

La figura 1.8 muestra el horno Isasmelt y la caldera Oschatz, donde del domo superior de la caldera sale el vapor saturado el cual se divide en dos líneas; una línea al sobrecalentador para accionar las turbinas a vapor y otra línea al sistema de sobrecarga de vapor de CTILO1.

Frente al incremento de la demanda de aire comprimido para instrumentos de control debido a la ampliación y modernización de la fundición, Enersur decide ampliar la capacidad de la red existente de CTILO1 con un sistema de aire comprimido, con la finalidad de suministrar el incremento de 400 scfm de aire para instrumentos de control.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Principal

- Dimensionar e instalar un sistema de aire comprimido para incrementar la capacidad de la red de la Central Termoeléctrica de Ilo1.

1.2.2 Objetivos específicos:

- Determinar el requerimiento de aire comprimido y los puntos de interconexión con la red existente.
- Calcular y seleccionar los componentes del sistema de aire comprimido.
- Supervisar la ejecución de las obras civiles y montaje electromecánico.
- Puesta a punto y operación del sistema de aire comprimido.

CAPÍTULO 2

SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA INSTRUMENTOS DE CONTROL

La figura 2.1 muestra los componentes del sistema de aire comprimido:

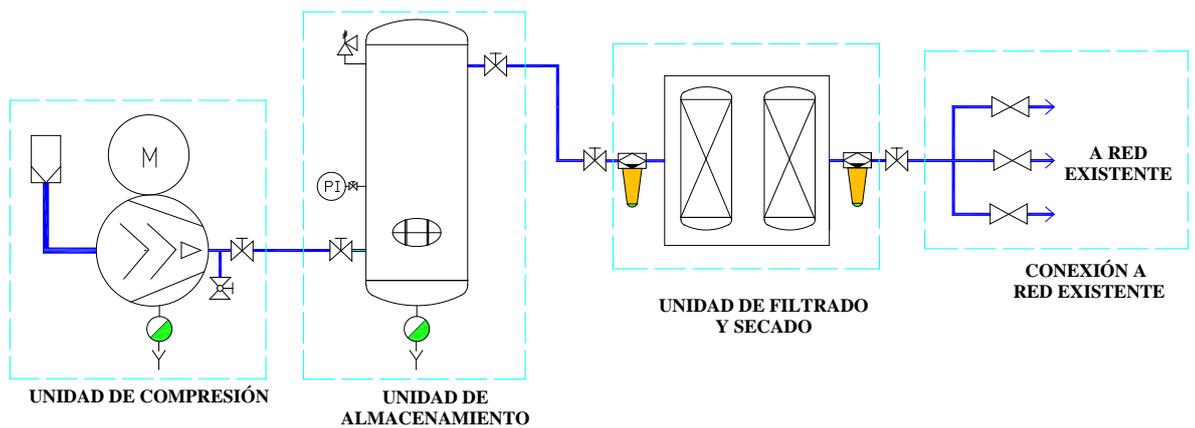


Figura 2.1: Componentes del sistema de aire comprimido.

Fuente: Elaboración propia a partir de Compressed air manual, Atlas Copco, 1998.

En la figura 2.1 se aprecia la unidad de compresión constituido por el compresor y el motor; la unidad de almacenamiento ó tanque receptor; la unidad de tratamiento de aire comprimido donde se realiza el filtrado y secado y finalmente la conexión a la red existente para la distribución y consumo final.

Se describe cada componente del sistema de aire comprimido:

2.1 UNIDAD DE COMPRESIÓN

La unidad de compresión está formada por el compresor en sí y su motor de accionamiento que según se trate, de un motor de combustión interna cuando la compresora es móvil, o de un motor eléctrico, para compresoras estacionarias. Esto es referencial.

Para producir el aire comprimido se utiliza un compresor de una etapa o de varias etapas de compresión, de acuerdo al valor de la presión final del aire comprimido, para una presión manométrica de descarga de 689 kPa (100 psig) las compresoras son universalmente de dos etapas con una potencia aproximada de 112 kW (125 bhp).

Usualmente el compresor enfriado por aire para una presión manométrica de descarga de 552kPa (80 psig) o mayor debe de tener dos etapas compresoras, a menos que sea muy pequeño. Una unidad de dos etapas tendrá un mejor enfriamiento que una unidad de una sola etapa, reduciendo así la formación de depósitos en los intercambiadores de calor. La compresión de aire en dos etapas a una presión manométrica de descarga de 689 kPa (100 psig) ahorra de 10 a 15 % en la potencia sobre la compresión de una etapa.

El aire aspirado se somete a una compresión en la primera etapa, seguidamente se refrigera, para luego ser comprimido por la siguiente etapa. El volumen de la segunda cámara de compresión es, en relación, más pequeño que la primera. Durante el trabajo de compresión se genera calor, que tiene que ser evacuada por el sistema refrigeración que puede ser utilizar como fluido de enfriamiento aire o agua.

2.1.1 Tipos de compresores

La figura 2.2 muestra los dos tipos básicos de compresores: compresores de desplazamiento positivo y compresores dinámicos. El primero trabaja según el principio de desplazamiento positivo, es decir, la compresión se obtiene por la admisión del aire ó gas en un recinto hermético, donde se reduce luego el volumen elevándose la presión. El otro trabaja según el principio de desplazamiento no positivo, o dinámicos, es decir, el aire es aspirado por un lado y comprimido como consecuencia de la aceleración de la masa.

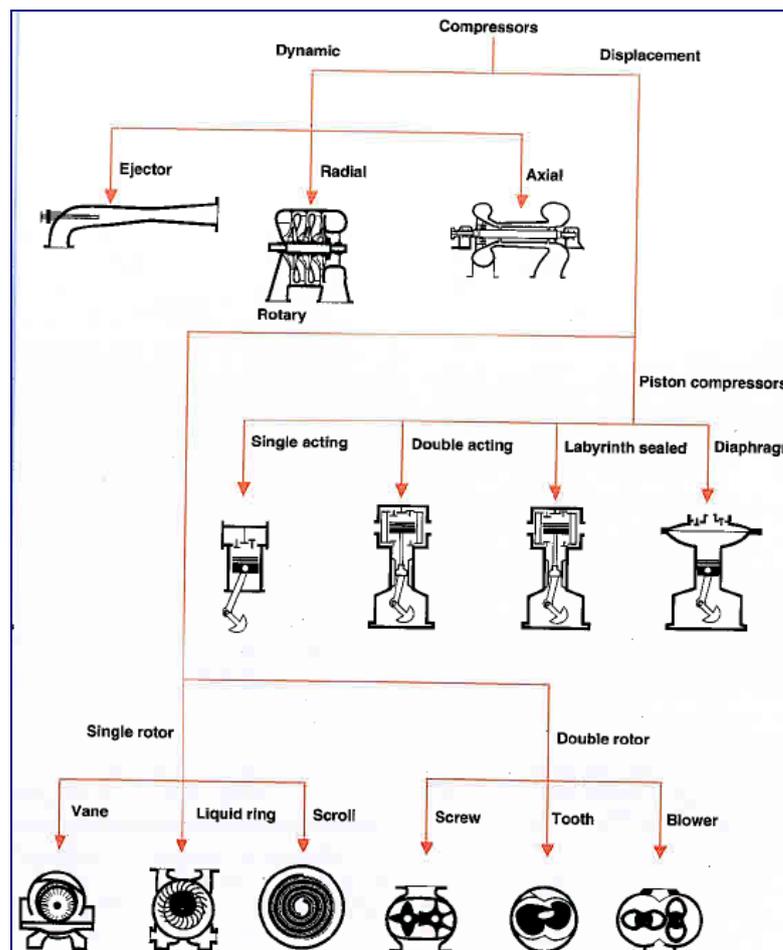


Figura 2.2: Tipos de compresores clasificados de acuerdo a su principio de trabajo.

Fuente: Compressed Air Manual, Atlas Copco ,1998.

La figura 2.2 muestra los diferentes tipos de compresores clasificados de acuerdo a su principio de trabajo, estos pueden dividirse de acuerdo a otros principios, por ejemplo, enfriamiento por aire o agua, estacionarios o portátiles.

Compresores de desplazamiento positivo.- pueden ser *compresores reciprocantes o compresores rotatorios*.

- El **compresor reciprocante o alternativo** tienen uno o más cilindros en los cuales hay un pistón o émbolo de movimiento alternativo que desplaza un volumen positivo en cada carrera.
- Los **compresores rotatorios** constituidos con una carcasa, o con más elementos rotatorios que se acoplan entre sí, desplazan un volumen fijo en cada revolución.

Los tipos de compresores para aire utilizados son:

- **Compresor alternativo (reciprocating compressor)**

La compresión del aire se consigue a partir de un cilindro en movimiento. Este compresor puede incorporar un único cilindro (single-acting cylinder), es decir, la acción de compresión la ejecuta una sola cara del pistón o puede comprimir el aire empleando dos cilindros (double-acting cylinder), donde la acción de compresión la realizan ambas caras del pistón. Los cilindros pueden estar colocados horizontalmente verticalmente o bien en ángulo. Además, los cilindros pueden ser estancos y estar lubricados con aceite si no importa que la descarga de aire tenga algunas partículas de aceite en

suspensión. En caso contrario, es posible tener compresores libres de aceite, pero a costos mayores.

Los compresores alternativos usualmente trabajan con motores de baja velocidad.

- Para compresores reciprocantes tener múltiples etapas de compresión tiene como ventajas el ahorro de potencia, limitar la temperatura de descarga del gas y limitar la presión diferencial.

El compresor reciprocante puede tener una o varias etapas de compresión. La figura 2.3 muestra la temperatura teórica de descarga para una, dos y tres etapas de compresión:

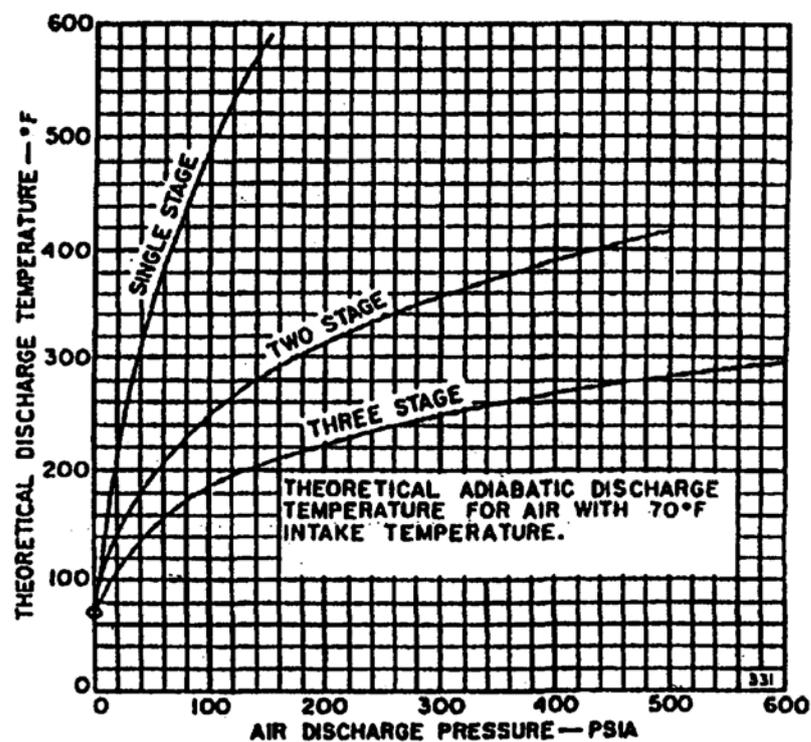


Figura 2.3: Temperatura teórica de descarga adiabática para aire a 70 °F en la succión.

Fuente: Reciprocating Compressors Operation & Maintenance, Heinz Bloch and John Hoefner, 1996.

Para compresores reciprocantes medianos y grandes de servicio pesado (alrededor o mayores a 112 kW ó 150 bhp), que manejan aire ó cualquier otro gas corrosivo, la máxima temperatura de descarga no debe exceder 176 °C (350 °F). Para presiones manométricas de descarga mayores a 2,07 MPa (300 psig) podría ser mayor. Tener altas temperaturas de descarga aumenta los tiempos de falla y los costos de mantenimiento.

La figura 2.4 muestra los efectos de requerimientos de potencia y el ahorro de potencia para compresores reciprocantes con una, dos y tres etapas de compresión.

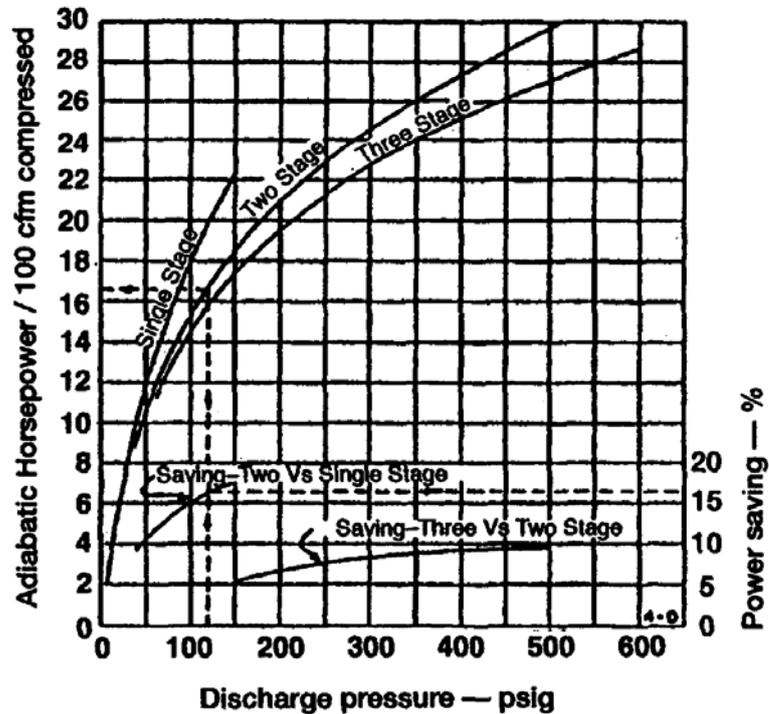


Figura 2.4: Comparación teórica de potencia por cada 100 scfm requerida para una, dos y tres etapas de compresión adiabática

Fuente: Reciprocating Compressors Operation & Maintenance, Heinz Bloch and John Hoefner, 1996.

En las figuras 2.3 y 2.4, la presión absoluta de succión de los compresores es 101 kPa (14,7 psia), las curvas son teóricas con enfriamiento entre etapas (enfriamiento perfecto) y basadas a 21 °C (70 °F) como temperatura a la succión.

- **Compresor de paletas deslizantes (sliding vane compressor)**

Utiliza paletas colocadas excéntricamente dentro del rotor. Al ir girando, el espacio existente entre las paletas se va reduciendo, con lo que el aire atrapado en esas cavidades se comprime. La presión manométrica de descarga de los compresores de paletas es de 4 bar, cuando son de una sola etapa, y de 8 bar cuando son de dos etapas. El compresor de paletas proporciona menos caudal y presión que el compresor de pistón, pero son más pequeños y silenciosos.

La figura 2.5 muestra las partes de un compresor de paletas:

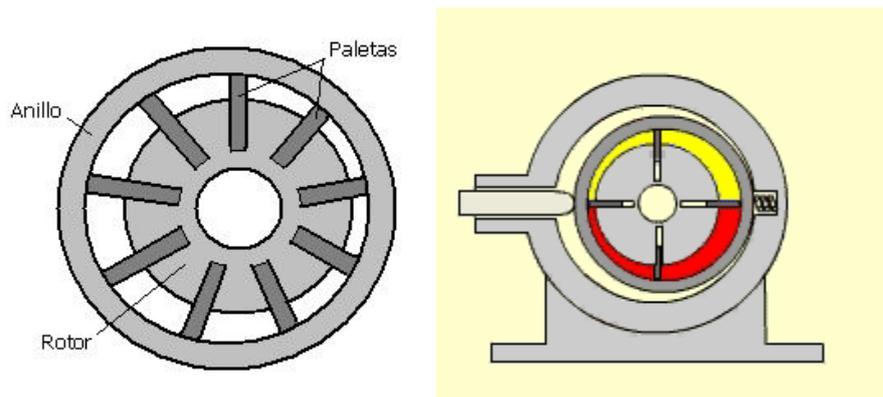


Figura 2.5: Compresor de paletas deslizantes.

Fuente: Compressed Air Manual, Atlas Copco, 1998.

- **Compresor de anillo líquido (liquid ring compressor)**

Emplea un rotor de álabes fijos dentro de una envolvente elíptica, que está parcialmente llena de líquido. Al girar el rotor, los álabes ponen el líquido en movimiento, penetran dentro de la película de líquido y comprimen el aire que queda atrapado. Son compresores libres de aceite, apropiados para el manejo de sustancias inflamables, explosivos o biosanitarias. Se emplean en laboratorios y hospitales.

- **Compresor de lóbulos (lobe compressor)**

Funciona similar a una bomba de engranajes. Al girar, el aire atrapado entre los lóbulos del rodete y la carcasa de la máquina es impulsado hacia la salida. Aportan poca compresión, porque está asociada básicamente al movimiento de los lóbulos. La figura 2.6 muestra compresores de lóbulos.

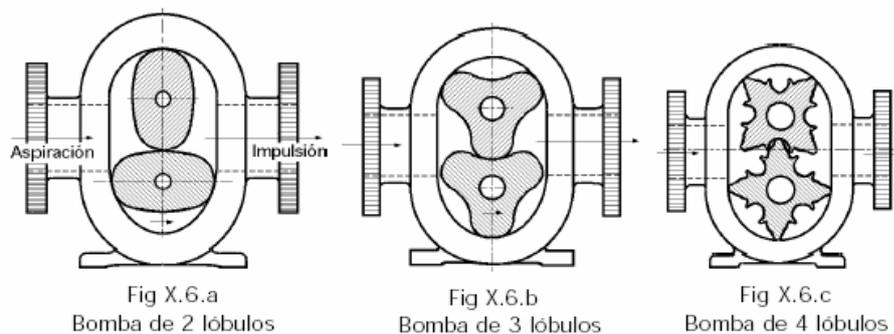


Figura 2.6: Compresor de lóbulos.

Fuente: Compressed Air Manual, Atlas Copco, 1998.

Como se muestra en la figura 2.6 los compresores de lóbulos pueden tener 2, 3 y 4 lóbulos.

- **Compresor de tornillo (rotary screw compressor)**

El compresor de tornillo es un compresor de desplazamiento tipo pistón en un formato de tornillos. Las piezas principales del elemento de compresión de tornillo son dos tornillos helicoidales que engranan con sus perfiles cóncavo y convexo, el aire se mueve del uno hacia el otro elemento mientras se reduce el volumen del alojamiento entre ellos lo que comprime el aire, es decir, el aire aspirado se comprime entre los rotores y su carcasa. Cada elemento tiene una relación fija de presión que depende de su longitud y del perfil del tornillo. Para lograr la mejor eficiencia la relación de presión debe ser adaptada a la presión de trabajo requerida.

El compresor tipo tornillo que inicialmente fue simétrico ahora ha sido desarrollado en perfiles helicoidales asimétricos diferentes, como muestra la figura 2.7:

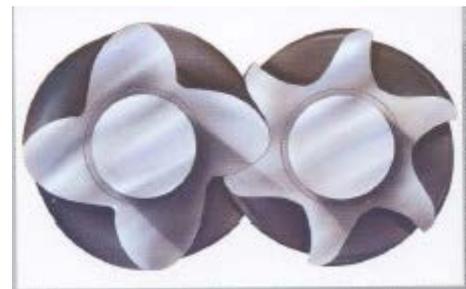
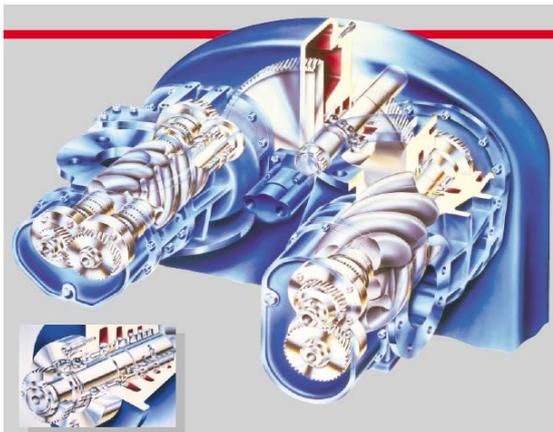


Figura 2.7: Rotores de una compresora de tornillos modelo sierra de Ingersoll-Rand.

Fuente: Sierra 37- 300 kW (50 – 400 hp), Ingersoll-Rand, 2000.

La figura 2.7 muestra a los rotores y el alojamiento manufacturado con alta precisión para minimizar fuga del lado de presión a la entrada.

