



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

### **Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

**“REDISEÑO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO EN  
UNA FÁBRICA DE PANELES Y PERFILES METÁLICOS,  
UTILIZANDO TUBERÍAS DE ALUMINIO”**

### **TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

### **INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Hernan Alberto Manzo Pin

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

Año: 2013

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, a mi director de tesis el Ing. Ernesto Martínez L. y al Ing. Gonzalo Zabala que colaboraron de una u otra forma para la realización de este trabajo, y especialmente a mis padres por darme la oportunidad de poder estudiar.

## DEDICATORIA

ESTE TRABAJO  
REALIZADO CON  
ESFUERZO POR  
VARIOS MESES, ESTÁ  
DEDICADO A MI HIJO,  
MI ESPOSA, PADRES,  
HERMANOS Y  
FAMILIARES.

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

Dr. Kleber Barcia V.  
DECANO DE LA FIMCP  
**PRESIDENTE**

---

Ing. Ernesto Martínez L.  
**DIRECTOR DE TESIS**

---

Ing. Gonzalo Zabala O.  
**VOCAL**

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

---

Hernan Alberto Manzo Pin

## RESUMEN

Este proyecto tema de estudio, nació de la necesidad de la ampliación de una planta en su infraestructura, esta empresa esta dedicada a fabricar paneles, cubiertas y perfiles metálicos de espesores delgados. En las instalaciones de la planta, el sistema de aire comprimido tienen varios años de servicio, existen equipos que presentan bastante deterioro, los cuales han prestado alrededor de dieciséis años de servicio y actualmente tienen bastante dificultad en conseguir repuestos, para sus respectivos mantenimientos.

El proyecto consistió en rediseñar el sistema de aire comprimido, debido a que en la planta se construyó un galpón de 210 metros de longitud con 25 metros de ancho, con el fin de distribuir de una manera más organizada las siguientes áreas:

- Materia Prima
- Producción
- Producto Terminado

Esto significa que la mayoría de líneas de producción fueron reubicadas y debido a esto se rediseñó un tendido en la red de aire comprimido, de tal manera que esta pueda abastecer de manera eficiente a las líneas.

En este estudio se analizó los siguientes puntos:

- Capacidad del compresor: Se analizó si la capacidad del compresor que opera en la planta está sobredimensionada o, al contrario, si su capacidad no es la adecuada para el nuevo tendido de la red de aire comprimido.
- Selección de un secador: Se seleccionó un deshumificador de aire que cubra la necesidad de la planta y reemplazar el actual secador, que se encuentra en la planta, que está fuera de servicio.
- Tanque pulmón: Se analizó si el actual tanque pulmón puede satisfacer la demanda de toda la planta.
- Tuberías: Las tuberías que existen en las instalaciones de la planta, presentan bastante deterioro, estas fueron reemplazadas por tuberías de aluminio, con un sistema de acoples rápidos.

Una vez estudiados estos puntos se realizó el análisis técnico y económico de este proyecto.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. Generalidades. ....	3
1.1 Identificación del Problema. ....	3
1.2 Objetivos Generales. ....	16
1.3 Objetivos Específicos. ....	16
1.4 Metodología. ....	17
1.5 Estructura de la tesis. ....	19

## CAPÍTULO 2

2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA FÁBRICA. ....	21
2.1 Descripción del proceso de producción de paneles y perfiles....	21
2.2 Generación de aire comprimido. ....	31
2.2.1 Compresor de tornillo. ....	31
2.2.2 Secador. ....	33
2.2.3 Tanque pulmón. ....	34
2.2.4 Filtros coalescentes y de partículas.....	36
2.3 Trayectoria de la red de aire comprimido.....	39
2.4 Análisis de la situación actual del sistema de aire comprimido.	40
2.5 Demanda del caudal de aire comprimido en la fábrica.....	41

## CAPÍTULO 3

3. CÁLCULO Y SELECCIÓN.....	47
3.1 Cálculo del diámetro de la tubería de aluminio.....	47
3.2 Selección del compresor. ....	79
3.3 Selección del secador. ....	83
3.4 Selección de la capacidad del tanque pulmón.....	86
3.5 Selección de los filtros coalescentes y de partículas.....	86

## CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	88
4.1 Análisis técnico.....	88
4.2 Análisis económico.....	98

## CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
5.1 Conclusiones.....	108
5.2 Recomendaciones.....	109

## APENDICES

## BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

Amp	Amperio
AD	Área de despacho
AP	Área de producción
AP1	Área de producción 1 - paneles
AP2	Área de producción 2 - perfiles
AV	Área vacía
Bar	Bar
°C	Grado Celsius
CFM	Pies cúbicos por minuto
°F	Grado Fahrenheit
Ft	Pie
ft2	Pie cuadrados
ft3	Pie cúbicos
Gal	Galón
H	Hora
HP	Caballo de Potencia
°K	Grado Kelvin
Kg	Kilogramo
Kw	Kilowatt
Kwh	Kilowatt hora
Lt	Litro
LCF1	línea de conformado en frío 1
LCF2	línea de conformado en frío 2
LCF3	línea de conformado en frío 3
LCF4	línea de conformado en frío 4
LCF5	línea de conformado en frío 5
LCF6	línea de conformado en frío 6
LCL	línea de corte longitudinal
LCT	línea de corte transversal
m	Metro
MP	Materia Prima
MTO	Make to Order
MTS	Make to Stock
m2	Metro cuadrado
m3	Metro Cúbico
min	Minuto
mm	Milímetro

PD-MP	Patio de descarga de materia prima
plg	Pulgada
PSI	Libra sobre pulgada cuadrada
PT	Producto Terminado
PR	Producto de reventa
S	Segundos
TM	Taller Mecánico
\$	Dólar
A.E.	Ahorro Energético

## SIMBOLOGÍA

A	Área
D	Diámetro
	Rugosidad
$f$	Factor de fricción
$H_f$	Perdida de carga
	Coefficiente de calores específicos del aire
K	
LCF1	Línea de conformado 1
LCF2	Línea de conformado 2
LCF3	Línea de conformado 3
LCF4	Línea de conformado 4
LCF5	Línea de conformado 5
LCF6	Línea de conformado 6
LCL	Línea de corte longitudinal
LCT	Línea de corte transversal
L	Longitud
$L_e$	Longitud equivalente
$L_T$	Longitud total
$\dot{m}$	Flujo másico
$M_v$	Masa de vapor
P	Presión
$P_g$	Presión de saturación
$P_v$	Presión de vapor
P	Diferencia de presión
Q	Flujo
R	Constante de gas ideal para aire
Re	Numero de Reynolds
Lt	Litro
T	Temperatura
V	Volumen
$\dot{V}$	Flujo volumétrico
$\mu$	Viscosidad dinámica
$Z_1$	Altura en el punto inicial
$Z_2$	Altura en el punto final
$\phi$	Humedad relativa
$\theta$	Diámetro
$\rho$	Densidad

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Distribución de áreas en la Planta.....	5
Figura 1.2	Almacenamiento de bobinas.....	6
Figura 1.3	Flujograma de procesos de fabricación en las líneas de conformación.....	9
Figura 1.4	Bodega de producto terminado.....	11
Figura 1.5	Nueva distribución de la Planta.....	14
Figura 2.1	Liso galvalume de 0.30 mm de espesor.....	22
Figura 2.2	Muestra de acero galvanizado estructural de 0.65 mm....	23
Figura 2.3	Lámina prepintada color rojo arcilla de 0.50mm de espesor.....	23
Figura 2.4	Desbobinador de 8 Toneladas de capacidad.....	25
Figura 2.5	Cizalla con corte al vuelo.....	25
Figura 2.6	Roll - Former.....	26
Figura 2.7	Apiladores de panel.....	27
Figura 2.8	Slitter Automático.....	29
Figura 2.9	Desbobinador de flejes.....	30
Figura 2.10	Conformación de perfiles.....	31
Figura 2.11	Compresor Atlas Copco de 40 Hp.....	32
Figura 2.12	Tanque Acumulador ubicado en el cuarto de compresores.....	35
Figura 2.13	Filtro de partículas de 5 micras.....	37
Figura 2.14	Esquema actual del tendido de la tubería.....	39
Figura 2.15	Consumos de CFM de las líneas.....	45
Figura 2.16	Demanda de CFM en la Planta.....	46
Figura 3.1	Pantalla de programa para el cálculo de diámetro de tuberías.....	48