El compresor del tornillo no está acondicionado con válvulas y no tiene fuerzas mecánicas que causan desbalance. De esta manera el eje puede trabajar a una alta velocidad y puede combinar un gran rango de flujo con dimensiones exteriores pequeñas.

Los compresores rotativos de tornillo pueden estar lubricados o secos. "Secos" quiere decir que el lubricante no entra en contacto con el aire comprimido. Las exigencias para el lubricante son muy severas. El aceite debe lubricar los rodamientos y los engranajes de accionamiento, actuar como un sellante entre los tornillos, y también como un refrigerante.

La fuerza axial depende de la diferencia de presión entre la entrada y la salida, que debe estar soportada por los rodamientos. Una caja de engranajes externa es usada en el compresor de tornillo para sincronizar la rotación de los rotores. Como los tornillos no tienen ningún contacto entre sí ni con el alojamiento del compresor, no es requerida ninguna lubricación particular en la cámara de compresión, por eso se tiene aire comprimido completamente libre de aceite.

La relación de presión está limitada por la diferencia de temperatura entre el ingreso y la descarga. Por tal razón, los compresores del tornillo se construyen frecuentemente con varias etapas.

La figura 2.8 muestra los componentes de un elemento de la compresora tipo tornillo de la marca Atlas Copco:

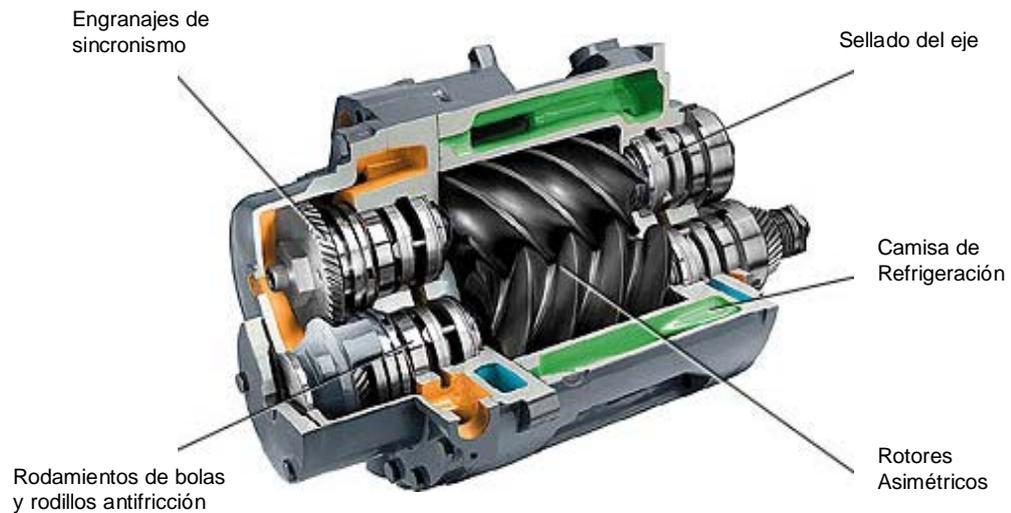


Figura 2.8: Vista de corte de los elementos de la compresora de tornillos.

Fuente: Atlas Copco, Compressor technique ZT/ZR 110-750 y ZR 160-900 VSD

La figura 2.8 muestra rotores totalmente sincronizados con un eficaz sellado del eje: sin lubricación dentro del elemento, sin contacto entre rotores, los rotores giran muy por debajo de la velocidad crítica, sin contacto entre rotores y carcasa, sin arrastre de aceite a la cámara de compresión y sin desgaste de metal.

La figura 2.9 muestra una compresora de tornillos:



Figura 2.9: Compresora tipo tornillo libre de aceite enfriada con aire.

Fuente: Ingersoll-Rand, 2000, Sierra 37-00kW

La figura 2.9 muestra una compresora libre de aceite tipo tornillo enfriada con aire de la marca americana Ingersoll-Rand dentro su cabina antisonora.

- **Compresores centrífugos (centrifugal compressor)**

La velocidad del aire aumenta al paso por el rodete, mientras que a la descarga, una sección difusiva (la voluta) desacelera el aire y aumenta la presión de descarga.

Su funcionamiento no requiere lubricación, el aire o gas sale sin aceite.

2.1.2 **Sistema de agua de enfriamiento de compresoras**

El enfriamiento de los diferentes sistemas de la central térmica de Ilo1, se realiza mediante dos sistemas de enfriamiento:

- Sistema de agua de enfriamiento proveniente del sistema de agua desmineralizada. Este sistema es un sistema cerrado.
- Sistema de agua de mar. Este sistema de enfriamiento es abierto, el agua de mar es utilizada para enfriar el agua del sistema de enfriamiento cerrado y a los condensadores de los turbogeneradores a vapor.

El sistema de agua de enfriamiento cerrado dispone de 8 bombas de 265 gpm cada una, las cuales suministran agua para enfriar los diferentes sistemas de los turbogeneradores, del grupo diesel de emergencia, compresores de aire, planta de H₂ y equipos de aire acondicionado. El sistema cerrado de agua de enfriamiento de la central térmica se muestra en el plano N° ILO1-OA-QE-FD-650.

Para asegurar una larga vida útil en servicio y buen funcionamiento el sistema de agua de enfriamiento cerrado se debe tener en cuenta los siguientes límites recomendados, por lo fabricantes; para los contaminantes disueltos en el agua de enfriamiento:

Cuadro 2.1: Concentración máxima de contaminantes en el agua de enfriamiento.

Sustancia	Periodo de análisis	Concentración aceptable
Hierro	mensual	2 ppm (2 mg/l)
Sulfato		50 ppm (50 mg/l)
Cloro		50 ppm (50 mg/l)
Nitrato		2 ppm (2 mg/l)
Sílice		100 ppm (100 mg/l)
Oxígeno		0 ppm (0 mg/l)
Aceite y grasa		5 ppm (5 mg/l)
Amoniaco		1 ppm (1 mg/l)

Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Sierra, Ingersoll-Rand, 2004

A pesar de tomar en cuenta los límites recomendados del cuadro 2.1, el agua contiene sustancias biológicas y orgánicas (fangos) que pueden originar problemas a bajas temperaturas, debido que tienden a precipitarse hacia las paredes de la tubería y equipos. A temperaturas elevadas mayores a 41 °C (105 °F) la mayoría de los organismos biológicos perecen; por lo que se realiza mensualmente un proceso conocido como shocktreatment.

Como consecuencia de la calidad del agua de enfriamiento se producen en las tuberías incrustaciones y corrosión:

Incrustaciones: La formación de incrustaciones inhibe la transferencia eficaz del calor, si bien ayuda a evitar la corrosión. Es deseable que las superficies interiores se vean afectadas por una capa delgada y uniforme de carbonato de calcio. La precipitación del carbonato de calcio del agua es lo que más contribuye a la formación de incrustaciones que depende de la temperatura y del pH. Cuanto mayor sea el valor del pH, mayor será la posibilidad de formación de incrustaciones. Estas se pueden mantener bajo control mediante el tratamiento del agua.

Corrosión.- En contraste con la formación de incrustaciones está el problema de la corrosión. Los cloruros originan problemas por su cantidad y conductividad. Los bajos niveles del pH fomentan la corrosión, al igual que los altos niveles de oxígeno disuelto.

El sistema de enfriamiento de CTILO1 cuenta un sistema de inyección de químicos, se dosifica sales de molibdatos y orgánicos que inhiben la corrosión y mejoran la calidad de agua. El agua del sistema enfriamiento se muestrea y analiza dos veces por semana por el Laboratorio de la planta.

2.2. UNIDAD DE ALMACENAMIENTO

El tanque receptor sirve para estabilizar el suministro de aire comprimido proveniente del compresor, y compensa las oscilaciones de presión en la red de tuberías. Debido a la gran superficie del tanque receptor, el aire se refrigera adicionalmente, por esta razón, en el tanque receptor se desprende directamente parte de la humedad del aire en forma de agua, se instalan en el fondo del tanque válvulas de purga, que de forma manual o automática, drenan el agua. El tanque

receptor debe tener instalados una serie de accesorios como se muestra en la figura 2.10:

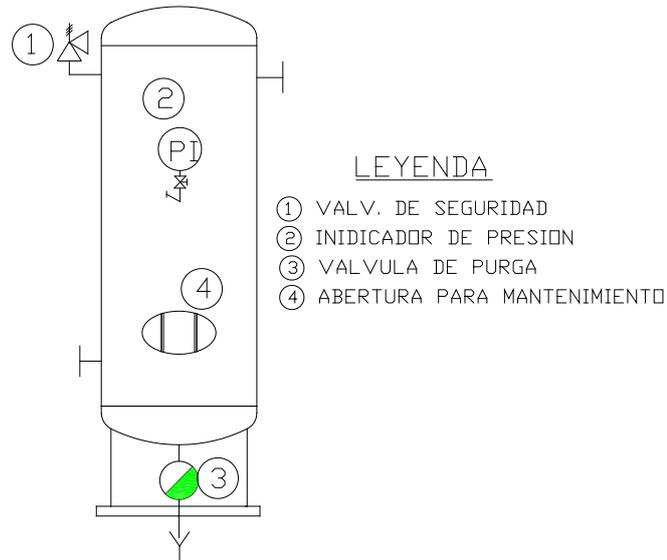


Figura 2.10: Accesorios del tanque receptor de aire comprimido.

Fuente: Elaboración propia a partir de Compressed air manual, Atlas Copco, 1998.

Con la fórmula [2.1] se calcula el volumen mínimo del tanque receptor, esta formula es para compresores con regulación tipo carga/descarga, es decir, el compresor tiene dos estados funciona en carga (comprimiendo aire) o en descarga (sin comprimir aire ó en vacío), por lo tanto, el compresor trabaja en vacío al alcanzar la presión máxima y en carga cuando alcanza la presión mínima.

$$V = \frac{0,25 Q_c p_1 T_0}{f_{m\acute{a}x} (p_u - p_1) T_1} L \quad [2.1]$$

donde:

V : Volumen del tanque (L)

- $f_{m\acute{a}x}$: Frecuencia máxima (ciclo/s)
 Q_c : Capacidad del compresor (l/s)
 p_1 : Presión absoluta al ingreso del compresor (bar)
 T_1 : Temperatura máxima al ingreso del compresor (K)
 T_0 : Temperatura del aire comprimido en el tanque receptor (K)
 $(p_u - p_1)$: Diferencia entre presiones de descarga y carga del compresor en bar
 (mínimo recomendado por Atlas Copco 0,5 bar)

Simplificando la fórmula considerando presión del ambiente 1 bar, 20 C y 30 ciclos/s se tiene:

$$V = \frac{Q_c}{8 \times (p_u - p_1)} L \quad [2.2]$$

La Norma internacionalmente más reconocida y de uso más común, para el diseño de tanques a presión es la Sección VIII División 1 "Pressure Vessels" del Código ASME (American Society of Mechanical Engineers).

El criterio de diseño utilizado por la Norma ASME SECC VIII DIV 1, establece que el espesor de pared de un recipiente a presión, deberá ser tal que las tensiones generadas por la presión, no deben exceder el valor de la tensión admisible del material. El recipiente a presión será diseñado para la condición más severa coincidente de presión y temperatura previstas para las condiciones normales de operación. Consecuentemente, la presión de diseño será la máxima presión de trabajo admitida por el recipiente sin que se supere la tensión admisible del material en el punto más comprometido.

La tolerancia por corrosión se da porque las superficies interiores de un recipiente, al estar en contacto con el fluido, pueden estar expuestas a sufrir la pérdida de espesor por efecto de la corrosión y en el caso de movimiento de sólidos en suspensión, por erosión ó abrasión mecánica. El Código no permite que el espesor mínimo de la envolvente y de los cabezales (luego de conformados) de un recipiente a presión, sea menor a 1,59 mm (1/16 in), excluida la tolerancia por corrosión; en todos los casos en los que se considere que esta pudiere aparecer, se debe sumar un sobreespesor adicional al de cálculo; está establecido como recomendable, adicionar un valor del orden de 1,59 mm (1/16 in), con lo cual el espesor mínimo, no debería ser menor de 3,17 mm(1/8"). En el caso de recipientes para aire comprimido, vapor de agua ó agua a presión, el espesor mínimo será de 2,38 mm (3/32 in) y previéndose corrosión, no debería ser menor de 3,97 mm (5/32 in).

Para almacenar aire comprimido usualmente son tanques con cuerpo cilíndrico y tapas semielípticas el Código ASME recomienda utilizar las siguientes ecuaciones para el cálculo de los espesores:

$$\text{Tapas semielípticas: } t = \frac{PD}{2SE - 0,2P} \quad [2.3]$$

$$\text{Cuerpo cilíndrico: } t = \frac{PR}{SE - 0,6P} \quad [2.4]$$

donde:

t: Espesor mínimo, mm (in)

R: Radio interior, mm (in)

D: Diámetro interior, mm (in)

P: Presión interna de diseño, kPa (psi)

E: Eficiencia de la junta

S: Esfuerzo permisible del material, kPa (psi)

Para cada forma y tipo de junta que se adopte y según sea el grado de control,

El Código ASME establece el valor de la eficiencia de junta "E". Para el mismo tipo de junta, a mayor control mayor radiográfico que se efectúe, menor será el espesor mínimo requerido (ver UW-12 ASME VIII Div.1).

2.3. UNIDAD DE TRATAMIENTO DEL AIRE COMPRIMIDO

El aire del ambiente contiene contaminantes en forma de vapor de agua y de partículas aerotransportadas. Durante el proceso de compresión los contaminantes se concentran, ello significa que al comprimir el aire atmosférico de 1 bar a 7 bar, la concentración de las impurezas aumenta ocho veces. Los compresores de aire generalmente cuentan con post enfriadores que reducen la temperatura del aire comprimido a la descarga y con la ayuda de los separadores de agua se retira parte de agua condensada. En algunos casos esto puede ser suficiente, pero el contenido restante de agua y de la suciedad suspendida en forma de aerosol, si no es eliminado, puede dañar el sistema de aire comprimido y causar averías en los equipos.

La contaminación del aire reduce la eficiencia de una planta y aumentan el costo total de operación, incrementándose los tiempos de parada y reducción de la eficiencia de producción, entonces, la suciedad, la humedad y el aceite no deben estar en el flujo de aire comprimido. Lo siguientes contaminantes:

- Polvo, suciedad, polen, microorganismos, humo, emisiones de gases y otras partículas.
- Humedad en forma de vapor de agua.
- Aceite, hidrocarburos no quemados que quedan en el aire y refrigerante del compresor.

- Gases cáusticos como los óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y compuestos de cloro.

Los contaminantes deben mantenerse dentro de los límites que establece la norma pertinente. Los resultados de un aire comprimido contaminado en el sistema pueden generar desde simples contratiempos hasta un caos total en los equipos como:

- Desgaste prematuro y rayado de superficies.
- Óxido y corrosión en tuberías y equipos.
- Instrumentos dañados.
- Superficies de pintura estropeadas.
- Mayor índice de chatarra.
- Un entorno de trabajo inseguro o desagradable.

Estos problemas se deben evitar con la selección y uso correcto de filtros y secadores, que dependerán de la aplicación particular de aire comprimido.

2.3.1. Valores límites de contaminantes en el aire comprimido

Existen clases de calidad de aire comprimido recomendadas para cada aplicación neumática. Estas clases corresponden a la calidad de aire comprimido que, como mínimo, necesita la unidad consumidora correspondiente. El mantenimiento de la calidad del aire es tan importante que La International Standards Organization (ISO) desarrolló seis clases de calidad del aire comprimido definidas en la norma ISO 8573.1 tal como indica el cuadro siguiente:

Cuadro 2.2: Calidad del aire comprimido según Norma ISO 8573.1

Clase	Partículas sólidas Contaminación		Agua Presión Punto de rocío (°C)	Aceite Máxima Concentración (mg/m ³)
	Tamaño de Partícula (µm)	Máxima Concentración (mg/m ³)		
1	0,1	0,1	-70	0,01
2	1	1	-40	0,1
3	5	5	-20	1
4	15	8	3	5
5	40	10	7	25
6	-	-	10	-

Fuente: Compressed Air Manual, Atlas Copco, 1998.

La International Standards Organizations (ISO) con la Norma ISO 8573-1 proporciona un modo uniforme para especificar la calidad del aire en términos de tamaño de las partículas, punto de rocío de presión y contenido de aceite, como ejemplo, la calidad de aire comprimido clase 2-2-2 significa contaminación: tamaño de partículas de 1 µm, agua: -40 °C presión de punto de rocío, aceite: 0,1 mg/m³.

El cuadro 2.3 muestra las calidades de aire típicas para diferentes aplicaciones, según el European Committee of Compressors, Vacuum Pumps and Pneumatic Tools (Pneurop), para definir la calidad de aire que se requiere la presente aplicación:

Cuadro 2.3: Calidad de aire para diferentes aplicaciones según Pneurop.

TIPO DE APLICACIÓN	CLASES DE CALIDAD DE AIRE TÍPICAS		
	Particulado	Agua	Aceite
Aire para agitación	5	3	3
Aire para rodamientos	2	3	3
Aire para calibración	3	3	2
Aire para motores	4-1	5	4
Limpieza de partes de máquinas	4	4	4
Construcción	5	5	4
Arrastre de productos granulares	4	3	3
Arrastre de productos en polvo	3	2	2
Circuitos Energizados	4	4	4
Alimentos y bebidas	3	1	2
Herramientas manuales	5-4	5-4	4
Máquinas herramientas	3	5	4
Minería	5	5	4
Manufactura de Micro-electrónica	1	1	1
Embalaje y máquinas textiles	3	3	4
Herramientas y cilindros neumáticos	4	4	4
Instrumentos de control de proceso	2	3	2
Pintura en spray	3	3	3
Arenado	3	3	-
Máquinas de soldadura	4	5	4
Aire para Taller general	4	5	4

Fuente: Air Mac, Jim Keller, 2005.

Para suministrar aire comprimido a instrumentos de control de proceso, según el cuadro 2.3 se requiere una calidad mínimo de aire clase 2-3-2, que significa tamaño de partículas de 1 μm , presión de punto de rocío de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y concentración máxima de aceite de $0,1\text{ mg/m}^3$.

En una instalación de aire comprimido se puede producir diferentes calidades según Norma ISO 8573-1, como se muestra en la figura 2.11:

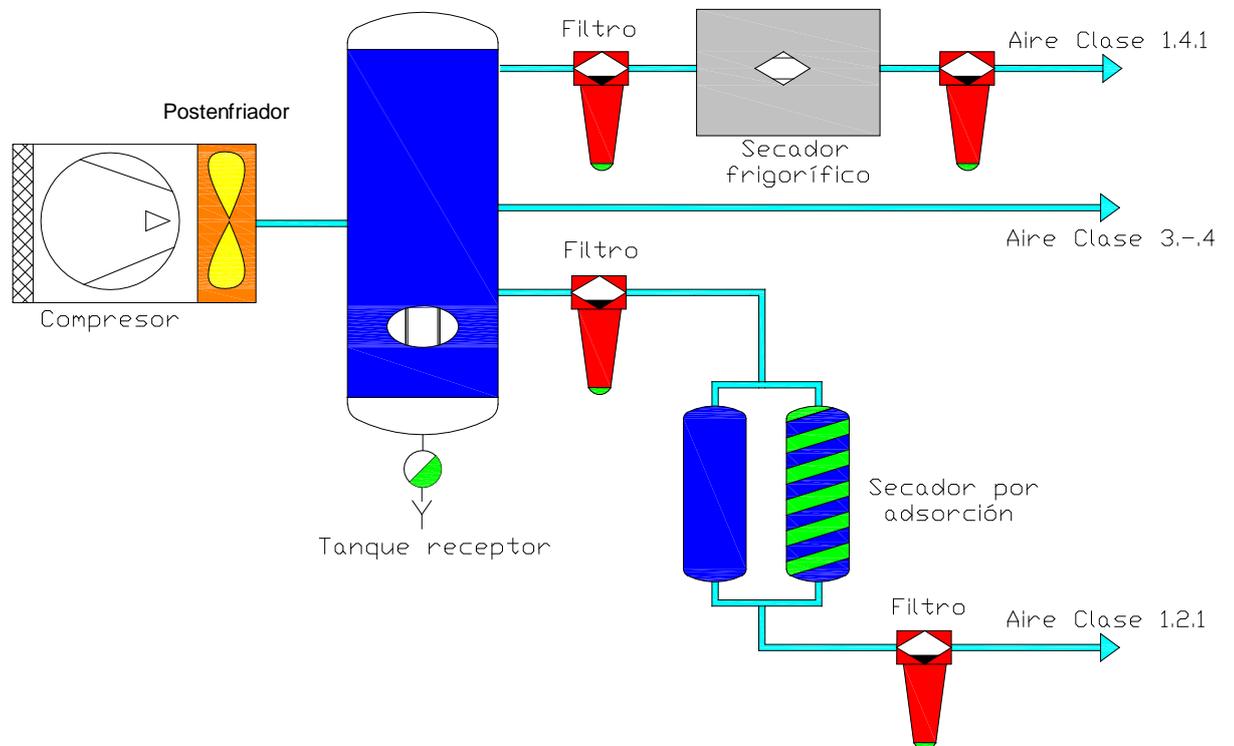


Figura 2.11: Instalación de un sistema de aire comprimido puede producir diferentes clases de calidad según la Norma ISO 8573.1

Fuente: Compressed Air Manual, Atlas Copco, 1998.

Definida la calidad mínima de aire comprimido clase 2-3-2 para instrumentos de control de proceso que significa tamaño de partículas de $1\mu\text{m}$, presión de punto de rocío de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y concentración máxima de aceite de $0,1\text{ mg/m}^3$; se debe disponer de filtros, secadores y accesorios para garantizar el suministro en la calidad especificada.

2.3.2 Filtros de aire comprimido

Las partículas distribuidas casi de forma invisible por todo el aire del entorno se convierten en una fuerza concentrada que provoca daños y destrucción a equipos e instrumentos que utilizan aire comprimido.

El uso de filtros elimina la suciedad y los problemas con las partículas. Al eliminar el efecto “chorro de arena” de las partículas en el sistema de aire comprimido se puede evitar: desgastes prematuros, superficies rayadas, orificios obstruidos, acabados defectuosos e instrumentos estropeados.

Siempre se debe anteponer siempre un filtro más grueso a un filtro fino, el primero eliminará las partículas más grandes y el segundo las de menor tamaño. El aire comprimido al ingresar al filtro pasa a través de una placa deflectora provista con ranuras directrices, como consecuencia se somete a un movimiento de rotación, los componentes líquidos y las partículas sólidas grandes se desprenden por el efecto de la fuerza centrífuga y se acumulan en la parte inferior del recipiente que deberá ser vaciada antes de que alcance la altura máxima permisible, si la cantidad de condensado es alto conviene montar una purga automática.

Tipos de filtros:

- 1.- Filtros de partículas.- Remueve partículas sólidas.
- 2.- Filtros coalescentes.- Remueve partículas líquidas.
- 3.- Filtros de carbón activado.- Remueve vapores, olores y gases

El ambiente circundante de CTILO1 es salino, corrosivo por la presencia de gases como el SO_2 que con exceso de aire y energía solar se oxida lentamente en SO_3 y este último con la humedad del ambiente forman rápidamente ácido sulfúrico. CTILO1 está ubicada dentro de La fundición de cobre de SPC, lo que hace necesario instalar a la admisión del compresor un filtro químico, para el control de la contaminación gaseosa corrosiva aplicables para gases como SO_2 , Cl_2 , H_2S , NO_x , etc.

El aceite, los hidrocarburos no quemados y el refrigerante de compresores se concentran mucho durante el proceso de compresión. Estos contaminantes entran en el flujo de aire como gotas arrastradas y a menos que sean eliminados pasan a través del sistema de aire comprimido a los instrumentos de control. El separador de aire-aceite incorporado en todos los compresores de aire tipo tornillo eliminará parte del aceite, pero esto no es suficiente, en la mayoría de aplicaciones donde se debe eliminar los olores indeseados mediante filtros de aceite.

2.3.3 Eliminación de la humedad

Los efectos de la contaminación por humedad son:

- Oxido y corrosión en las tuberías del sistema de aire
- Lubricación inadecuada de las herramientas neumáticas
- Pérdidas de productividad en toda la actividad.

Para eliminar la humedad en el aire comprimido se utilizan los secadores.

Para comprender mejor los métodos de eliminación de humedad, se define algunos conceptos:

Humedad Absoluta.- Es la cantidad de vapor de agua contenido en una determinada cantidad de aire seco.

$$HA = \frac{\text{kg vapor de agua}}{\text{kg aire seco}} \quad [2.5]$$

Según la ley de Dalton, la humedad absoluta es:

$$HA = 0,622 \frac{P_a}{(P - P_a)} \quad [2.6]$$

donde:

P_a : Presión absoluta parcial del vapor de agua (bar)

P : Presión absoluta total del sistema (bar)

Humedad de Saturación.- Es el máximo peso de vapor de agua que admite un kg de aire seco a una determinada presión y temperatura.

$$HS = 0,622 \frac{P_a}{(P - P_a)} \quad [2.7]$$

donde:

P_a : Presión absoluta del vapor de agua a la temperatura considerada (bar).

P : Presión absoluta total del sistema (bar).

Humedad Relativa.- Es la relación entre la presión de vapor de agua actual y la que tendría si estuviera saturado a la misma temperatura y presión.

$$HR = \frac{HA}{HS} \quad [2.8]$$

si:

HR=100 %, indica que se trata de un ambiente saturado, es decir, HA=HS

HR= 0 %, indica que se trata de un ambiente totalmente exento de humedad.

Punto de Rocío.- La capacidad del aire para retener vapor de agua depende de la temperatura la presión, pero principalmente de la primera, admitiendo más vapor de agua cuando aumenta su temperatura, un aire saturado (humedad relativa 100 %) puede retener más humedad si aumenta su temperatura o desciende la presión, y por el contrario, desprende parte de su contenido de agua si desciende la temperatura o aumenta la presión.

El término presión de punto de rocío ó pressure dew point (PDP) en inglés, es usado para describir el contenido de agua en el aire comprimido. Es a ésta temperatura a la cual el vapor de agua se transforma en agua a la presión de trabajo.

Puntos de rocío muy bajos indica bajas cantidades de vapor de agua en el aire comprimido o aire muy seco y, por ende, de gran calidad; puntos de rocío elevados suponen aire con altas humedades relativas.

En un sistema de aire comprimido la temperatura del aire circundante corresponde a su punto de rocío, puesto que está saturado, y una disminución de ésta temperatura producirá condensaciones, por el contrario, un aumento de ésta temperatura, recalentará el aire aumentando su temperatura y manteniendo fijo el mismo punto de rocío. En consecuencia, para que en una instalación de aire comprimido no aparezca ninguna cantidad de agua, el aire comprimido, antes de ser distribuido, debe haberse secado hasta un punto de rocío que sea inferior a la temperatura del aire ambiente en donde se utiliza.

Para seleccionar el tipo de secador de aire nos basamos en la presión de punto de rocío. Desde el punto de vista económico un bajo punto de rocío requiere mayores costos en la inversión inicial y operación de secado de aire.

Métodos para eliminar la humedad

En principio hay cuatro métodos para remover la humedad de aire comprimido: enfriamiento, sobre-compresión, absorción y adsorción:

A.-Secado por Enfriamiento:

A1.- Postenfriador (Aftercooler)

Un postenfriador es un intercambiador de calor, que enfría el aire comprimido caliente para precipitar el agua que de otra manera llegaría al sistema de tuberías. Para enfriar se utiliza agua o aire frío, las compresoras vienen equipadas generalmente con un separador de agua que drena automáticamente y está ubicado al lado de la compresora. El 80 al 90 % del condensado es colectado en el separador de agua del postenfriador.

El postenfriador es usado en todas las instalaciones estacionarias y en la mayoría de los casos de compresores modernos se construye en su interior.

A2.- Secador Refrigerativo o Frigorífico

Se basa en el principio de una reducción de la temperatura del punto de rocío, es decir, se enfría el aire con el objeto de que se condense el vapor de agua contenido y pueda ser separado. El aire comprimido entra en el secador pasando primero por el intercambiador aire-aire, el aire caliente que ingresa se enfría mediante aire seco y frío proveniente del intercambiador de calor (vaporizador), el condensado se evacua del intercambiador de calor a

través del separador, éste aire preenfriado pasa por el grupo frigorífico (vaporizador) y se enfría más hasta llegar una temperatura de $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, en este proceso se elimina por segunda vez condensado.

Los secadores frigoríficos son excelentes para obtener aire comprimido seco a bajo costo porque su consumo de energía es mínimo. Son usados para puntos de rocío entre $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero son limitados por el punto de congelamiento del condensado de agua, no pueden alcanzar puntos de rocío por debajo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ porque el vapor de agua que contiene el aire comprimido se congelaría, bloqueando las tuberías y deteriorando los equipos situados aguas abajo.

La figura 2.12 muestra el proceso de secado por enfriamiento.

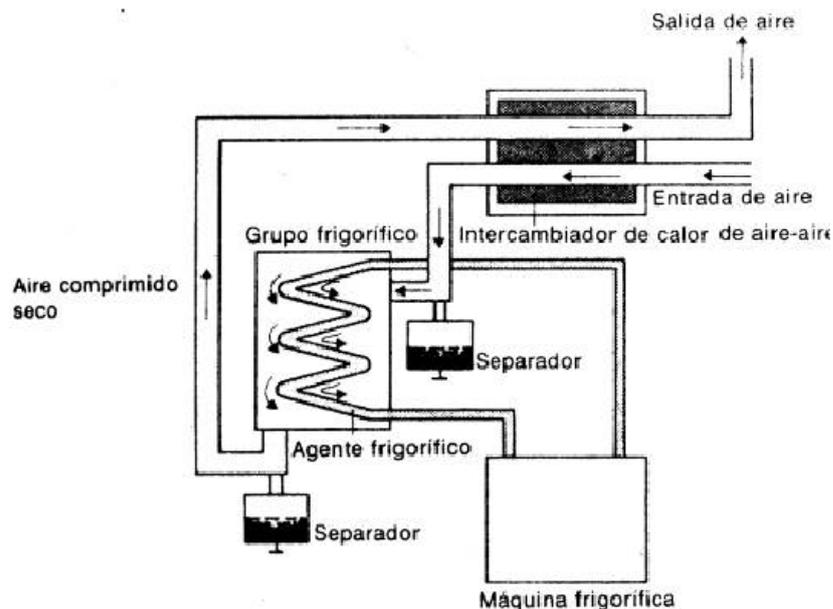


Figura 2.12: Secado por enfriamiento.

Fuente: Propuesta de rediseño de la red de aire comprimido de industrias Ceresita S.A., Ana Soto V., 2005.

B.- Secado por Sobrecompresión.-

Con éste método, el aire se comprime hasta que la presión parcial del vapor de agua, excede a su presión de saturación. La presión debe ser superior a la presión de trabajo. Cuando el aire se expande después de salir del colector de humedad o separador de agua, puede disponerse de él en las condiciones de secado requeridas.

De los métodos de secado, éste es el más sencillo. Su régimen de secado es continuo y no necesita agentes desecantes. Sin embargo se utiliza solamente para compresores de reducida capacidad debido a los costos que representa la potencia adicional requerida.

C.- Secado por absorción

Es un procedimiento puramente químico, el aire comprimido pasa por un lecho de sustancia secante. En cuanto el agua o vapor de agua entra en contacto con dicha sustancia, se combina químicamente con ésta y se desprende como mezcla de agua y sustancia secante, esta sustancia debe ser eliminada del absorbedor manual o automáticamente. La sustancia desecante puede ser sólida o líquida, el cloruro de sodio y el ácido sulfúrico e normalmente usado, pero este tipo de sustancia desecante da posibilidad de corrosión y debe tomarse en cuenta. Con el tiempo se consume la sustancia secante y debe suplirse en intervalos regulares (2 a 4 veces al año). Al mismo tiempo en el secador se separan vapores y partículas de aceite, no obstante si las cantidades de aceite son grandes, influyen en el funcionamiento del secador, por esto conviene montar un filtro fino delante de éste.

Las ventajas del secado por absorción: Instalación simple, reducido desgaste mecánico, porque el secador no tiene piezas móviles y no necesita aportación de energía externa. La figura 2.13 muestra el proceso de secado por absorción.

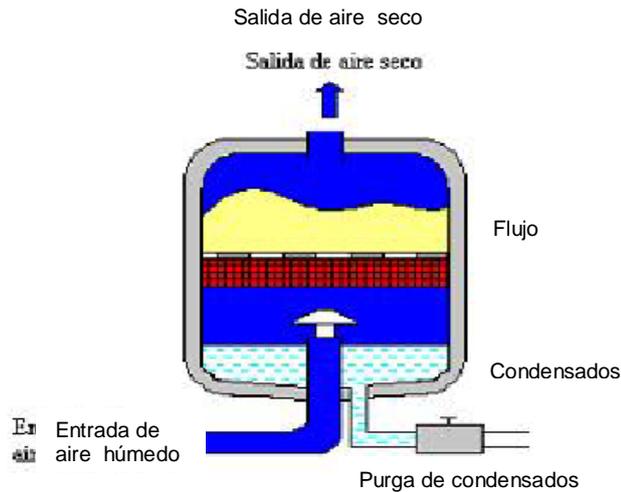


Figura 2.13: Secador por absorción

Fuente: Propuesta de rediseño de la red de aire comprimido de industrias Ceresita S.A., Ana Soto V., 2005.

D.- Secado por adsorción.-

Se basa en un proceso físico “adsorber”: Depósito de sustancias sobre la superficie de sólidos. El material de secado es granuloso, tiene como función adsorber el agua y vapor de agua; el aire comprimido se hace pasar a través del desecante. Su capacidad adsorbente es naturalmente limitada, si está saturada se regenera en forma simple: a través de un soplador se envía aire caliente que adsorbe la humedad del desecante, la figura 2.14 muestra el proceso de secado por adsorción.

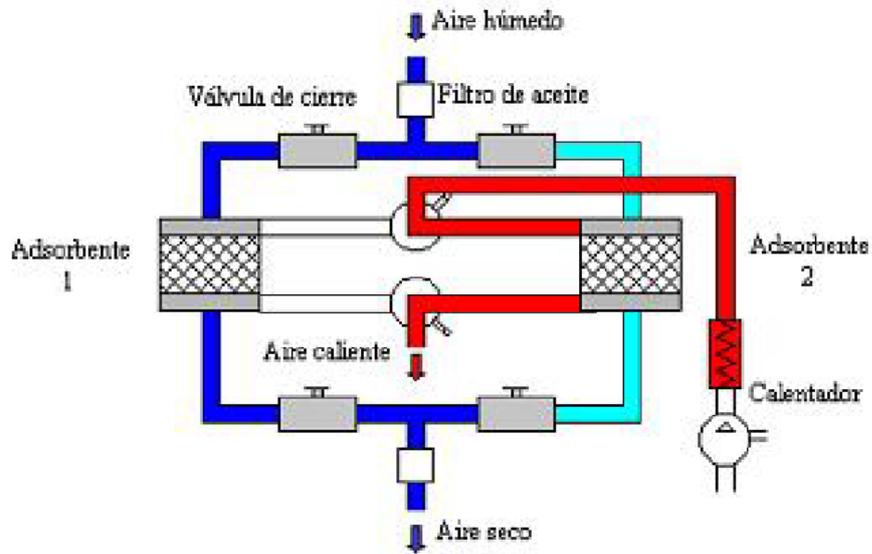


Figura 2.14: Secado por adsorción.

Fuente: Propuesta de rediseño de la red de aire comprimido de industrias Ceresita S.A., Ana Soto V., 2005.

La regeneración del desecante también puede darse con aire comprimido seco.

Los secadores por adsorción requieren de una filtración adecuada: un prefiltro coalescente previene la contaminación del desecante debido a los aerosoles y un post filtro de partículas que acumulan trazas del desecante que pueden ser expulsadas del secador. El adecuado mantenimiento de estos filtros extiende los intervalos de servicios y proveen una excelente calidad de aire

2.4 CONEXIÓN A LA RED

El sistema de aire comprimido se conectará a la red existente en tres puntos, mediante tuberías con uniones soldadas o roscadas. La figura 2.15 muestra la red existente de la central térmica:

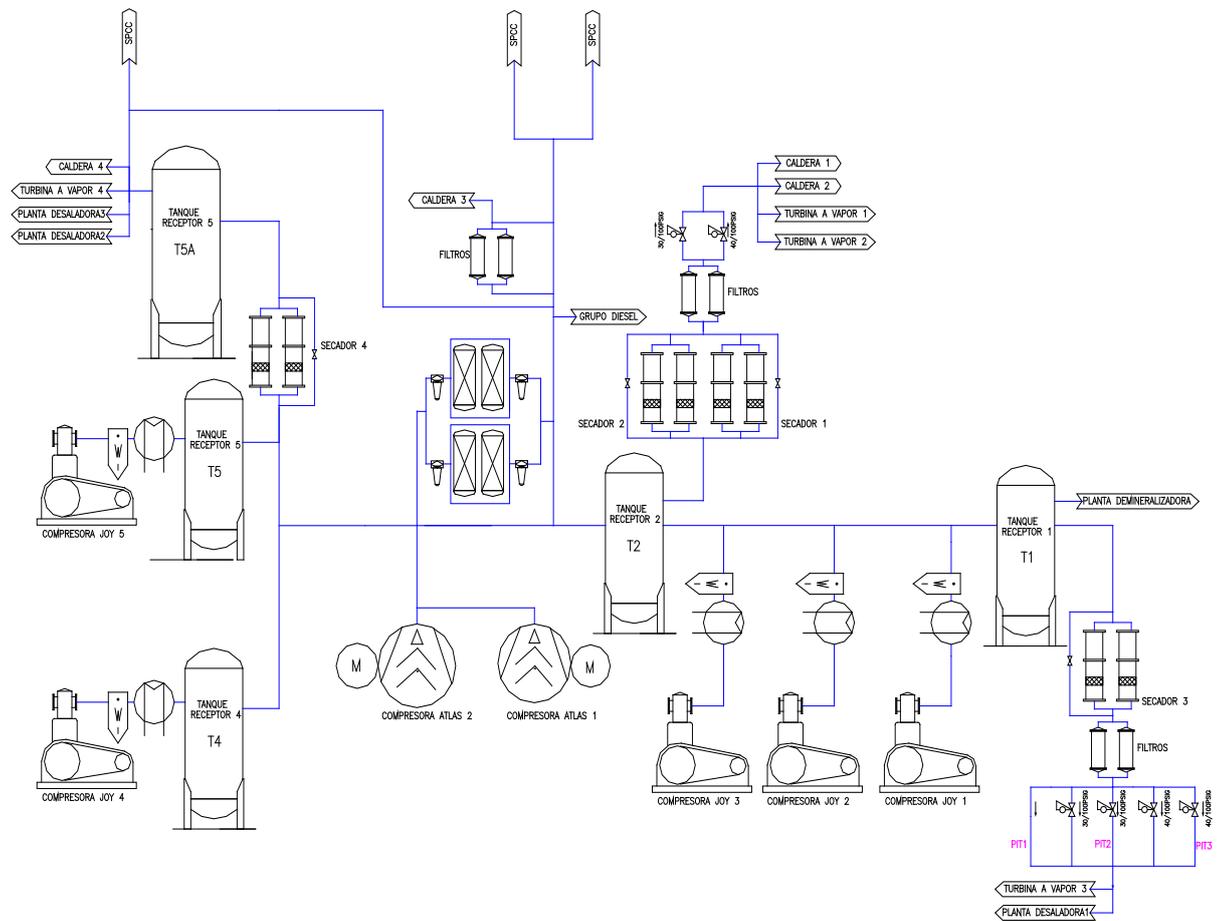


Figura 2.15: Red de aire comprimido para instrumentos de control de CTILO1.

Fuente: Elaboración propia a partir del Plano N° ILO1-AINS-QE-FD-029

Como se muestra en la figura 2.15 la red de aire de comprimido para instrumentos de control de la CTILO1 cuenta con siete compresoras libres de aceite y enfriadas por agua, cinco son compresoras reciprocantes tipo pistón marca Joy modelo WGO-9 y dos son compresoras rotativas tipo tornillo marca Atlas Copco.

CAPÍTULO 3

CÁLCULO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS

3.1 COMPRESOR

Para seleccionar una compresora se requiere especificar el flujo volumétrico de aire y la presión de descarga de la compresora.

3.1.1 Requerimiento de aire

El cliente Southren Perú Copper (SPC) debido a la ampliación de su fundición requiere 11,33 m³/s a condiciones estándar (400 scfm) de aire comprimido para instrumentos de control. A este valor se debe agregarle un 30 % para consumos futuros y un % por pérdidas de aire debido a fugas, que según fabricantes se debe considerar de 10 a 20 %. Considerando 20 % por pérdidas, de esta manera la capacidad de la compresora es de:

$$\text{Capacidad Compresora} = (11,32 \times 1,2 \times 1,3) \text{ m}^3/\text{s} = 17,67 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (624 scfm)}$$

3.1.2 Requerimiento de presión

La presión manométrica de la red es de 600 kPa (87 psig), por lo que este valor es la presión al final de la tubería que conecta a la compresora con la red. La tabla 3.1 muestra la presión de conexión a la red, las caídas de

presión de filtros instalados para limpiar el aire, la caída de presión en el secador de aire y la pérdida de presión en el sistema de tuberías (tuberías, accesorios y válvulas).