Figura 4.1	Curva de la bañera.....	89
Figura 4.2	Tubería galvanizada de 2 pulgadas de diámetro.....	91
Figura 4.3	Tubería de aluminio de 40mm de diámetro.....	92
Figura 4.4	Esquema de la nueva trayectoria del tendido de la tubería.....	93
Figura 4.5	Detalle de pilar con la ménsula.....	95
Figura 4.6	Canaletas eléctricas.....	96
Figura 4.7	Puentes grúas en el nuevo galpón.....	97
Figura 4.8	Trincheras para el paso de acometidas y tuberías de aire comprimido.....	98
Figura 4.9	Toma de amperaje y voltaje en compresor GA30.....	99

## ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla # 1	Equipos existentes en la planta.....	4
Tabla # 2	Capacidad de producción de las líneas de fabricación ....	10
Tabla # 3	Capacidad de la Planta a tres turnos.....	12
Tabla # 4	Consumo de aire comprimido de las líneas de producción.....	42
Tabla # 5	Factor de coincidencia.....	44
Tabla # 6	Longitud equivalente de accesorios de diametro 40mm. para la tubería de aluminio.....	52
Tabla # 7	Selección de diámetro de tubería.....	57
Tabla # 8	Longitud equivalente de accesorios de diámetro 2 pulgadas. Para la tubería galvanizada.....	59
Tabla # 9	Longitud equivalente de accesorios de diámetro 1.5 pulgadas. Para la tubería galvanizada.....	64
Tabla # 10	Longitud equivalente de accesorios de diámetro 1.5 pulgadas. Para la tubería galvanizada.....	69
Tabla # 11	Longitud equivalente de accesorios de diámetro 2 pulgadas. Para la tubería galvanizada.....	74
Tabla # 12	Resumen de caída de presión.....	79
Tabla # 13	Factores para la selección del secador.....	84
Tabla # 14	Selección del secador.....	85
Tabla # 15	Datos del compresor GA30.....	100
Tabla # 16	Consumo de Energía eléctrica del Atlas Copco GA30.....	101
Tabla # 17	Datos del compresor AS30.....	102
Tabla # 18	Cotización de equipos y materiales.....	105
Tabla # 19	Cotización de instalación de tubería.....	106
Tabla # 20	Cotización de costo total del proyecto.....	107

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano A1	Apéndice C red abierta
Plano A2	Apéndice C anillo cerrado
Plano A3	Apéndice C Plano isométrico de la red anillo cerrado

## INTRODUCCIÓN

Actualmente las empresas dedicadas a la fabricación y comercialización de paneles y perfiles metálicos, buscan la manera de optimizar sus recursos, para poder ser competitivos en el mercado contra las empresas que se dedican al mismo negocio, una de las maneras de poder optimizar recurso es en el sector energético, es decir utilizar la energía necesaria para el proceso de fabricación de productos terminados o semi elaborados, de tal manera que el desperdicio sea lo más reducido posible.

El objetivo de esta tesis es el rediseño del sistema de generación de aire comprimido para la planta de fabricación de paneles, cubiertas y perfiles metálicos, en la planta se realizó una ampliación en sus instalaciones en diferentes áreas, por lo que las líneas de fabricación van a ser trasladadas y distribuidas en otros sectores de la planta y se debe de abastecer de aire comprimido a las líneas en su nueva posición dentro de la planta.

Para realizar este rediseño se analiza el equipo generador, el tratamiento de aire, el transporte (tuberías) y las líneas que consumen el aire comprimido, tanto su capacidad de generación, como las pérdidas de

presión sufridas en las tuberías y el consumo real de las líneas de fabricación.