Tabla 3.1: Presión de trabajo del compresor.

Descripción	Presión manométrica (kPa)	Presión (psig)
Presión a la conexión de la red	600	87
Caída de presión filtro coalescente	14	2
Caída de presión filtro de partículas	20	3
Caída de presión secador	9	1
Caída de presión sistema de tuberías	20	3
Presión de Trabajo	663	96

Fuente: Compressed Air Manual, Atlas Copco, 1998.

El valor de las caídas de presión mostradas en la tabla 3.1 son valores tomados del manual de fabricante para determinar la presión de descarga del compresor, a dicha presión se denomina presión de trabajo del compresor, que es 663 kPa (96 psig).

El cuadro 3.1 muestra los tipos de compresores utilizados en la industria, su máxima potencia al eje y la máxima presión de trabajo del compresor.

Cuadro 3.1: Comparación de potencia y presión de compresores

Tipo de compresor	Aprox. Max*. kW (BHP)	Aprox. Max. Manométrica MPa (psig)
Reciprocante	15 000 (20 000)	6 895 (100 000)
Rotativo tipo Vane	640 (860) twin unit	2,8 (400)
Rotativo lóbulo espiral	6 000 (8 000)	1,7 (250)
Dinámico centrífugo	45 000 (60 000)	689,5 (10 000)
Dinámico de flujo axial	74 600 (100 000)	3,4 (500)

**Estos máximos están sujetos a ciertas limitaciones impuestas por otros factores y bajo ciertas condiciones pueden ser excedidos.*

Fuente: Reciprocating Compressors Operation & Maintenance, Heinz Bloch and John Hoefner, 1996.

Para el requerimiento de presión manométrica de trabajo de 663 kPa (96psig), los cinco compresores del cuadro 3.1 cubren el requerimiento.

La figura 3.1 muestra los rangos aproximados de aplicación para compresores tipo reciprocantes, centrífugos, de flujo axial y de tornillo.

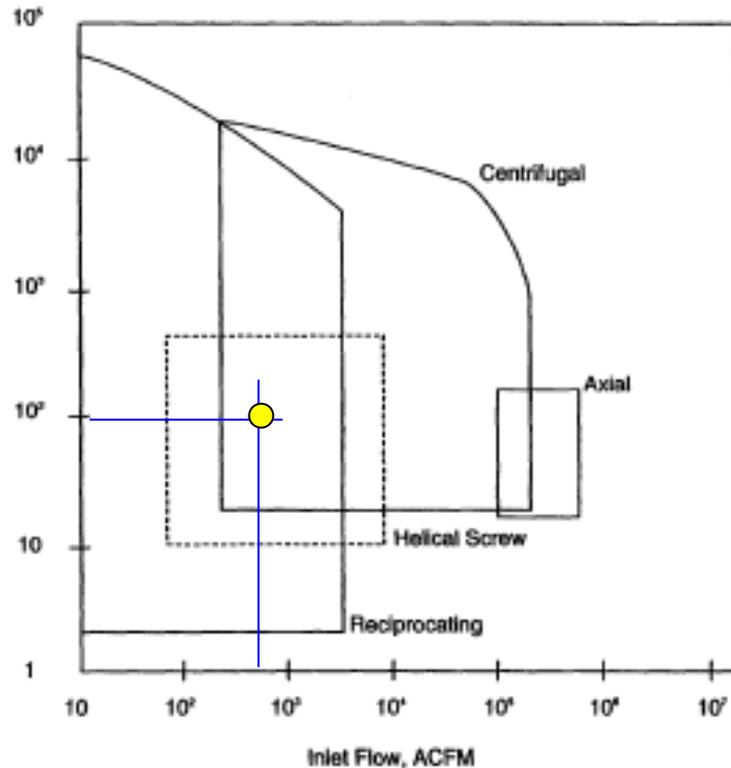


Figura 3.1: Rangos aproximados de aplicación para la mayoría de compresores, el eje “y” es la presión de trabajo en psig .

Fuente: Reciprocating Compressors Operation & Maintenance, Heinz Bloch and John Hoefner, 1996.

Para el requerimiento de presión manométrica de trabajo de 663 kPa (96 psig) y el flujo requerido de 17,67 m³/s a condiciones estándar (624 scfm) se selecciona las compresoras de pistón y de tornillo, por tener unidades de este tipo en la planta y el personal de mantenimiento cuenta con experiencia en este tipo de unidades de compresión de aire. Hay que seleccionar una de ellas, a continuación se compara las características de cada tipo:

- La mayoría de los fabricantes presenta el compresor tipo tornillo como una unidad compacta y montada sobre base, lo que hace que el compresor sea de fácil transporte e instalación, así como una menor

área para instalación y por su bajo nivel de vibración no necesita cimientos especiales. Mientras que en un compresor tipo pistón requiere fundación especial.

- El compresor de tornillo se encuentra sumergido en aceite que resulta en un aumento de la temperatura de salida del aire comprimido con respecto a la ambiental de aproximadamente 39 °C a una presión manométrica de 700 kPa (100 psig), en cambio en un compresor de pistón la temperatura de salida del aire comprimido es alrededor de los (130 ± 15) °C .
- Los compresores tipo tornillo presentan menos partes en movimiento y el desgaste por contacto se presenta únicamente en los rodamientos los cuales trabajan a altas revoluciones alrededor de los 3 600 rpm, necesitan menor inspección, pero con técnicos especializados; en cambio los compresores de pistón tienen más partes en movimiento y en contacto por lo tanto presentan mayor desgaste y es necesario inspeccionar con mayor frecuencia con técnicos no especializados, trabajan a bajas revoluciones alrededor de 600 rpm lográndose una mayor vida de las partes.
- El compresor de pistón posee un rango de regulación de presiones entre la carga y descarga de 138 kPa (20 psi) más amplio que en el de tipo tornillo que es de 21 kPa (3 psi).
- La desventaja de los compresores de tornillos es que debido a las tolerancias tan estrechas que se tienen entre los rotores se exige una mejor calidad de aire atmosférico, así como un alto cuidado en el sistema de lubricación. Los fabricantes ofrecen un filtro de admisión de

alta eficiencia para remover las partículas finas que se encuentran en suspensión en el aire de admisión.

- El compresor de tornillo es más silencioso que un compresor de pistón.

Tomando en cuenta esta comparación el compresor tipo tornillo es e adecuado para el requerimiento de flujo volumétrico en condiciones estándar de 17,67 m³/s (624 scfm) a una presión manométrica de descarga de 663 kPa (96 psig).

En el mercado se encuentran las firmas Ingersoll-Rand y Atlas Copco con las siguientes presiones manométricas de descarga en equipos de compresión para 60 Hz (ver anexo A: Presiones de compresoras de aire):

Ingersoll-Rand: 100 psig – 125 psig – 150 psig

Atlas Copco: 7 bar (100 psig) – 8,6 bar (125 psig) – 10,4 bar (150 psig)

La presión manométrica de trabajo de 7 bar (100 psig), es adecuado para el requerimiento del compresor. El cuadro 3.2 muestra las características principales de los equipos de las marcas Ingersoll-Rand y Atlas-Copco.

Cuadro 3.2: Características de equipos de Ingersoll-Rand y Atlas Copco: compresora, secador y filtro químico.

CARACTERISTICAS DE EQUIPOS	Requerimiento	PROPUESTAS	
		Ingersoll-Rand	Atlas-Copco
Total Inversión (USD)	≤ 300 000	281 201	285 789
Capacidad de la compresora m ³ /s (scfm)	17,67 (624)	16,56 (691)	20,87 (737)
Presión manométrica de trabajo de la compresora bar (psig)	7 (100)	8,6 (125)	7 (100)
Requerimiento eléctrico de la compresora	- 460 V	110 kW, 460 V	130 kW, 460 V
Tipo de Arrancador	-	Y-Δ	Y-Δ
Número de etapas del compresor	2	2	2
Temperatura ambiente máxima de trabajo de la compresora °C	> 39	46	40
Nivel de ruido de la compresora a 1m	85 db	75 db	68 db
Capacidad de secador m ³ /s (scfm)	> 17,67 (624)	23,2 (820)	-
Requerimiento eléctrico del secador	-	2 hp, 120 V	0,2 hp Incorporado
Capacidad de filtros m ³ /s (scfm)	> 17,67 (624)	34 (1 200)	-
Capacidad del filtro químico m ³ /s (scfm)	> 17,67 (624)	31,1 (1 100)	-
Tiempo de entrega de equipos en semanas	-	12	13
Lugar de Entrega	Lima	Lima	Bélgica
Requerimiento de agua de enfriamiento l/s	-	2,4	2,5

Fuente: Elaboración propia a partir de las cotizaciones del Anexo B.

Las dos marcas cumplen con el flujo volumétrico a condiciones estándar requerido de 17,67 m³/s (624 scfm) a una presión de trabajo manométrica de 663 kPa (96 psig); sin embargo, la firma Ingersoll-Rand tiene mayor temperatura ambiente de trabajo, mayor presión de trabajo de la compresora, menor inversión, menor tiempo de entrega y lugar de entrega de equipos más cercano y tiene independiente el secador para evitar indisponibilidad de las compresoras por el mantenimiento del secador.

Además Southren Perú Copper (SPC) con Crubher que es el representante de la marca Ingersoll-Rand tienen un contrato de servicios de mantenimiento de todas las unidades de compresión de sus minas de Cuajone y Toquepala, y la compañía Fluor encargada de todo el proyecto de ampliación y modernización de la Fundición de SPC, optó por adquirir compresores para aire y secadores de adsorción regenerativos Ingersoll-Rand para la operación de la moderna Fundición. Esta situación provee de experiencia para el personal de ingenieros y técnicos en la labor de mantenimiento de este tipo de unidades, influyendo en la selección de los equipos de Ingersoll-Rand.

Características de equipos de la compresora:

Compresora: Ingersoll-Rand

Modelo = Sierra H150W-SD

Capacidad = 16,56 m³/s (691 scfm)

Presión de trabajo = 860 kPa (125 psig)

Requerimiento eléctrico = 110 kW (150 hp) a 460V.

Enfriamiento: por medio de agua

3.2. TANQUE RECEPTOR

3.2.1. Cálculo del volumen del tanque receptor

Se calcula el volumen mínimo del tanque receptor según la fórmula [2.1] del capítulo 2, la capacidad de la compresora es 691 scfm (326 l/s), se considera una temperatura en el tanque receptor de 24 °C, una frecuencia máxima para los compresores Ingersoll-Rand de 30⁻¹ Hz, y una diferencia de

presiones entre la carga y descarga de 0,5 bar que es valor mínimo recomendado por Atlas Copco, entonces:

$$V = \frac{0,25 \times Q_c \times p_1 \times T_0}{f_{\text{máx}} \times (p_u - p_1) \times T_1} \quad [2.1]$$

$$V = \frac{0,25 \times 326 \times 1,013 \times (273 + 24)}{30^{-1} \times (0,5) \times (28 + 273)} = 4888 \text{ L}$$

El volumen mínimo del tanque receptor de aire comprimido recomendado es 4 888 L, y se selecciona el volumen inmediato superior comercial que es 5 m³ (5 000 L).

3.2.2 Cálculo del espesor del tanque receptor

3.2.2.1 *Cálculo del espesor de la tapa semielíptica*

Diámetro interior (D): 1,335 mm (Según plano N° TA-12161 del anexo D)

Presión de trabajo (P): 110 psi (758 kPa).

Esfuerzo permisible del material (S): 16 600 psi (114 MPa) Plancha
SA-36

Eficiencia de la soldadura (E): 0,85 Radiografía al 85%

Se aplica la fórmula [2.3]:

$$\text{Espesor de la tapa: } t = \frac{PD}{2SE - 0,2P} \text{ mm} \quad [2.3]$$

Espesor de la tapa: 5,21 mm

Sobre espesor por corrosión: 2,00 mm

Espesor requerido: 7,21 mm

Espesor a utilizar: 8,00 mm

3.2.2.2. Cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico

Radio interior (R): 668 mm

Presión de trabajo (P): 110 psi (758 kPa)

Esfuerzo permisible del material (S): 16 600psi (114 MPa) Plancha SA-36

Eficiencia de la soldadura (E): 1.00 Radiografía al 100%

Se aplica la fórmula [2.4]:

$$\text{Espesor del cuerpo: } t = \frac{P R}{S E - 0,6 P} \text{ mm} \quad [2.4]$$

Espesor del cuerpo: 4,44 mm

Sobre espesor por corrosión: 2,00 mm

Espesor requerido: 6,44 mm

Espesor a utilizar: 8,00 mm

Crubher representante de la marca Ingersoll-Rand en Perú también proporciona el tanque receptor bajo las especificaciones técnicas del tanque ver anexo A.

En el anexo D se adjuntan los certificados solicitados en la especificación técnica del tanque receptor de aire: La memoria de cálculo de espesor del tanque incluyendo espesor por corrosión, plano (lista de materiales) y los certificados de fabricación, de autorización por ASME, de ensayos no destructivos (prueba radiográfica), prueba hidrostática, de Inspección dimensional y de aplicación de pintura.

3.3. UNIDAD DE TRATAMIENTO DEL AIRE COMPRIMIDO

Se requiere calcular la cantidad de agua presente en el aire atmosférico circundante a CTILO1 y su presión de punto de rocío, para seleccionar el tipo de secador adecuado.

3.3.1 Cálculo de presión de punto rocío

Debido al requerimiento de suministrar aire comprimido a instrumentos de control de proceso, y según el cuadro 5 del capítulo 2 se requiere una calidad de aire clase 2-3-2 como requerimiento mínimo que significa tamaño de partículas de 1µm, presión de punto de rocío de -20 °C y concentración máxima de aceite de 0,1 mg/m³; se hace necesario el cálculo del punto de rocío del aire del ambiente del compresor, el valor calculado se envió a la firma Ingersoll-Rand para que tengan en cuenta en la selección del tipo de secador.

El cuadro 3.3 muestra los datos ambientales de CTILO1:

Cuadro 3.3: Data atmosférica anual 2007 de CTILO1.

	Mínimo	Promedio	Máximo
Temperatura °C	12	18	28
Humedad Relativa %	49	74	100
Elevación m.s.n.m	11,5		
Calidad del aire	Polvo, gases SO ₂ , salino y corrosivo		

Fuente: Laboratorio CTILO1, Patricia Paredes, 2007.

Con la data del cuadro 3.3 se calcula el punto de rocío a partir de la humedad relativa (HR) y de la temperatura ambiente.

Para determinar del punto de rocío se considera la temperatura ambiente promedio 18 °C, a esta temperatura en la tabla de presiones de vapor de agua del anexo A se obtiene una presión de vapor de agua de 20,63 mbar, ahora se calcula la humedad de saturación (HS), con la fórmula [2.7]:

$$HS = 0,622 \frac{P_a}{(P - P_a)} \quad [2.7]$$

donde:

$P_a = 20,63$ mbar (presión absoluta de vapor de agua a 18 °C)

$P = 7,89$ bar (presión absoluta del sistema de aire comprimido)

$$HS = 0,622 \frac{20,63 \times 10^{-3}}{(7,89 - 20,63 \times 10^{-3})} = 1,63 \times 10^{-3} \frac{\text{kg vapor agua}}{\text{kg aire seco}}$$

Se calcula la humedad absoluta (HA) con la fórmula [2.8] que será igual a la humedad de saturación porque se considera el % de humedad más alto en CTILO1 (100% de humedad relativa)

$$HR = \frac{HA}{HS} \quad [2.8]$$

$$HA = HS = 1,63 \times 10^{-3} \frac{\text{kg vapor agua}}{\text{kg aire seco}}$$

Debido a que en el punto de rocío la humedad absoluta (HA) se convierte en la humedad de saturación (HS), se utiliza la fórmula [2.7], despejando en ella P_a y sustituyendo HS por el valor de HA calculado, se tiene:

$$P_a = \frac{HA \cdot P}{(0,622 + HA)} \quad [2.8]$$

$$P_a = \frac{1,63 \times 10^{-3} \times 7,89}{(0,622 + 1,63 \times 10^{-3})} = 20,6 \text{ mbar}$$

Luego con P_a en la tabla de presiones de vapor de agua del anexo A, se obtiene por interpolación 18 °C, esta temperatura corresponde al valor del punto de rocío buscado, por seguridad se considera la temperatura de punto de rocío 10 °C por debajo de la temperatura correspondiente al punto de rocío calculado, entonces el nuevo punto de rocío es 8 °C; para este punto de rocío secadores frigoríficos es una excelente opción para obtener aire comprimido seco a bajo costo por su consumo mínimo de energía, son

capaces de mantener la humedad relativa por debajo del 50 % en la mayoría de los entornos, pero en ambientes altamente corrosivos como es el caso de CTILO1 el intercambiador de cobre de un secador frigoríficos ó refrigerativo se destruirá rápidamente, además la clase de calidad de aire requerida es 2-3-2 (presión punto de rocío a -20 °C), por lo tanto, se requiere de una solución avanzada empleando tecnología de secadores no refrigerantes como secadores por adsorción, que alcanzan presión de punto de rocío hasta -40 °C o inferiores, entonces la solución es un secador de adsorción.

La capacidad de flujo de aire del secador y de los filtros debe ser mayor que la capacidad de la compresora. Para los filtros se toma en cuenta el grado de filtrado requerido.

El fabricante recomienda el tipo de filtro y secador para cada modelo del compresor, el modelo del compresor es Sierra H150W-SD y las características de la unidad de tratamiento son:

Características del secador de adsorción:

Marca: Ingersoll Rand

Modelo = Regenerativo TZ820

Desecante: Alúmina activada

Capacidad del secado a condiciones estándar = 23,2 m³/s (820 scfm)

Pre filtro: Filtro coaslecente Ingersoll Rand IRHE1100

Post filtro: Filtro para particulado Ingersoll Rand IRDP1100

Válvula automática de drenaje.

Indicador de diferencial de presión.

Válvula de seguridad calibrada en 150 psig en cada torre

Indicador de presión de las torres de 0 a 300 psi.

Tablero eléctrico estándar.

Silenciadores.

Requerimiento eléctrico= 2 hp, 120 V

3.3.2 Filtro químico

El ambiente circundante de CTILO1 es salino y corrosivo, este entorno hace necesario instalar a la sección de ingreso de aire a la compresora un filtro químico, para el control de la contaminación gaseosa corrosiva que controla gases como SO₂, Cl₂, H₂S, NO_x, etc.

El fabricante recomienda el filtro químico a la succión de la compresora:

Características del filtro químico a la admisión de la compresora:

Marca: Ingersoll Rand.

Tipo: doble paso

Modelo: CFS1100-DP

Pre filtro y post filtro.

Filtros canister desechable de medio químico de purificación de aire.

Capacidad a condiciones estándar: 31,1 m³/s (1 100 scfm).

3.4. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS SELECCIONADOS

3.4.1 Filtro químico

El sistema de filtrado químico de purificación de aire de Ingersoll Rand modelo CFS 1100-DP con capacidad 31,1 m³/s (1 100 scfm) instalado a la sección de ingreso de aire a la compresora. Es una unidad de purificación de aire diseñada para el control de la contaminación gaseosa corrosiva. Los gases a controlar son varios incluyen Cl₂, H₂S, NO_x, SO₂, entre otros. Vida

del medio químico: 6 meses o 4 000 horas de operación, lo primero que se cumpla.

La carcasa del sistema de filtración químico de purificación de aire es fabricada de aluminio en calibre 18. Se suministran puertas de acceso para la revisión a los filtros de partículas y a las canastas desechables de medio químico de purificación de aire. Los filtros de partículas y módulos se soportan mediante un bastidor de aluminio extruido. La abertura de descarga se localiza al centro de la placa de descarga, y proporciona una conexión de tubo robusto para sujeción. La abertura de admisión está cubierta con una persiana contra lluvia y un tamiz de residuos. El exterior a prueba de intemperie incluye una tapa discontinua superior con borde escurridor. La unidad está soportada por canales robustos que tienen ranuras para carretilla elevadora para un fácil manejo, la figura 3.2 muestra el filtro químico:

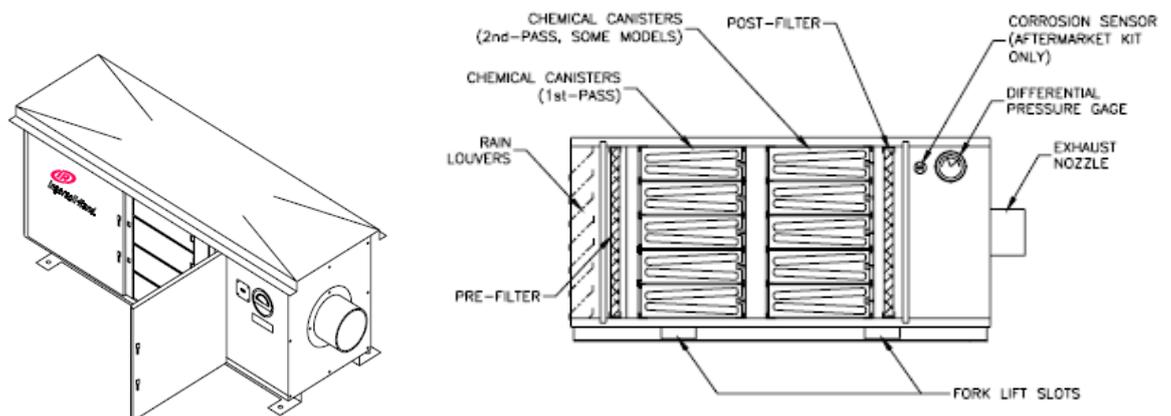


Figura 3.2: Filtro químico contra la contaminación gaseosa corrosiva.