El análisis técnico de los equipos, nos permite determinar si los equipos del sistema de aire comprimido, instalados actualmente en la planta, sus características técnicas permiten ser utilizados en el nuevo rediseño.

En el análisis económico nos indicara el costo de implementación del proyecto y el posible ahorro económico, que la empresa tema de estudio, tendría si opera con los equipos seleccionados en esta investigación.

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES

El tema de estudio de esta tesis trata sobre el rediseño del sistema de aire comprimido en una empresa que se dedica a fabricar paneles, láminas lisas, flejes y perfiles metálicos.

### 1.1 Identificación del Problema

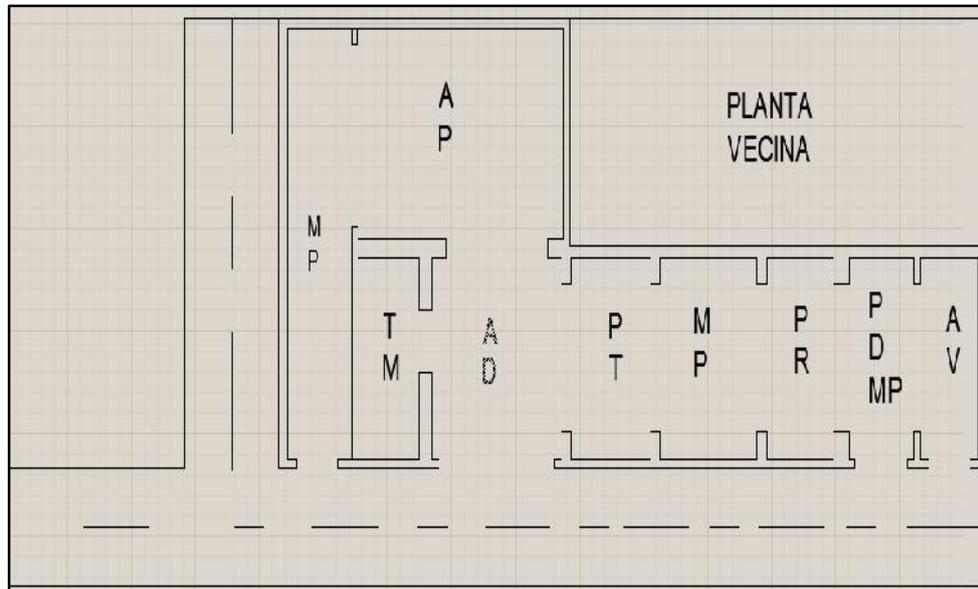
En el año del 2005 la empresa tema de estudio, adquirió las instalaciones de una planta que se dedicaba a la fabricación de paneles de fibrocemento y luego estas instalaciones se la readecuó para la fabricación de perfiles y paneles metálicos. Los equipos, accesorios del sistema de aire comprimido y equipos de carga como montacargas, fueron adquiridos en esa venta.

En la sala de compresores existen los siguientes equipos, mostrados en la Tabla #1:

**TABLA #1**  
**EQUIPOS EXISTENTES EN LA PLANTA**

<b>Cantidad</b>	<b>Equipos</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Potencia HP</b>	<b>Estado Operativo</b>
1	Compresor de tornillos	Atlas Copco	GA30	40	Bueno
1	Compresor de tornillos	Atlas Copco	GA37	50	Malo
1	Secador de aire	Atlas Copco	FD-24	-----	Malo
1	Tanque pulmón de 1 m <sup>3</sup>	-----	-----	-----	Bueno
1	Tendido de red con tuberías galvanizadas de 2plg.	-----	-----	-----	Limitado

La empresa tema de estudio utilizó estos recursos para generar y tratar el aire comprimido, para abastecer a las líneas de fabricación, la planta y su área de producción y las bodegas de MP y PT, quedaron distribuidas de la siguiente manera, tal como se muestra en la figura 1.1.