Fuente: Pure Air Chemical Filtration System for Rotary & Recip, Ingersoll-Rand, 2001.

En la figura 3.2 se muestra los componentes del filtro químico que son:

Prefiltro.- El aire al ingresar a la unidad atraviesa un filtro de partículas que remueve partículas mayores a 10 μm con una eficiencia de 88%. El prefiltro quita la mayor cantidad de partículas atmosféricas, por lo tanto se debe impedir que el prefiltro tenga superficies agujereadas o tapadas.

Canisters químicos de purificación de aire.- El aire pasa a través de las perforaciones de los canisters plásticos en "V", los cuáles contiene un producto químico especificado para su ambiente. El proceso de adsorción, absorción, y la oxidación destruyen los gases corrosivos de paso a través de esta etapa. El modelo SP es de un simple paso químico, mientras que el modelo DP es de doble paso químico.

Postfiltro.- En la tercera etapa el aire atraviesa un post filtro que remueve partículas con una eficiencia de 74% mayores a 2 μm . Este filtro no elimina la necesidad de un filtro final de la entrada de la compresora.

Sección de salida.- La etapa final aloja:

- Un indicador de presión diferencial, que provee una indicación para reemplazar los filtros de partículas.
- Un sensor opcional de corrosión, que permite el monitoreo de rutina del aire químicamente filtrado, también provee una indicación para reemplazar los canisters.
- Una boquilla de salida, para la conexión entubada con el compresor.

3.4.2 Compresor tipo tornillo modelo Sierra H150W

La compresora modelo Sierra H150W de Ingersoll-Rand es una compresora de tornillo, libre de aceite, de dos etapas, accionado por motor eléctrico, con accesorios entubados, cableados y montada en una placa de asiento.

La presión manométrica normal de trabajo es 860 kPa (125 psig) y la presión máxima permisible es 20 kPa (3 psi) por encima de la presión normal de trabajo tal como indica la placa de la compresora. El compresor estándar funciona en una gama de temperatura ambiente que oscila entre 2 °C y 46 °C (35 °F – 115 °F).

La válvula de seguridad entre etapas se fija a una presión manométrica de 3,1 bar (45 psig) y la válvula de seguridad de segunda etapa se fija en 11,4 bar (165 psig) como máximo.

El nivel de ruido siempre se refiere a una distancia específica de la fuente sonora por ejemplo un motor. Para una compresora estacionaria la distancia es 1 m y para compresores portátiles la distancia es 7 m en concordancia con El Instituto de gas y aire comprimido y El Comité Europeo de compresores, bombas de vacío y herramientas neumáticas (CAGI PNEUROP), el manual de operación y mantenimiento de las compresoras indica que las compresoras tienen un nivel de ruido según CAGI PNEUROP a 1 m de (75 ± 3) db que es el nivel equivalente de presión de sonido constante. (Puesto de trabajo a carga nominal de trabajo). La figura 3.3 muestra el diagrama de flujo del compresor seleccionado:

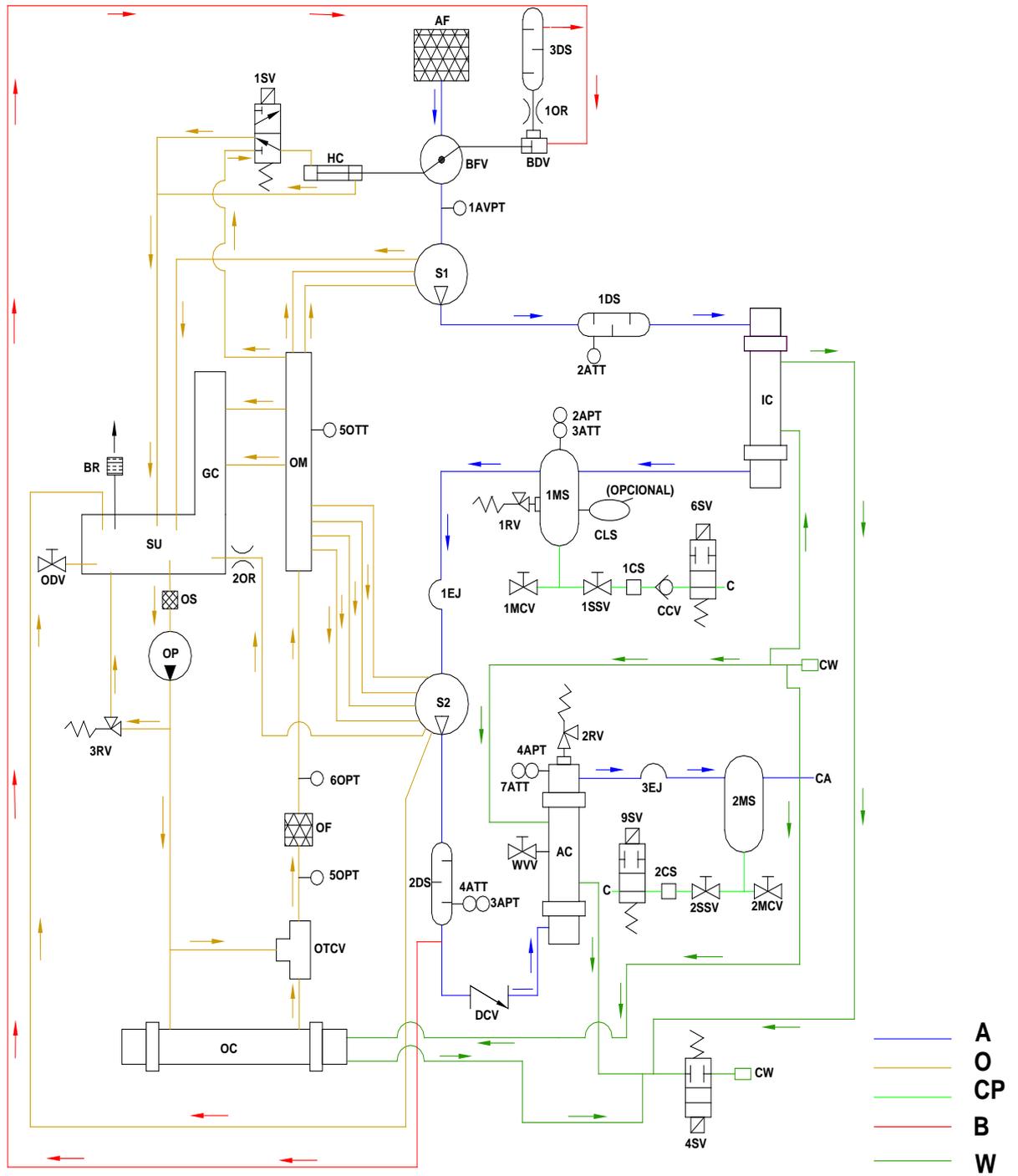


Figura 3.3: Diagrama de flujo del compresor modelo Sierra H150W.

Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Sierra, Ingersoll-Rand, 2004.

Leyenda del diagrama de flujo del compresor Sierra H150W

W	Tuberías de agua - Water piping
A	Tuberías de aire - Air piping
O	Tuberías de aceite - Oil piping
CP	Tuberías de condensado - Condensate piping
B	Tuberías de purga - Blowdown piping
S1	Primera etapa del compresor - First compressor stage
S2	Segunda etapa del compresor - Second compressor stage
GC	Caja de engranajes - Gearcase
SU	Carter - Sump
AF	Filtro del aire – Air filter
BFV	Válvula de mariposa - Butterfly throttle valve
HC	Cilindro Hidraulico - Hydraulic Cylinder
IC	Inter Refrigerador - Intercooler
AC	Postrefrigerador - Aftercooler
OC	Enfriador de aceite - Oil Cooler
OM	Colector de aceite - Oil Manifold
OF	Filtro de aceite - Oil Filter
OTCV	Válvula de control temperatura del aceite- Oil temp control valve
OP	Bomba de aceite - Oil Pump
ODV	Válvula de vaciado de aceite -Oil drain valve
1OR	Orificio de Purga - Orifice Blowdown
2OR	Orificio flujo de aceite - Orifice oil flow
OS	Malla de filtrado del aceite - Oil strainer
BR	Respiradero - Breather
BDV	Válvula de purga - blowdown valve
DCV	Válvula de retención de descarga - discharge check valve
CW	Agua Refrigerante - Cooling Water
CA	Aire Comprimido - Compressed Air
C	Condensado – Condensate
1DS	Silenciador de descarga primera etapa - First stage discharge silencer
2DS	Silenciador de descarga segunda fase - second stage discharge silencer
3DS	Silenciador de descarga de purga - blowdown discharge silencer
1EJ	Junta de expansión - Interstage expansion joint
3EJ	Junta de expansión de descarga - discharge expansion joint
1RV	Válvula de desahogo de seguridad entre etapas - interstage safety relief valve
2RV	Válvula de desahogo de seguridad de descarga - discharge safety relief valve
3RV	Válvula de desahogo de la presión del aceite - oil pressure relief valve
1MS	Separador de humedad entre etapas - interstage moisture separator
2MS	Separador de humedad de descarga - discharge moisture separator

1MCV	Válvula manual del condensado entre etapas - interstage manual condensate valve
2MCV	Válvula manual del condensado de descarga - discharge manual condensate valve
1SSV	Valv. de servicio de filtro purgador entre etapas - Interstage strainer service valve
2SSV	Valv. de servicio de filtro purgador de descarga - discharge strainer service valve
1CS	Filtro del condensado entre fases - interstage condensate strainer
2CS	Purificador del condensado de descarga - discharge condensate strainer
CCV	Válvula no retorno del condensado - condensate check valve
1SV	Válvula solenoide de carga - load solenoid valve
6SV	Válvula solenoide del condensado entre etapas - interstage condensate solenoid valve
9SV	Válvula solenoide de descarga del condensado - discharge condensate solenoid valve
CLS	Interruptor del nivel del condensado - condensate level switch (optional)
1AVPT	Transductor de presión de vacío límites: 0 – 1 bar (0–15 psi)
2APT	Transductor de presión del aire límites: 0 – 6,9 bar (0–100 psi)
3APT	Transductor de presión del aire límites: 0 – 13,8 bar (0–200 psi)
4APT	Transductor de presión del aire límites: 0 – 13,8 bar (0–200 psi)
50PT	Transductor de presión de aceite límites: 0 – 6,9 bar (0–100 psi)
60PT	Transductor de presión de aceite límites: 0 – 6,9 bar (0–100 psi)
2ATT	Transductor de temperatura del aire (rtd) límites: –18 °C + 266 °C (0 – 510 °F)
3ATT	Transductor de temperatura del aire (termistores) límites: –18 °C + 121 °C (0 – 250 °F)
4ATT	Transductor de temperatura del aire (rtd) límites: –18 °C + 266 °C (0 – 510°F)
7ATT	Transductor de temperatura del aire (termistores) límites: –18 °C + 121 °C (0 – 250°F)
50TT	Transductor de temperatura del aire (termistores) límites: –18 °C + 121 °C (0 – 250°F)

Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Sierra, Ingersoll-Rand, 2004.

Se describe brevemente cada sistema del compresor Sierra H150W:

3.4.2.1. Sistema de aire comprimido

El aire entra en el compresor a través de una abertura situada en el extremo derecho de la envolvente. El aire pasa después por un conducto forrado de material insonoro hasta el filtro del aire. Luego, a través de un manguito

flexible redondo, el aire pasa por una válvula de admisión/descarga hasta la primera etapa del compresor.

Los rotores helicoidales de la primera etapa comprimen el aire hasta una presión manométrica de 1,7 a 2,4 bar (25 a 38 psig). El aire se descarga en un venturi que amortigua cualquier pulsación de la presión que pudiere presentarse. El inter-refrigerador reduce luego la temperatura del aire antes de que ingrese a la segunda etapa. También se ha montado en este sistema una válvula de desahogo de seguridad como protección contra una presión interetápica normalmente alta. El separador de humedad se instala inmediatamente después del interenfriador para que elimine toda condensación que pueda originarse bajo ciertas condiciones de humedad y temperatura ambientales.

Se utiliza una junta de expansión entre el separador de humedad y la segunda etapa. Esta última comprime el aire a la presión deseada. Las pulsaciones de presión son amortiguadas por un venturi. Las vibraciones transmitidas se evitan mediante una junta de expansión. Se provee una válvula de retención tipo check que impide cualquier reflujó de aire al compresor. El postenfriador enfría el aire hasta que alcanza una temperatura adecuada, mientras que el separador de la humedad de descarga elimina importantes cantidades de condensación. Durante la operación en modo sin carga, se cierra la válvula de admisión/descarga mediante una articulación mecánica, y se abre la válvula de purga, expulsando de la unidad todo el aire comprimido.

3.4.2.2 Sistema de eliminación del condensado

Inmediatamente después del interenfriador y post-enfriador está situado un separador de la humedad que recoge y expulsa toda la condensación del aire comprimido. El condensado se drena a través de válvulas solenoide accionadas eléctricamente. La duración de la apertura se fija de antemano en tres valores entre 2 y 20 segundos, pudiéndose alterar el intervalo de apertura entre 60 y 360 segundos, en función de las condiciones ambientales. Si el ambiente experimenta alta temperatura y/o alta humedad, quizás tenga que reducirse el intervalo de apertura. El intervalo fijado en fábrica es de 180 segundos.

Las uniones de las válvulas manuales están situadas en la parte exterior y posterior de la base inferior. Estas válvulas se suministran sueltas dentro de la envolvente del compresor y han de ser conectadas a las lumbreras tal como se indica en los dibujos de disposición general. Para comprobar el funcionamiento de las válvulas de solenoide, abrir momentáneamente las válvulas de derivación manuales una vez al día. Tratándose de períodos prolongados de inactividad de las compresoras, las válvulas manuales deberán abrirse y dejarse abiertas.

Se proveen filtros tipo strainer antes de las válvulas del condensado para evitar que las válvulas de solenoide sean obstruidas por partículas. Antes de que se realice cualquier trabajo de mantenimiento en estos filtros o en las válvulas de solenoide, deberán cerrarse las válvulas de servicio de los mismos para su aislamiento de la alta presión posible.

3.4.2.3 Sistema de lubricación

El cárter del aceite queda integrado dentro de la caja de engranajes. La bomba de aceite es una bomba de tipo engranaje y desplazamiento positivo cuyo accionamiento se realiza por medio de eje accionado del compresor, por consiguiente, gira a la velocidad del motor principal (3 600 rpm).

Desde la bomba, el aceite circula hasta el enfriador de aceite pasando por una válvula de desahogo de la presión. La función de la válvula de desahogo de la presión es evitar una presión excesiva en el sistema pudiendo desviar parte del flujo de aceite de vuelta al cárter. En el lado de descarga del enfriador del aceite hay una válvula termostática. Esta válvula mezcla el aceite frío proveniente del enfriador con el caliente que bypasea al enfriador, proporcionando así aceite a óptima temperatura a los rodamientos y engranajes.

Luego, el aceite pasa a través de un filtro hasta el colector de distribución. Un orificio del colector determina la presión del aceite entre 2,8 – 3,5 bar (40 – 50 psig), y a una temperatura de funcionamiento normal de 54 °C – 68 °C (129 °F – 154 °F). La ventilación de la caja de engranajes se realiza mediante un respiradero montado en la misma. El escape del respiradero se lleva por conductos hasta la zona exterior de la unidad.

3.4.2.4 Sistema de refrigeración

El inter enfriador, el post-enfriador y el enfriador del aceite son todos ellos intercambiadores de calor de tipo de carcasa y tubos. El inter enfriador y el post enfriador, son de diseño de “agua en la carcasa”, mientras que el

enfriador del aceite utiliza el diseño “agua en los tubos”. El agua refrigerante circula a través de cada uno de esos tres componentes en paralelo. Se provee una válvula solenoide de retención en la línea de descarga del agua procedente de la unidad. Los conjuntos de tubos de los intercambiadores se pueden desmontar para facilitar su limpieza.

3.4.3 Secador de adsorción regenerativo modelo TZ820

El secador regenerativo sin calor modelo TZ820 de Ingersoll-Rand de diseño simple, utiliza dos columnas llenas de gránulos adsorbentes que secan el aire comprimido. Los diminutos poros que tienen estos gránulos atrapan la humedad y la eliminan del suministro de aire comprimido de forma permanente. La temperatura del aire comprimido no desciende, por lo que no hay peligro de que se congele el vapor de agua.

El desecante en el presente caso alúmina activada en granos, ver hoja técnica en el anexo D, se apoya en una malla cuneiforme autolimpiable de acero inoxidable. De este modo, se garantizan presiones diferenciales más bajas y puntos de rocío a presión constante y se prolonga la vida útil del adsorbente, la figura 31 muestra el desecante alúmina activada:



Figura 3.4: Desecante alúmina activada y una magnificación de una sección mostrando poros.

Fuente: Secadores desecantes regenerativos, Kaeser Compresores, 2005.

Para mantener la presión de punto de rocío a niveles aceptables, el adsorbente debe regenerarse, eliminando el vapor de agua que ha almacenado. Para la regeneración del desecante se requiere del 12 al 15 % de aire seco a la entrada para purga.

Estos secadores son recomendados para aplicaciones de baja capacidad ó donde es necesario usar controles neumáticos. Los silenciadores que tienen están aprobados por Occupational Health and Safety Assessment Series (OSHAS), asegura una despresurización silenciosa con un promedio de 87 dB a 1 m. Durante el proceso de regeneración, aire seco es conducido a través de la torre con desecante saturado, este aire seco purga el agua y vapor del desecante.

Dependiendo del tipo de secador el aire de purga es aire seco (aire comprimido seco), también puede ser aire ambiente calentado.

Principio de operación

La figura 3.5 muestra el proceso de operación del secador: el aire comprimido saturado ingresa al prefiltro coalescente que remueve el agua, aceite y partículas de hasta 0,01 μm con una alta eficiencia del 99,99 % y provee un aire comprimido con un contenido máximo de 0,01 mg/m^3 de aerosol de aceite a 21 °C. El aire comprimido sale del prefiltro coalescente e ingresa por la válvula de entrada al interior de la torre activa. La humedad es adsorbida por el desecante cuando el flujo de aire es hacia arriba. Aire comprimido seco sale a través de la válvula de salida con el punto de rocío de diseño. El aire seco es entonces descargado al post filtro que remueve

partículas de hasta 1 μm de desecante que quizás pueden resultar del proceso de secado. Antes de la descarga al post-filtro, una porción de aire seco que es restringido a través del ajuste de la válvula de purga es enviado a la torre que inicia el proceso de regeneración. Este flujo de aire seco remueve la humedad del desecante y prepara la torre para que la otra torre comience a regenerarse. El aire de purga escapa a través de la válvula de escape a un silenciador.

En este proceso combinado, cada torre opera por aproximadamente cinco minutos antes de alternarse. Este proceso de alternarse cada torre se repite una y otra vez, asegurando un flujo continuo de aire seco desde la unidad.