**FIG. 1.1 DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS EN LA PLANTA**

AP: Área de producción

TM: Taller Mecánico

AD: Área de despacho

PT: Producto Terminado

MP: Materia Prima

PR: Producto de Reventa

PD-MP: Patio de descarga de Materia Prima

AV: Área vacía

En la bodega de MP se almacena todas las bobinas de acero galvalume, galvanizado y el pre-pintados, las cuales se almacenan tipo pirámide, que son colocadas en la parte posterior cerca de las máquinas de producción para que el operador fácilmente pueda

tomar en el momento de fabricar algún pedido. La figura 1.2 muestra la forma de cómo se almacena la materia prima.



**FIG.1.2 ALMACENAMIENTO DE BOBINAS EN EL ÁREA DE BODEGA DE MATERIA PRIMA**

En el área de producción se encuentran las seis líneas de conformación en frío y la máquina de corte longitud y transversal.

En las líneas de conformado en frío intervienen las siguientes máquinas:

- Desbobinador
- Cizalla
- Roll - former
- Apilador de paneles

En la cual, el desbobinador, se encarga de desenrollar la lamina lisa de la bobina que es la materia prima, luego pasa por unos rodillos alisadores los cuales ponen la lamina recta y esta pasa por la cizalla, la cual es accionada para dar el corte, dependiendo de la longitud del panel que se fabricara, después cortada la lamina lisa esta es arrastrada hacia el roll former, que es donde se conformara el panel y por ultimo pasa por un apilador de paneles, que se encarga de apilar el producto.

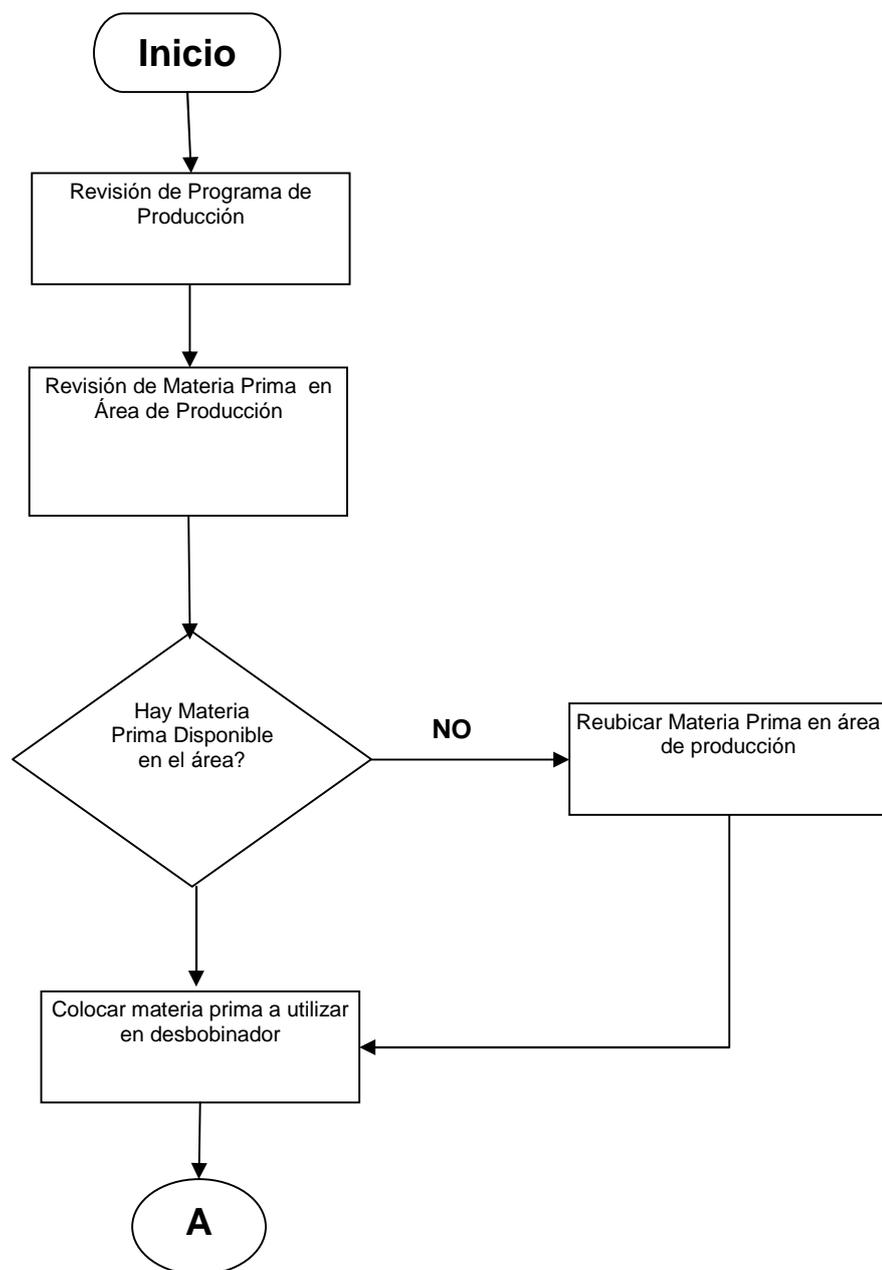
En las líneas de corte longitudinal y transversal, se utilizan los siguientes componentes:

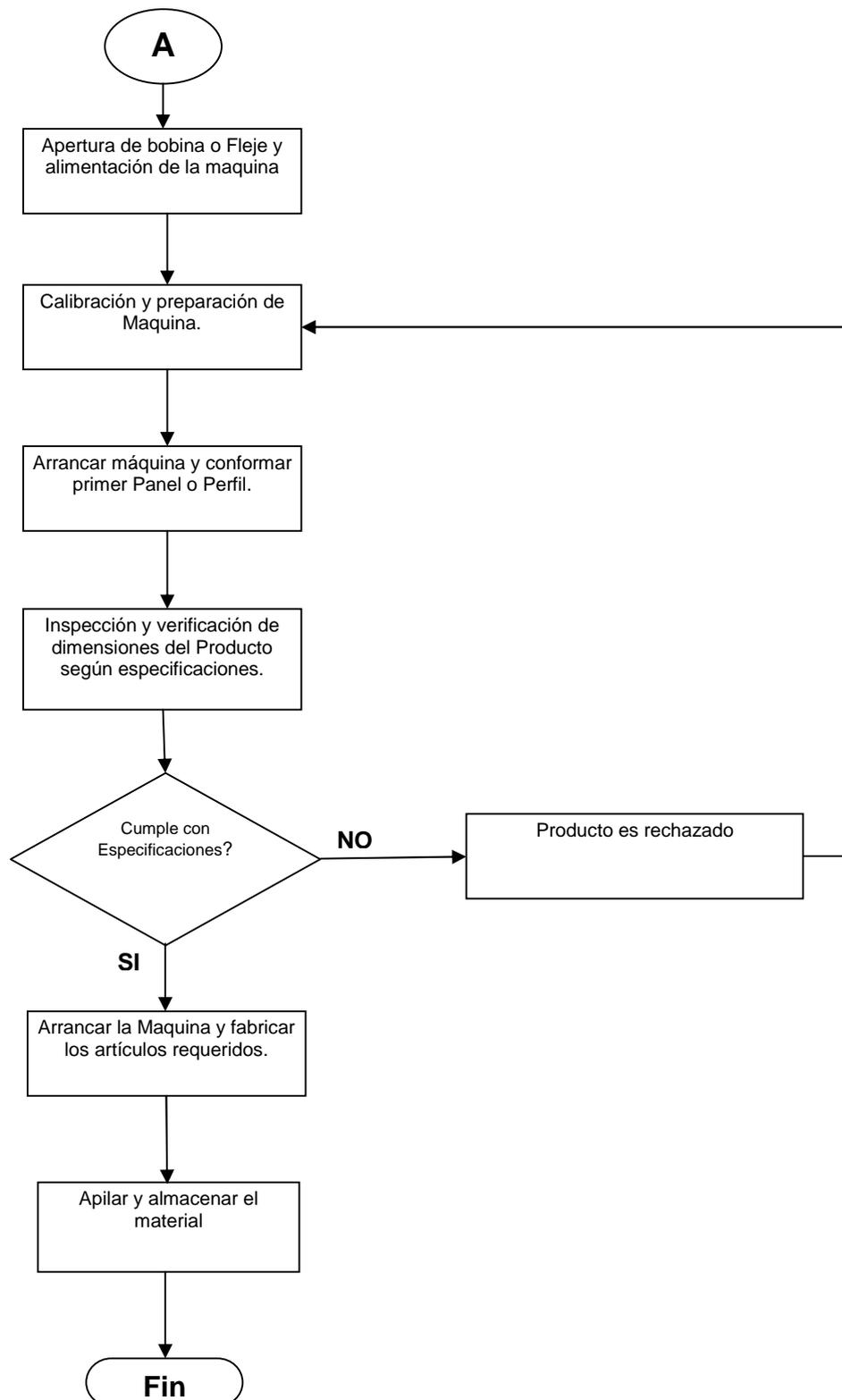
- Desbobinador
- Cabezal de corte
- Apilador de Laminas (LCT)
- Rebobinador de flejes (LCL)