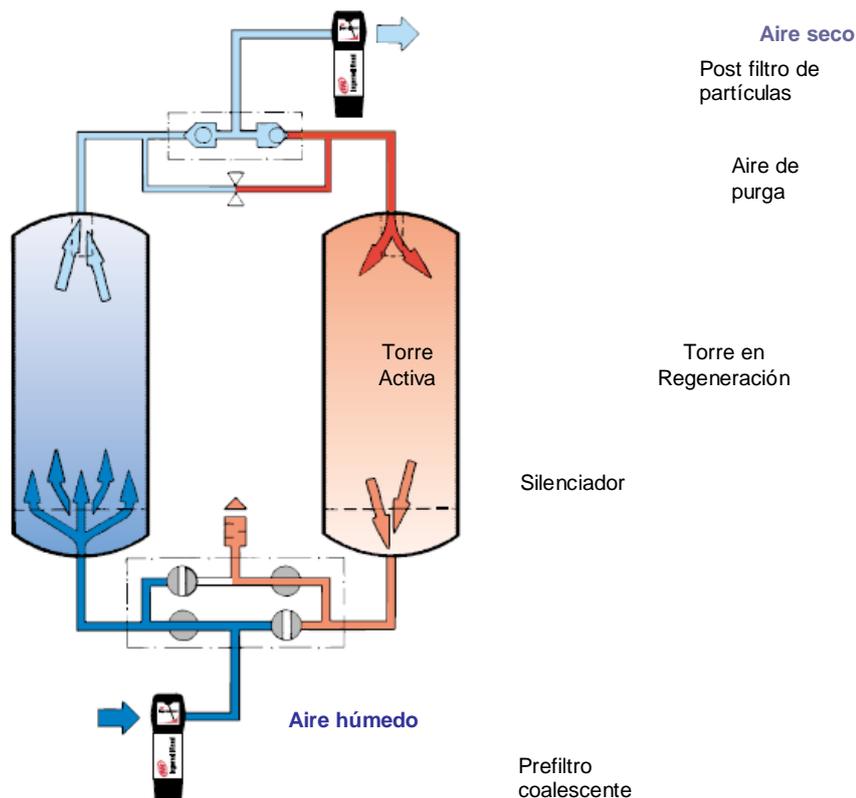


Figura 3.5: Diagrama de proceso de secado regenerativo con aire seco.

Fuente: Brochure ThermoZorb Heatless Regenerative Air Dryer, Ingersoll-Rand, 2001.

CAPITULO 4

CIMENTACIÓN Y MONTAJE ELECTROMECAÁNICO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO PARA INSTRUMENTOS DE CONTROL.

4.1 UBICACIÓN DE EQUIPOS: FILTROS QUÍMICOS, COMPRESORAS, TANQUE Y SECADORES.

Para la ubicación de los equipos se han seguido las recomendaciones del fabricante y se describe brevemente:

Filtro químico y compresora:

Para la ubicación de los filtros químicos y compresoras se toman en cuenta las recomendaciones del fabricante:

1. Distancias mínimas para su adecuada operación y mantenimiento, asegurando que las puertas de las compresoras y los filtros químicos se abran libremente, la figura 4.1 muestra las distancias mínimas de instalación y el sentido del flujo de aire de los filtros químicos:

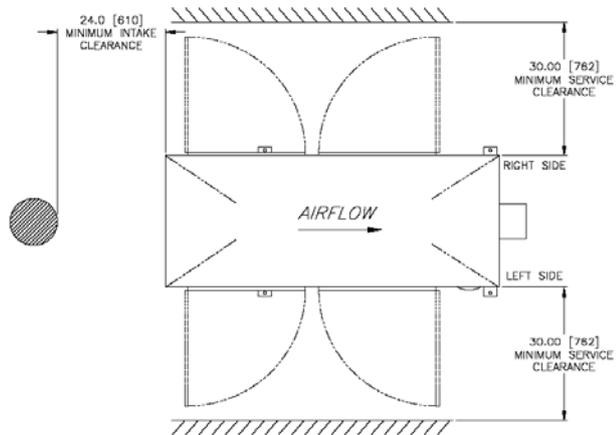


Figura 4.1: Distancias mínimas del filtro químico.

Fuente: Pure Air Chemical Filtration System for Rotary & Recip, Ingersoll-Rand, 2001.

2. Que el suelo sea liso con capacidad portante y el área seca y ventilada; con una atmósfera lo más limpia posible.
3. Considerar la conexión filtro químico y la compresora, la figura 4.2 ilustra el esquema de instalación típico para el filtro químico a la succión de la compresora:

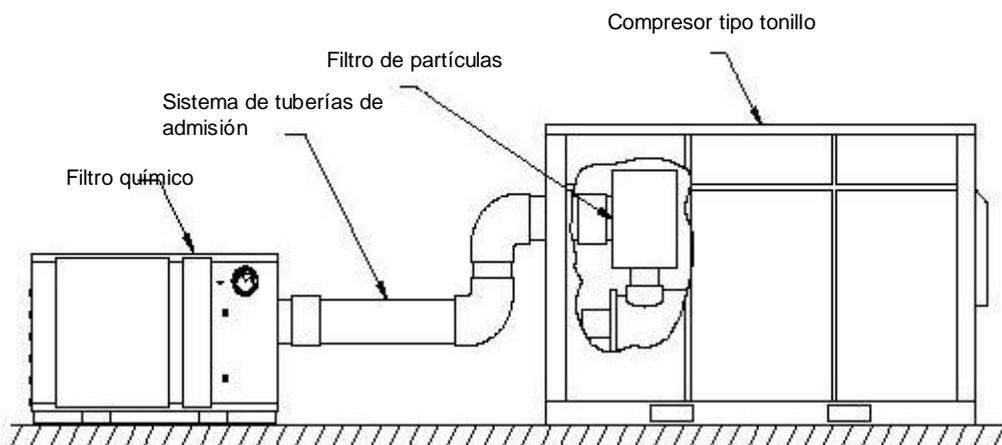


Figura 4.2: Esquema de instalación típico del filtro químico.

Fuente: Pure Air Chemical Filtration System for Rotary & Recip, Ingersoll-Rand, 2001.

Opcionalmente para compresoras tipo tornillo, el filtro químico se puede instalar en la parte superior de la cabina de la compresora, siempre que la carga no exceda la carga segura que soporta la cabina de la compresora, para el presente caso, el peso del filtro químico es de 228 kg (504 lb) que es mayor al peso que soporta la carcasa de la compresora de 113 kg (250 lb), entonces se diseña una estructura metálica de soporte para los dos filtros químicos como muestra el Plano N° ILO1-OA-QE-SD-630.

La estructura de soporte filtros químicos, cumple con la recomendación que la captación del aire de succión del compresor debe estar por lo menos 2 m por encima del piso para minimizar la aspiración de polvo.

La conexión de la toma remota de aire a la compresora proveniente del filtro químico varía de acuerdo al tipo de compresora si es recíproca o rotativa y al modelo de la compresora, en el presente caso la compresora es rotativa tipo tornillo y el modelo está dentro de la gama 125-150 Sierra, como la toma de aire es remota es necesario que el fabricante suministre algunas partes y es importante usar un tipo de sellador en todas las juntas (ejemplo: silicona); la figura 4.3 muestra la conexión de la toma remota de aire de la compresora:

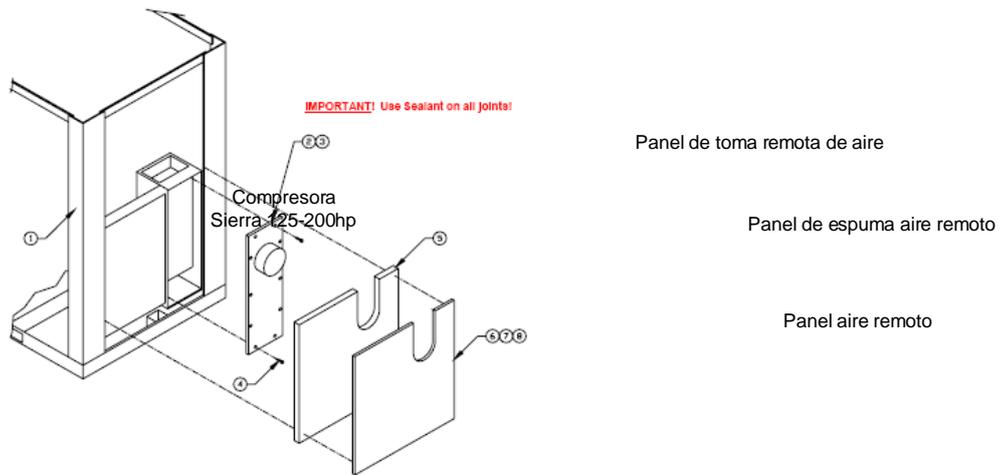


Figura 4.3: Esquema de la toma remota de aire de la compresora Sierra 150 hp .

Fuente: Pure Air Chemical Filtration System for Rotary & Recip, Ingersoll-Rand, 2001.

Compresora, tanque y secador:

La figura 4.4 muestra el esquema de instalación típica de los equipos de Ingersoll-Rand:

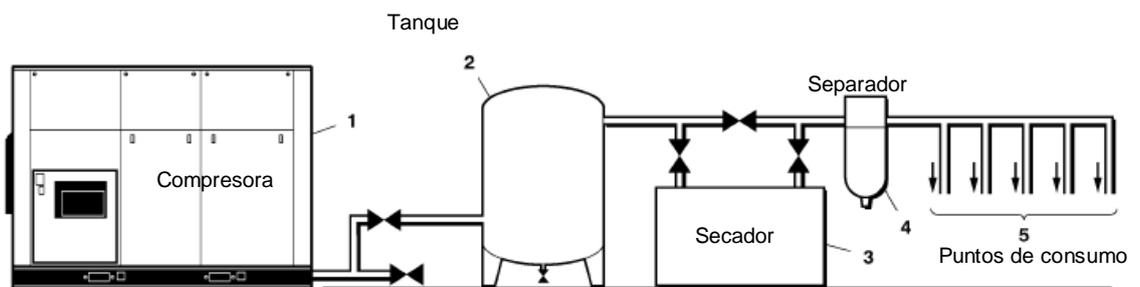
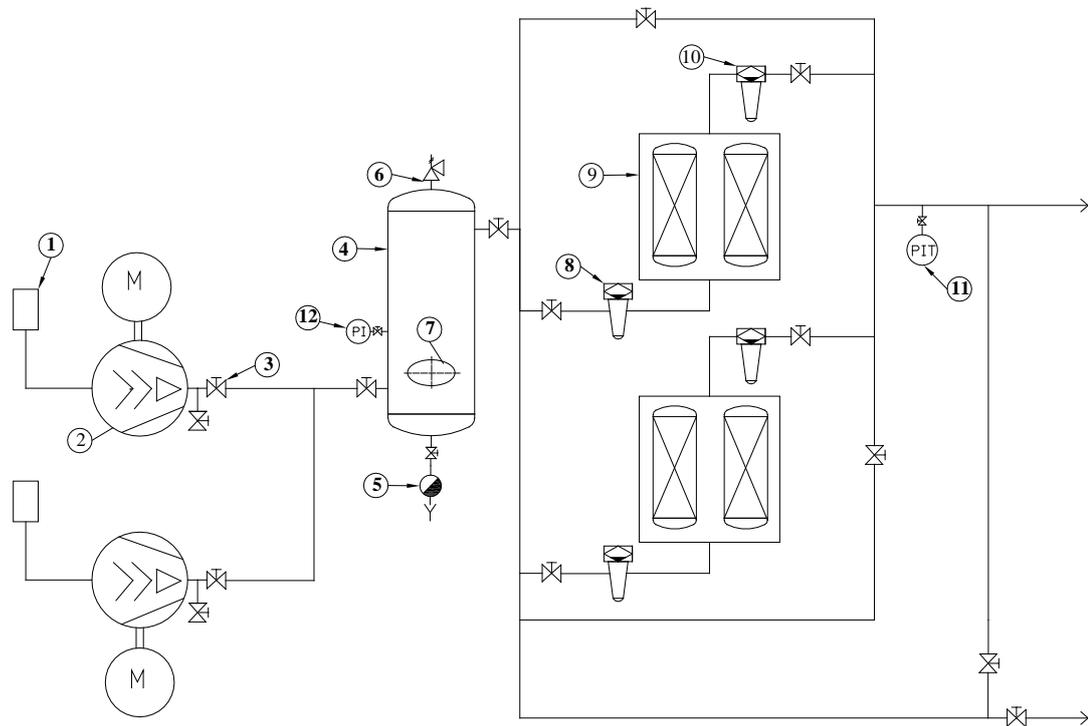


Figura 4.4: Esquema de Instalación típica de equipos de Ingersoll-Rand.

Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento Sierra, Ingersoll-Rand, 2004.

Las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se toman en cuenta para realizar el diagrama de flujo del sistema de aire comprimido de la figura 4.5, así como para el diseño de planta:



LEYENDA

- ① FILTRO QUIMICO
- ② COMPRESOR DE TORNILLO
- ③ VALVULA DE BLOQUEO
- ④ TANQUE RECEPTOR
- ⑤ DRENADOR AUTOMATICO
- ⑥ VALVULA DE SEGURIDAD
- ⑦ COMPUERTA PARA MANTENIMIENTO
- ⑧ PREFILTRO
- ⑨ SECADOR
- ⑩ POSTFILTRRO
- ⑪ TRANSMISOR DE PRESION
- ⑫ MANOMETRO

Figura 4.5: Diagrama de flujo del sistema de aire comprimido.

Fuente: Elaboración propia a partir de las figuras 4.1-4.4.

El diagrama de flujo de la figura 4.5 permite que cualquier compresor funcione con cualquier secador, pero en condiciones normales, cada compresor funcionará con su respectivo secador. Los secadores cuentan con válvulas de bloqueo y de válvula de by pass, para sacarlos fuera de servicio en su mantenimiento.

El aire comprimido del sistema es secado a una presión de punto de rocío de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo tanto, no es necesario instalar las tuberías con pendiente, pues la ausencia de humedad en el aire comprimido hace que no llegue agua a los instrumentos de control.

Se instala una válvula entre la compresora y la válvula de bloqueo que aísla la compresora con el sistema con el fin de despresurizar dicho tramo en caso de mantenimiento de la compresora.

Al instalar los demisters del filtro químico, el prefiltro y el post filtro se debe tomar en cuenta el sentido del flujo indicado con una flecha.

Se instala en la toma inferior del tanque receptor una válvula solenoide automática para drenar el condensado. Para proteger a los equipos del medio externo corrosivo, salino y brindarles un ambiente limpio y seco, los equipos se instalarán en el interior del edificio de turbinas 1^{er} piso

Como resultado de estas recomendaciones y a partir del plano Planta Arreglo General N° ILO1-OA-U99-GA-351, se elabora el esquema de ubicación de los equipos que se muestra en la figura 4.6:

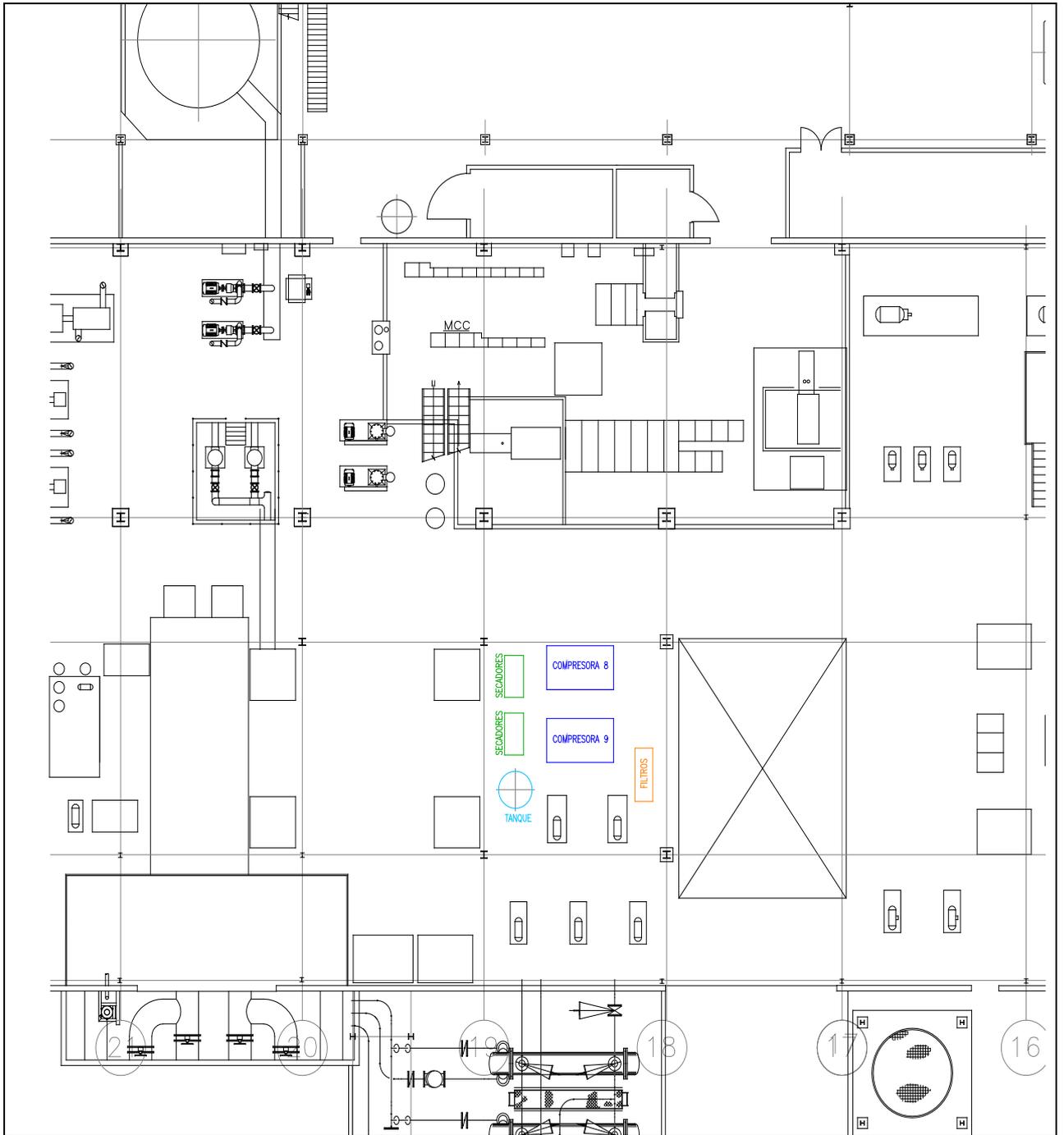


Figura 4.6: Esquema de ubicación de los equipos.

Fuente: Elaboración propia a partir de las figuras 4.1-4.5 y del Plano Planta Arreglo

General N° ILO1-OA-U99-GA-351.

4.2 CIMENTACIÓN

Con el esquema de ubicación de los equipos y tomando en cuenta sus dimensiones externas y que las compresoras tipo tornillo no requieren fundaciones ni anclajes especiales, sólo capacidad portante del piso y nivelación se elabora el plano para las fundaciones y obras civiles de los equipos ver Plano N° ILO1-OA-QE-CV-642 Cimentación – Detalles.

Se diseña un sistema de drenaje con tuberías de poli-cloruro de vinilo clorado (CPVC) para drenar el condensado de las trampas de las compresoras, de la válvula de purga automática del tanque y de los prefiltros coalescentes del secador, ver Plano N° ILO1-OA-QE-PL-668: Drenajes – Detalles

Las cargas empleadas para el diseño civil son debidas al peso propio ó efecto de la aceleración de la gravedad y a la carga por efectos sísmicos, todo el cálculo civil fue realizado por un ingeniero civil conforme al Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) tanto de diseño en concreto armado Norma E.060 y en Diseño Sismorresistente Norma E.030. El cuadro 4.1 muestra las variables para calcular la fuerza sísmica (V).

Cuadro 4.1: Variables para el cálculo de la fuerza sísmica.

VARIABLE	VALOR
Z: Factor de zona	0,4
U: Factor de uso e importancia	1,5
C: Coeficiente sísmico	2,5
S: factor de suelo	1,2
R: Coeficiente de reducción	9,5
W: Peso del equipo (kg)	

Fuente: Elaboración propia según la Norma E.030: Diseño Sismorresistente

La tabla 4.1 muestra el peso de cada equipo según fabricante y el valor de la fuerza sísmica (V) que es la fuerza cortante total de la estructura.

Tabla 4.1: Cálculo de la fuerza sísmica según Norma E.030: Diseño Sismorresistente.

Equipo	Peso W (kg)	Fuerza Sísmica $V = (ZUCS/R) W$ (kg)
Compresora	3 420	648
Secador	975	185
Tanque	1 300	247

Fuente: Elaboración propia a partir de Manuales de Equipos y Norma E.030

A partir del diagrama de fuerzas de la figura 4.7, se elabora la tabla 4.2 que muestra las dimensiones externas, el peso (W), la fuerza cortante sísmica (V) de la compresora, secador y tanque, y la reacción que ejerce el suelo sobre el equipo (R1),

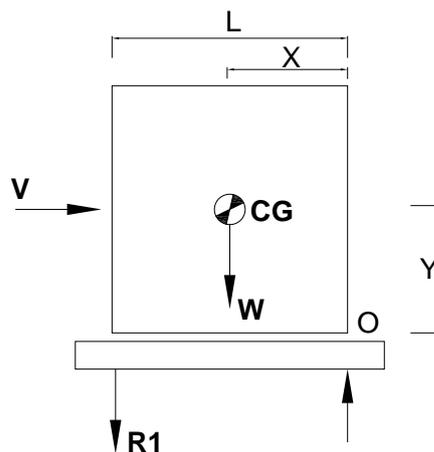


Figura 4.7: Diagrama de fuerzas de los equipos.

Fuente: Elaboración propia a partir de diagrama de fuerzas.

Tabla 4.2: Cálculo de las reacciones (R1).

	Compresora	Secador	Tanque
L: Distancia total (m)	1,6	0,74	1,35
X : Distancia de W al punto "O" (m)	0,8	0,37	0,68
Y: Distancia de V al punto "O" (m)	0,96	1,32	2,1
W: Peso de los equipos (Ton)	3,42	0,98	1,2
V: Fuerza Cortante sísmica (Ton)	0,65	0,19	0,25
R1: Reacción en un extremo (Ton)	1,32	0,16	0,27

Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Cálculo del diámetro de los pernos de anclaje

La resistencia de diseño en tracción o corte, por el método de factores de carga y resistencia ó Load and Resistance Factor Design (LRFD) que es un método de la rotura similar a la Norma Peruana de acero E.090 de un perno de alta resistencia o de un elemento roscado será $\Phi F_n A_b$ con los valores indicados en la tabla 10.3.2.1 del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), para pernos ASTM A325 cuando los hilos no están excluidos de los planos de corte se tiene:

Resistencia en tracción: $\sigma_t = 6\ 200\ \text{kg/cm}^2$

Resistencia en corte: $\sigma_c = 3\ 300\ \text{kg/cm}^2$

Factor de resistencia: $\Phi = 0,75$

La tabla 4.3 muestra los valores de los esfuerzos permisibles por tracción y por corte para los pernos de anclaje de 3/8 in y 1/2 in de diámetro.

Tabla 4.3: Esfuerzos permisibles por tracción y por corte.

Diámetro del perno (in)	3/8"	1/2"
Área del perno (cm ²)	0,71	1,27
Resistencia por tracción		
$P_{t\text{admisible}}=0,75 \times \sigma_t \times \text{Área del perno (kg)}$	3 302	5 906
Resistencia por corte		
$P_{c\text{admisible}}=0,75 \times \sigma_c \times \text{Área del perno (kg)}$	1 757	3 143

Fuente: Elaboración propia

Para las compresoras y secadores la fuerza de tracción actuante en cada extremo se distribuye para dos apoyos, sin embargo, en el tanque la fuerza de tracción se distribuye en tres apoyos pero por seguridad en el tanque se considera en un sólo apoyo.

Para todos los equipos la fuerza cortante actuante se distribuye en los cuatro apoyos, la tabla 4.4 muestra las fuerzas por tracción y por corte actuantes en los equipos:

Tabla 4.4: Cálculo de fuerza por tracción y por corte actuante.

Fuerza Actuante	Compresora	Secador	Tanque
Fuerza por tracción actuante (kg)	-661	-79	-267
Fuerza por Corte actuante (kg)	162	46,2	61,6

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se observa que en todos los equipos se cumple:

$$P_{t\text{admisible}} > \text{Fuerza de tracción actuante}$$

$$P_{c\text{admisible}} > \text{Fuerza de corte actuante}$$

Entonces el diámetro de los pernos de anclaje es suficiente 3/8 in, sin embargo se usa pernos de anclaje de 3/4 in de diámetro, por razones de estética y obviamente el factor de seguridad aumenta.

4.2.2 Cálculo de la fundación de concreto

El valor exacto de la capacidad o esfuerzo portante del suelo representado por "G" para soportar la carga combinada que es la suma de la carga muerta más la carga viva nos da un estudio de suelos, donde G toma los siguientes valores:

$G > 2 \text{ kg/cm}^2$: suelo rocoso de gran capacidad portante.

$G < 2 \text{ kg/cm}^2$: suelo flexible y de pobre capacidad portante, para aumentar su capacidad portante se debe de reforzar con pilotes, plateas y vigas de cimentación.

$G = 2 \text{ kg/cm}^2$: Suelo intermedio entre flexible y rocoso.

En la tabla 4.5 muestra la capacidad portante del suelo y el esfuerzo actuante, donde se considera un valor conservador ó intermedio para la capacidad portante ($G = 2 \text{ kg/cm}^2$):

Tabla 4.5: Esfuerzo actuante sobre el piso y medidas de la fundación de concreto.

EQUIPO	Compresora	Secador	Tanque
G: Esfuerzo del suelo (kg/cm ²)	2	2	2
W/G: Área de la base tentativa (cm ²)	4 145	1 490	3 000
Medidas nuevas de la base:			
L : Longitud (cm)	320	163	144
B : Ancho (cm)	209	85	144
An: Area nueva (cm ²)	66 657	13 798	20 736
I: Momento de Inercia (cm ⁴)	241,48 x10 ⁶	8,25 x 10 ⁶	35,83 x10 ⁶
V: Distancia del eje neutro al borde (cm)	104	42	72
Ga: Esfuerzo Actuante $G_a=W/A+(Mv/I)$ (kg/cm ²)	0,13	0,22	0,29
Factor de carga muerta y carga viva (ver NTE E0.20 Cargas)	1,65	1,65	1,65
Esf. Actuante con factor $G_a=W/A+(Mv/I)$ (kg/cm ²)	0,21	0,36	0,49

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 4.5 se aprecia el esfuerzo del terreno ($G = 2 \text{ kg/cm}^2$) es mucho mayor que el esfuerzo actuante (G_a), con $G \gg G_a$ comprobamos la capacidad portante del terreno, entonces, no es necesario aumentar la capacidad portante del suelo. El factor de carga considerado está de acuerdo a la Norma Técnica de Edificación E0.20 Cargas.

La tabla 4.6 muestra la verificación de la fundación debido a los esfuerzos por corte y por flexión:

Tabla 4.6: Verificación de la fundación debido a los esfuerzos por corte y por flexión.

EQUIPOS	COMPRESORA		SECADOR		TANQUE	
Verificación por corte						
h : Altura de la fundación (cm)	75		30		30	
f'c : Resistencia del concreto (kg/cm ²)	210					
Corte admisible Vu=0.53 * (f'c ^{1/2})*L*(h-5) (kg)	171 880		31 279		27 650	
Corte actuante Vua=Ga*L*(B/2) /0.85 (kg)	8 088		2 944		5 920	
Verificación por flexión						
Momento actuante MUa=Ga*L*(B/2)*(B/2)/2 (kgcm)	358 362		52 981		181 154	
Momento actuante (Ton-m)	3,58		0,53		1,81	
Área del fierro: Cuantía Mínima de acero: 0.0018*100*d (cm ²)	13,5		5,4		5,4	
Cálculo del Momento Resistente(MU):						
d: Peralte = h-5 (cm)	70		25		25	
b: Ancho (cm)	320		144		163	
fc: Resistencia del concreto (Kg/cm ²)	210		210		210	
AS: Área del acero (cm ²)	13,5		5,4		5,4	
fy: Resistencia del acero (Kg/cm ²)	4 200					
MU: Momento = 0.9xAsxfyx(d-(Asxfy)/(0.85xfcxb))/2 (ton-m)	35,47		5,01		5,02	
Cálculo del espaciamiento:						
Diámetros de la varillas	3/8" (#3)	1/2" (#4)	3/8" (#3)	1/2" (# 4)	3/8" (#3)	1/2" (#4)
Área de la varilla (cm ²)	0,71	1,27	0,71	1,27	0,71	1,27
s = bxÁrea varilla/AS (cm)	16,8	30,1	21,4	38,3	18,9	33,9

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 4.6 se aprecia que la fuerza de corte admisible es mayor que la fuerza de corte actuante ($V_u > V_{ua}$) por lo tanto, se verifica que la altura de la fundación es correcta y se usará el método de cuantía mínima debido que el momento resistente es mayor que el momento actuante ($M_u > M_{ua}$); y como espaciamiento se usará varilla de fierro de construcción de $\frac{1}{2}$ in de diámetro ó # 4 cada 20 cm .

4.3 MONTAJE ELECTROMECAÁNICO

4.3.1 Montaje Mecánico

Para el diseño de un sistema de aire comprimido confiable y económico se debe tener en cuenta dos puntos:

1. ***Una baja caída de presión entre el compresor y el punto de consumo.***- se debe de calcular la máxima longitud permitida de la tubería de impulsión para tener una caída de presión permisible, esta máxima longitud permitida puede ser calculada utilizando la siguiente relación empírica:

$$l = \frac{\Delta p \times d^5 \times p}{450 \times Q_c^{1,85}} \text{ m} \quad [4.1]$$

La fórmula [4.1] es recomendada en el libro de instrucciones para compresores estacionarios ZT18-90 y ZR45-90 con regulador Elektronikon, Atlas Copco Oil-Free Air Division, Belgium.

Donde:

l : Longitud total de la tubería de impulsión (m)

Δp : Caída de presión máxima permisible, Atlas Copco recomienda 0,1 bar

d : Diámetro interior de la tubería de impulsión (mm)

p : Presión absoluta en la salida del compresor (bar)

Q_c : Suministro de aire libre del compresor (l/s)

Se considera:

$\Delta p =$ 0,1 bar (caída de presión máxima permisible)

$p =$ 8 bar (presión absoluta en la salida del compresor)

$Q_c =$ 326,1 L/s (suministro de aire de la compresora 691 sfcms)

Se aplica la fórmula [4.1] y se calcula la longitud total de la tubería de impulsión para diferentes diámetros de tubería como se muestra en la tabla 4.7:

Tabla 4.7: Longitud de la tubería de impulsión para distintos diámetros de tuberías.

Diámetro (mm)	Diámetro (in)	Longitud máxima de impulsión (m)
50	2	12,5
80	3	131
100	4	399
150	6	3 026

Fuente: Elaboración propia a partir de la fórmula [4.1]

En el presente caso la longitud equivalente total de las tuberías y accesorios es 71 m y es menor a la máxima longitud de impulsión con diámetro 3 in que es 131 m, se toma en cuenta también que la salida de aire de las compresoras es de 2 in de diámetro y las conexiones del tanque, de los secadores y de los filtros son de 3 in de diámetro, se utiliza una combinación de diámetros de 2 in y 3 in, como muestra el plano N° ILO1-OA-QE-PL-629: Isométrico del sistema de aire de instrumentos.

Se verifica la caída de presión en la tubería de 10 in de diámetro de fibra de vidrio reforzada de poliéster (FRP) de aire de ingreso a la compresora desde el filtro químico; para el cual se calculó una caída de presión de 0,20 in de columna de agua, cumpliendo lo que recomienda el fabricante de tener sólo en la tubería de succión de la compresora una caída de presión máxima de 1,0 in de columna de agua (0,036 psi) en compresoras rotativas tipo tornillo, ó 20 in columna de agua (0,72 psi) en compresoras reciprocantes.

2. **Un mínimo de fugas.-** se presurizó el sistema de aire comprimido y se verifica fugas en todas las uniones roscadas mediante la prueba de agua con detergente siendo este un excelente líquido para detectar fugas, las uniones roscadas que presentaban fugas se ajustaban hasta eliminar la fuga y para las uniones soldadas se utilizó líquidos penetrantes para verificar la calidad de la unión.

4.3.1.1. Materiales y colores utilizados

El material de las tuberías utilizadas es:

1. Tubería de acero al carbono cédula 40, es el material de las tuberías de 3 in de diámetro y se utilizan para la instalación permanente y con uniones soldadas. El inconveniente de estas uniones consiste en que al soldar se producen cascarillas que deben retirarse en las tuberías con un soplado adecuado.
2. Tubería de acero galvanizado, es el material de las tuberías de 2 in de diámetro y las de menor diámetro utilizadas en las conexiones con los equipos para un fácil desmontaje, los empalmes con rosca no siempre son totalmente herméticos por ello es necesario verificar un mínimo de fugas.
3. Tubing de cobre por su facilidad para curvarse, es usado para el transmisor y manómetro de presión así como para direccionar los drenajes de las trampas de condensado de las compresoras y de la válvula de purga automática del tanque.
4. Tubería de fibra de vidrio reforzada de poliéster (FRP) usada en la tubería de succión de las compresoras por su bajo peso.

Las tuberías de aire comprimido son de color azul, las tuberías de agua de enfriamiento a las compresoras color verde y la soportería color azul de acuerdo al código de colores de CTILO1.

4.3.1.2 Sistema de agua de enfriamiento para las compresoras.

Se ubican los puntos (TIE IN #4 y 5) que son la conexión del sistema de enfriamiento para las compresoras con el sistema de enfriamiento existente.

El plano N° ILO1-OA-QE-FD-650 muestra el TIE IN #4 desde donde se suministra el agua de enfriamiento a las compresoras y el TIE IN #5 para el retorno del agua de enfriamiento al sistema y se procede a realizar el diseño del sistema de enfriamiento donde en las líneas de entrada y salida de agua de enfriamiento de las compresoras se instalaron indicadores de temperatura y de presión y un visor en la línea de retorno de agua de enfriamiento para visualizar burbujas de aire en caso que algún tubo del postenfriador presente fugas de aire comprimido.

Según el requerimiento de flujo de enfriamiento de agua es 8,6 m³/h (38 gpm), el funcionamiento adecuado del compresor exige que se provea el caudal de agua indicado a una temperatura máxima de suministro de 27 °C (80 °F). Las compresoras tienen conexiones de 2 in para el agua de enfriamiento, con la ayuda de la figura 40 se verifica que el diámetro D1 es 2 in y se calcula el diámetro D2 con la fórmula [4.2]:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V}} \quad [4.2]$$

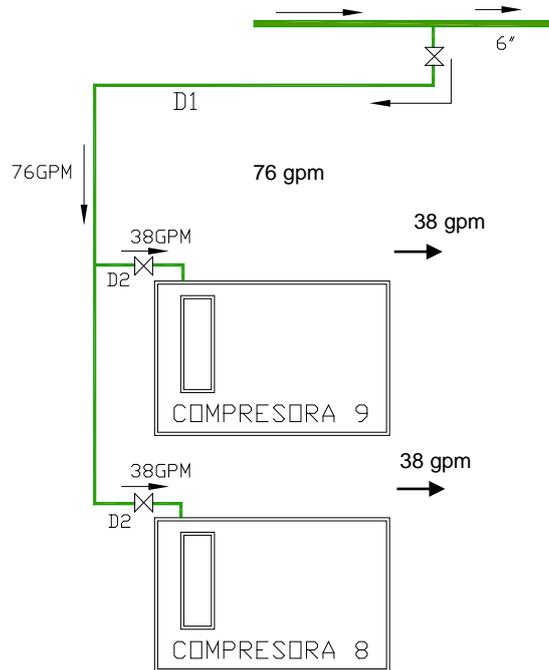


Figura 4.8: Diagrama del sistema agua de enfriamiento para las compresoras.

Fuente: Elaboración propia a partir del requerimiento de agua de enfriamiento de las compresoras.

Considerando 1,5 m/s como velocidad máxima aconsejable del agua, se tiene:

$$D1 = 65 \text{ mm} \rightarrow$$

$$\text{Diámetro comercial} = 80 \text{ mm} = 3 \text{ in}$$

$$D2 = 45 \text{ mm} \rightarrow$$

$$\text{Diámetro comercial} = 50 \text{ mm} = 2 \text{ in}$$

Calculando la velocidad máxima aconsejable del agua; considerando los diámetros comerciales:

$$V = \frac{4Q}{\pi \cdot D^2} \rightarrow V1 = 1,08 \text{ m/s} < 1,5 \text{ m/s} , V2 = 1,22 \text{ m/s} < 1,5 \text{ m/s}$$

Por lo tanto, se verifica el diámetro $D1 = 2$ in y $D2 = 3$ in, conocidos los diámetros de las líneas se realiza el recorrido de las líneas del sistema de agua de enfriamiento para las compresoras que muestra el plano N° ILO1-OA-QE-PL-629: Isométrico del sistema de aire de instrumentos

4.3.2 Montaje Eléctrico

La parte eléctrica del sistema de aire comprimido comprende el cálculo de la sección de los conductores que alimentarán a las nuevas compresoras, secadores y a la válvula solenoide de purga automática de condensado del tanque; el recorrido y tendido de los cables, estudios de coordinación, pruebas de dispositivos de protección, la medición de la resistencia de aislamiento de cables y motores, puesta a tierra de los equipos, así como la supervisión durante el montaje como el uso de plásticos para proteger a los equipos del polvo, delimitar con cinta la zona de trabajo, uso adecuado de equipos de protección personal, etc.

4.3.2.1. *Cálculo de la sección de los cables eléctricos*

El cálculo de la sección de los conductores eléctricos se realiza por los conceptos de máxima caída de tensión y de intensidad máxima admisible, se utilizó el software de Cepermatic para Windows que selecciona el tipo de conductor más conveniente según requerimientos de corriente y caída de tensión, y toma en cuenta la pérdida de energía en los propios conductores minimizando el gasto de energía que se convierte en calor.

El plano N° ILO1-OA-QE-EC-653 muestra el recorrido de los cables de fuerza donde se aprecia que la mayor longitud del conductor de fuerza se

tiende sobre bandejas aéreas y también se tiende en tubos conduits, la instalación es fija en baja tensión 460 V, trifásica, el consumo de corriente del paquete de la compresora es 193 Amperios según manual, la mayor longitud es de 100 m para la compresora # 9 que se alimenta desde el MCC-3. Se ejecuta con los datos solicitados por el software que da una serie de conductores como posibles soluciones de las cuales se elige la solución 5: conductor NYY Unipolar 0,6 / 1 kV 1 x 95 mm², como se muestra en la figura 4.9:

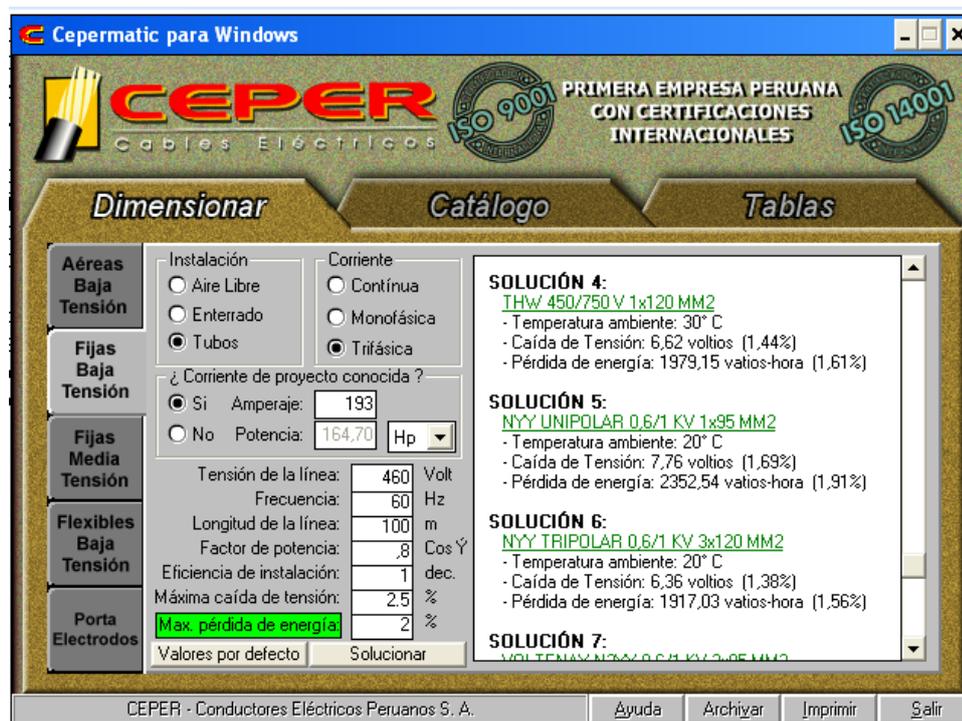


Figura 4.9: Cálculo del conductor de fuerza de las compresoras mediante el software Cepermatic para Windows.

Fuente: Software de Cepermatic

La figura 4.9 muestra la caída de tensión (menor de 5 %) y la pérdida de energía de 1,91% para la compresora N° 9, para la compresora N° 8, los valores serán menores porque la longitud del cable es menor (30 m).

Los secadores tienen requerimiento eléctrico de 120 V, 2 hp y monofásico, en cambio la válvula solenoide (drenaje automático del tanque receptor) requiere 220 V y monofásico. Se calcula el calibre del conductor con el software considerando la distancia más alejada que es del secador N° 1, y se elige la solución 3: Conductor THW 600 V, calibre 1 x 4 AWG.



Figura 4.10: Cálculo del conductor de fuerza de los secadores y válvula solenoide mediante el software Cepermetic para Windows.

Fuente: software de Cepermatic

4.3.2.2 Estudios de coordinación y pruebas de dispositivos de protección

El objetivo del estudio de protecciones es determinar los ajustes de los dispositivos de protección correspondiente a las compresoras, y verificar la correcta coordinación con los dispositivos de protección ubicados “aguas arriba”. El motor de las compresoras tiene un arranque tipo “estrella-triángulo” que reduce la corriente de arranque aproximadamente en 1/3 comparado con un arranque directo.

El objetivo de las pruebas de los dispositivos de protección es verificar el correcto funcionamiento de los dispositivos de protección mediante la inyección de corriente por el lado primario. Durante las pruebas se verificará los tiempos de actuación para diferentes valores de corriente y estos resultados serán comparados con sus respectivas curvas de fabricante.

Los estudios de coordinaciones de protección y protocolo de pruebas de los dispositivos de protección se adjuntan en el anexo D.

4.3.2.3 Medición de la resistencia de aislamiento de cables y motores

Se realiza la medición de la resistencia de aislamiento de los devanados de los motores de las compresoras y de los cables de fuerza así como de los paneles de control de los motores, los resultados de las mediciones se adjuntan en el anexo D: Protocolo de pruebas eléctricas.

El aterramiento de las compresoras, secadores, tanque y filtro químico se realiza a través de la malla existente de CTILO1. Las figuras 4.11 y 4.12 muestran fotografías durante el montaje electromecánico de los equipos:



Figura 4.11: Montaje Electromecánico de los equipos



Figura 4.12: Montaje Electromecánico de los equipos

Fuente: CTILO1, Enersur, 2007

En las figuras 4.12 y 4.13 se muestra la zona de trabajo demarcada con cinta de seguridad y los equipos protegidos contra el polvo con plástico.

La figura 4.14 muestra los equipos en operación:



Figura 4.14: Fotografía del sistema de aire comprimido en operación.

Fuente: CTILO1, Enersur, 2008.

La figura 4.14 muestra las compresoras tipo tornillo libre de aceite modelo Sierra H150W, los secadores modelo TZ820 con sus respectivos prefiltros y postfiltros y al ingreso de aire de las compresoras los filtros químicos en operación.

Concluido el montaje electromecánico del sistema de aire comprimido se realiza el comisionado y puesta en marcha de los equipos, ver anexo D.

CAPÍTULO 5

COSTOS DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

La inversión del sistema de aire comprimido contabiliza todos los costos en que se incurrió para llevar a cabo la implementación del mismo. El cuadro 5.1 muestra los costos de inversión inicial del sistema de aire comprimido para instrumentos de control:

Cuadro 5.1: Costos de inversión inicial del sistema de aire comprimido.

It.	DESCRIPCIÓN	*Unid	Cant	Costo USD
	EQUIPOS PRINCIPALES			231 854,63
1	Compresora tipo tornillo Sierra H150W	Gb	2	169 799,12
2	Secador de adsorción regenerativo TZ820	Gb	2	29 517,84
3	Filtro químico a la admisión CFS 1100-DP	Gb	2	23 707,96
4	Tanque receptor de 5 m ³	Gb	1	8 829,71
	MATERIALES			40 239,93
	MATERIALES ELÉCTRICOS E INSTRUMENTACIÓN			26 876,41
5	Transmisor de flujo Vortex Prowirl 72F40	Ea	4	11 660,00
6	Analog Input Module IMFEC11 ABB	Gb	1	1 400,00
7	Transmisor de presión 0 – 150 psig Cerabar S PMC71	Ea	1	825,00
8	Termómetro bimetalico ángulo variable 0-120 °C	Ea	4	328,00
9	Analog Input Termination Module	Gb	1	325,00
10	Manómetro de caja fenólica, 0 – 100 psig, Dial 4 in	Ea	4	290,00
11	Cable I/O Termination Unit NKTU01-25 ABB	Ea	1	245,00
12	Termopozo para termómetro	Ea	4	100,00
13	Field Termination Panel Mount two	Ea	1	37,00
14	Interruptores para compresoras 150 hp	Ea	2	5 996,00
15	Cable de fuerza 1 x 95 mm ² NYY, Negro 1 kV	m	300	4 077,66

It.	DESCRIPCIÓN	*Unid	Cant	Costo USD
16	Interruptor termomagnético 16 A	Ea	4	600,00
17	Cable de control con pantalla de platina y línea a tierra 2 x 16 AWG	ft	1000	494,10
18	Tubos conduit galvanizados ¾ in	Ea	10	147,20
19	Tablero de distribución	Gb	1	130,00
20	Cable THW 10 AWG Color negro	m	100	117,89
21	Otros	Gb	1	103,56
	MATERIALES MECÁNICOS			13 363,52
22	Brida de acero al carbono de 11/2", slip on, clase 150 ASTM A105	Ea	6	12,72
23	Brida de acero al carbono de 3", slip on, Clase 150 ASTM A105	Ea	18	107,64
24	Codo de acero al carbono 3", BW, SCH 40	Ea	30	91,80
25	Tubo acero al carbono 1½ in., ASTM A53	Ea	4	136,72
26	Tubo acero al carbono 2 in, ASTM A5	Ea	11	429,00
27	Tubo acero al carbono 3 in, ASTM A53	Ea	18	1 656,00
28	Codo de fierro galvanizado ½ in	Ea	4	0,64
29	Codo de fierro galvanizado 2 in roscado	Ea	31	44,02
30	Reducción bushing de fierro galvanizada de 2 in x ½ in	Ea	11	10,45
31	Reducción bushing de fierro galvanizada de 2 in x 1½ in	Ea	2	1,98
32	Reducción de acero al carbono de 2 in x 1½ in, BW, std	Ea	6	6,36
33	Reducción de acero al carbono de 3 in x 2 in, BW, std	Ea	17	44,37
34	Tee de acero al carbono 3 in, BW, std	Ea	10	63,60
35	Tee de fierro galvanizado 2 in roscado std	Ea	24	37,68
36	Unión simple de acero al carbono ½ in, roscada, std	Ea	2	0,30
37	Válvula de compuerta de 2 in, bronce, roscada, clase 150	Ea	28	1 456,00
38	Unión universal de fierro galvanizado de 2 in, roscada, std	Ea	23	65,78
39	válvula de compuerta de ½ in, bronce, roscada, clase 150	Ea	12	90,24
40	Válvula compuerta acero de 3 in, bridada, clase 150, ASTM A216	Ea	6	1 367,58
41	Tubo de fierro galvanizado de ½ in, std	Ea	1	7,95
42	Tubo de fierro galvanizado de 2 in, std	Ea	10	375,00
43	Visor de flujo para agua de 2 in, bronce, clase 150 unión roscada	Ea	2	940,00
44	Válvula mariposa 6 in, disco Inox SS316, , clase 150, caja reductora	Ea	2	1 124,50
45	Brida de acero Ø6" ASTM A105, Weld neck	Ea	4	114,32

It.	DESCRIPCIÓN	*Unid	Cant	Costo USD
46	Perno Hex acero Grado 8 Ø ¾ in x 6 ½ in	Ea	16	12,96
47	Tuercas Hex RC ASTM A194 grado 2H Ø 3/4 in	Ea	16	13,12
48	Válvula de compuerta de ½ in bronce, roscada, clase 150	Ea	1	9,93
49	Sellador de junta de tuberías Tape Teflón de 1/2"	Ea	30	53,55
50	Formador de empaquetadura	Ea	10	100,00
51	Válvula de globo de 2 in de bronce roscada, clase 150	Ea	2	163,56
52	Pinturas, disolventes y Otros	Gb	1	5 293,19
	SERVICIO DE MONTAJE E INSTALACIÓN			23 170,28
53	Montaje civil y electromecánico	Gb	1	23 170,28
	TOTAL INVERSIÓN USD			295 264,84

* Siglas en inglés.

Fuente: Elaborado a partir del software SAP.

El cuadro 5.2 muestra en resumen los costos del nuevo sistema de aire comprimido para instrumentos de control:

Cuadro 5.2: Resumen de costos en USD y % de la inversión inicial.

Descripción	Costo USD	% de la inversión inicial
Equipos principales	231 854,63	78,5
Materiales eléctricos e instrumentación y mecánicos	40 239,93	13,6
Servicio de montaje e instalación	23 170,28	7,8
COSTO TOTAL USD	295 264,84	

Fuente: Elaboración propia a partir del cuadro 12.

Financiamiento de la inversión

La inversión inicial del sistema de aire comprimido realizado es de 295, 264.84 USD, y se compone con financiamiento propio de 70% de la inversión inicial y un financiamiento externo (préstamo a institución bancaria) de un 30% de la inversión inicial.

El financiamiento del 30% de la inversión inicial fue a través de la institución bancaria (Banco de Crédito del Perú) el monto es \$88 579,5 US en un periodo de 10 años a una tasa de interés de 18% tasa efectiva anual (TEA), se realizó el análisis financiero utilizando el método de valor presente y se aplicó la fórmula [6.1]:

$$R = VP \left(\frac{(1+i)^n i}{(1+i)^n - 1} \right) \quad [6.1]$$

Donde:

VP: Valor Presente

R: Renta o Anualidad

i: Tasa de interés 18% tasa efectiva anual

n: Vida útil del proyecto en años

El cuadro 5.3 muestra el flujo de amortización o devolución del préstamo:

Cuadro 5.3: Flujo de amortización.

FLUJOS DE AMORTIZACION O DEVOLUCCION				
AÑOS	AMORTIZACIONES USD	INTERES (i) USD	ANUALIDAD (R) USD	SALDO USD
2007	-----	-----	-----	88 579,52
2008	3 765,91	15 944,31	19 710,23	84 813,61
2009	4 443,78	15 266,45	19 710,23	80 369,83
2010	5 243,66	14 466,57	19 710,23	75 126,18
2011	6 187,51	13 522,71	19 710,23	68 938,67
2012	7 301,27	12 408,96	19 710,23	61 637,40
2013	8 615,49	11 094,73	19 710,23	53 021,91
2014	10 166,28	9 543,94	19 710,23	42 855,63
2015	11 996,21	7 714,01	19 710,23	30 859,41
2016	14 155,53	5 554,69	19 710,23	16 703,88
2017	16 703,53	3 006,70	19 710,23	0,34

Fuente: Elaboración propia a partir de la fórmula [6.1]

El cuadro 5.3 muestra el flujo de caja 2008-2017 en donde por el contrato de suministro de aire comprimido para instrumentos de control de proceso vigente hasta el 2017 se tiene un ingreso fijo anual de 36 000 USD; los gastos de producción son el costo de energía eléctrica (se considera como potencia eléctrica del paquete Ingersoll-Rand 115kW, costo de energía 7 USD/(MW·h) que es costo variable de generación de TG1 de EgeChilca y funcionamiento anual 8 760hrs) más el costo de mantenimiento anual (10 901 USD); los gastos de ingresos se considera el 1% del ingreso anual; y los gastos financieros que es la anualidad del cuadro 5.4:

Cuadro 5.4: Flujo de caja (2008 - 2017) en condiciones actuales.

RUBROS	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
I.- INGRESOS										
I,1, Ingresos	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000
TOTAL INGRESOS	36 000									
II.- GASTOS										
II.1. G. producción	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953
II,2, G. Ingresos	-360	-360	-360	-360	-360	-360	-360	-360	-360	-360
II,3, G. Financieros	-19	-19	19	-19	19	-19	19	-19	19	-19
	710,2	710,2	710,2	710,2	710,2	710,2	710,2	710,2	710,2	710,2
TOTAL DE GASTOS	-38 023									
UTILIDAD NETA	-2 023									

Fuente: Elaboración propia

El cuadro 5.4 muestra que la utilidad neta es negativa, por lo tanto, el negocio de suministro de aire comprimido para instrumentos de control de proceso no es rentable en estas condiciones, siendo un servicio indispensable para la operación de la fundición de SPC y de la propia central térmica, está perdida se ve

compensada con los ingresos de otros suministros (agua potable, agua de alimentación, vapor de atomización, etc.) y de energía eléctrica.

Se calcula el valor actual neto (VAN) con una tasa de descuento de 10% y se aplicó la fórmula [6.2]:

$$VAN = -A + \left[\frac{C_1 - P_1}{(1+k)} + \frac{C_2 - P_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{C_n - P_n}{(1+k)^n} \right] \quad [6.2]$$

donde:

A = Inversión inicial

C_i = Total de los gastos previstos en el periodo i.

P_i = Total de los ingresos previstos en el periodo i.

K = Tasa de descuento del costo de oportunidad.

$$VAN = -295\,264,84 + \left[\frac{-10\,299}{(1+0.1)} + \frac{-10\,299}{(1+0.1)^2} + \dots + \frac{-10\,299}{(1+0.1)^{10}} \right] USD$$

$$VAN = -295\,264,84 USD + (-12\,430,46) USD$$

$$VAN = -307\,695,3 USD$$

El valor actual neto es negativo (VAN < 0) comprobándose la utilidad neta negativa, para valores de VAN menores a cero, carece de sentido calcular la tasa interna de rentabilidad (TIR).

Por lo tanto, es necesario renegociar las condiciones para tener un VAN positivo, por ejemplo los ingresos deben ser de 100 000 USD, para estas condiciones el cuadro 14 muestra el flujo de caja.

Cuadro 5.5: Flujo de caja (2008 - 2017) en condiciones renegociadas.

RUBROS	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
I.- INGRESOS										
I,1, Ingresos	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000
TOTAL INGRESOS	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000
II.- GASTOS										
II,1, G. producción	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953	-17 953
II,2, G. Ingresos	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-800
II,3, G. Financieros	-18 771	-18 771	-18 771	-18 771	-18 771	-18 771	-18 771	-18 771	-18 771	-18 771
TOTAL DE GASTOS	-37 524	-37 524	-37 524	-37 524	-37 524	-37 524	-37 524	-37 524	-37 524	-37 524
UTILIDAD NETA	62 276	62 276	62 276	62 276	62 276	62 276	62 276	62 276	62 276	62 276

Fuente: Elaboración propia

Se calcula el valor actual neto (VAN) con una tasa de descuento de 10% y se aplica la fórmula [6.2]:

$$VAN = -295\,264,84 + \left[\frac{62\,276}{(1+0.1)} + \frac{62\,276}{(1+0.1)^2} + \dots + \frac{62\,276}{(1+0.1)^{10}} \right] USD$$

$$VAN = -295\,264,84 USD + 382\,658,2 USD$$

$$VAN = 87\,393,4 USD$$

La utilidad neta es positiva y con la tasa de descuento de 10 %, se obtiene un valor actual neto (VAN), se calcular el VAN a una mayor tasa de descuento, para calcular un VAN negativo con la finalidad de calcular la tasa interna de rentabilidad (TIR). Se calcula el VAN a una tasa de descuento de 20 % y se tiene:

$$VAN = -295\,264,84 + \frac{42\,476}{(1+0.2)} + \frac{42\,476}{(1+0.2)^2} + \dots + \frac{42\,476}{(1+0.2)^{10}} USD$$

$$VAN = -34\,175 USD$$

Se calcula la tasa interna de rentabilidad (TIR) y se aplica la fórmula [6.3]:

$$TIR = t_{VAN+} + (t_{VAN+} - t_{VAN-}) \left(\frac{VAN_-}{VAN_- + VAN_+} \right) \quad [6.3]$$

donde:

t_{VAN+} : Tasa donde el VAN es positivo

t_{VAN-} : Tasa donde el VAN es negativo

VAN_- : Valor absoluto del VAN negativo

VAN_+ : Valor absoluto del VAN positivo

$$TIR = 10\% + (10\% - 20\%) \left(\frac{34175}{34175 + 87393,4} \right)$$

$$TIR = 10\% - 10\% \times 0,28$$

$$TIR = 7,2\%$$

Por lo tanto, a estas nuevas condiciones renegociadas, el suministro de aire comprimido para instrumentos de control ya es rentable.

CONCLUSIONES

1. La selección del compresor y su equipamiento principal debe ser seleccionado lo más cercano posible a los requerimientos del servicio, debido que estos constituyen alrededor del 78,5 % del costo total del sistema de aire comprimido para instrumentos de control.
2. La supervisión minuciosa de los trabajos efectuados por terceros (obras civiles y montaje electromecánico), ha permitido que el sistema de aire comprimido para instrumentos de control se ajuste a los requerimientos y se espera larga vida de los componentes del sistema (equipos principales, tuberías, válvulas y accesorios).
3. El hecho de que el cliente, haya aumentado su consumo de aire comprimido para instrumentos de control sin apreciar disminución en la presión de suministro y que no hayan reportado quejas ni reclamos por baja presión de suministro nos indica que la consideración de incrementar el caudal solicitado por consumos futuros en 30% ha sido acertado.

RECOMENDACIONES

1. Instalar filtros químicos al ingreso de aire de las compresoras, según lo indicado para una calidad de aire clase G2: moderado, donde la corrosión puede ser un factor determinante en la fiabilidad del equipo compresor.
2. Cumplir y llevar acabo el programa de mantenimiento de los equipos según indica el fabricante, y así no tener problemas con la garantía de los equipos, ver anexo B.
3. Muestrear y analizar la calidad de agua de enfriamiento de las compresoras y el aceite de las compresoras, mensualmente.
4. Tener en stock los repuestos críticos para los equipos del sistema de aire comprimido recomendados por el fabricante con la finalidad de disminuir el tiempo de indisponibilidad de los equipos por falta de repuestos, en el anexo B se adjunta la lista de partes para stock.
5. Llevar un registro diario de lecturas de los parámetros principales del compresor: Presión de descarga del compresor, temperatura de descarga de aire de la primera etapa y de la segunda etapa, temperatura de aceite, vacío a la admisión, condición del filtro de admisión y del filtro de aceite, horas totales y horas en carga.
6. Incluir dentro de la ruta de medición de vibraciones y monitoreos periódicos a las nuevas compresoras, ver anexo C.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS CONSULTADOS:

1. Improving Compressed Air System Performance: a sourcebook for industry
Lawrence Berkeley National Laboratory, Resource Dynamics Corporation
November 2003, USA
2. Libro de instrucciones para compresores estacionarios ZT18-90 y ZR45-90
con regulador Elektronikon
Atlas Copco Oil-Free Air Division
Enero, 2006, Belgium.
3. Reciprocating Compressors: Operation y Maintenance
Heinz P. Bloch, John J. Hoefner
1996, USA.
4. Diseño de estructuras de Acero con LRFD
Theodore V. Galambos, F.J Lin, Bruce G. Johnston
Prentice Hall

MANUALES CONSULTADOS:

1. Compressed Air Manual
Atlas Copco. September 1998, Suiza. 6th Edition
2. PROline Prowirl 72 Vortex, Flow Measuring System, Operating Instructions.
Endress + Hauser . May 2003.
3. Cerabar S, PMC71, PMP71, PMP72, PMP75 (BA), Pressure transmitter.
Endress + Hauser. December 2004
4. Especificaciones para el diseño y fabricación de recipientes a presión parte 1.
Carlos A. Villanueva. 2006, Argentina.
5. Filters for Compressed Air and Gases. Ingersoll-Rand Company. 2000, UK.
6. Pure Air Chemical Filtration System for Rotary & Recip. Ingersoll-Rand
Company. 2001.
7. Heaterless Desiccant Adsorbent Compressed Air Dryer Models TZ730 to
TZ1710. Ingersoll-Rand Company. September 2005, USA.
8. Sierra: Manual de manejo y mantenimiento. Ingersoll-Rand Company.
January 2004.
9. Sierra 37- 300 kW (50 – 400 hp), Ingersoll-Rand, 2000, UK.

GUÍAS Y CATALOGOS CONSULTADOS

1. Guía sobre la calidad del aire
Ingersoll-Rand Company
2004, Reyno Unido.

2. Guías prácticas para ahorrar energía en los sistemas de aire comprimido
Comisión Nacional para el Ahorro de Energía
2006, México

3. ThermoZorb Heatless Regenerative Air Dryer
Ingersoll-Rand Company
2004, USA

4. Soluciones en aire comprimido
Ingersoll-Rand Company
2003, España.

5. Secadores desecantes regenerativos
Kaeser Compressors
Marzo, 2005

6. High quality compressed air: A guide to the ISO 8573 series compressed air
quality standard.
Parker Hannifin
2007, England

CODIGOS Y NORMAS CONSULTADAS:

1. American Society of Mechanical Engineers (ASME) : Section VIII Division 1
"Pressure Vessels" 2001
2. International Organization for Standardization (ISO) : Norma ISO 8573.1
3. Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), 2006.
4. Norma E.020: Cargas.
5. Norma E.030: Diseño Sismoresistente.
6. Norma E.060: Concreto Armado.
7. Steel Structures Painting Council (SSPC-SP)
8. Norma Técnica Peruana: NTP 399.012
9. Norma Técnica Peruana: NTP 399.009
10. American Petroleum Institute (API): API Standard 619 Rotary type positive displacement compressors for petroleum, chemical and Gas Industry Services, Third Edition, June 1997: Pag.13 y 14.

REVISTAS CONSULTADAS

1. Soluciones Personalizadas de Aire Comprimido
Kaeser Kompressoren Gmbh
Febrero 2007, Alemania