En las líneas de corte longitudinal y transversal, se colocan las bobinas en el desbobinador, que al salir la lámina lisa de esta pasa por unos rodillos alisadores donde la lámina lisa es pasada por un cabezal de corte. Seguidamente en la slitter automática o línea de corte longitudinal, se produce el corte longitudinal a la lámina produciendo los flejes, y en la de corte transversal el corte es

perpendicular a la plancha que produce la lámina lisa en las dimensiones predeterminadas.

En la figura 1.3 se muestra el flujo grama del proceso de fabricación en las líneas de conformado.





**FIG.1.3 FLUJOGRAMA DE PROCESOS DE FABRICACIÓN EN LAS LÍNEAS CONFORMACIÓN**

En la Tabla #2, se muestra la capacidad de producción en toneladas y los turnos de trabajo que se operaban desde el año 2005 hasta el 2007

**TABLA # 2**  
**CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE LAS LÍNEAS DE**  
**FABRICACIÓN**

	<b>Ton. / hora</b>	<b>Horas/ Día</b>	<b>Ton. Diarias</b>
<b>LCF1</b>	1,24	16	19,84
<b>LCF2</b>	1,57	16	25,12
<b>LCF3</b>	0,82	8	6,56
<b>LCF4</b>	0,21	8	1,68
<b>LCF5</b>	0,45	8	3,6
<b>LCF6</b>	2,04	8	16,32
<b>LCL</b>	1,63	16	26,08
<b>LCT</b>	1,61	8	12,88
Total			112,08

En aquel periodo de tiempo solo se trabajaba dos turnos de ocho horas cada uno, en el primer turno se trabajaba en todas las

máquinas y en el segundo solo se trabajaba tres líneas como son la LCF1 – LCF2 -LCL.

El área de Producto Terminado, es el lugar donde se almacena los paneles, cubiertas y perfiles. En esta bodega existen dos divisiones la una es para los productos MTO (Make to Order) y otra área para los productos MTS (Make to Stock). En la figura 1.4 se muestra la forma de almacenar los paneles.



**FIG.1.4 BODEGA DE PRODUCTO TERMINADO**

Para apilar los paquetes de paneles se utilizan listones de maderas, para que se puedan introducir unas eslingas y por medio de una estructura transportarla con el puente grúa hasta el área de

despacho. Para el año 2008 la empresa comenzó a colocar sus productos con fuerza en el mercado y la creciente demanda hizo que se aumenten, la producción y también los turnos de trabajo de dos a tres, de ocho horas cada uno, es decir, laborar las veinticuatro horas del día durante seis días a la semana, como se muestra en la Tabla #3, esto conllevó a que el espacio físico de los almacenes de materia prima y producto terminado que estaba adecuado para almacenar estos productos, se sature por lo que muchos de los productos de MP y PT, se comenzaron a deteriorar debido al almacenamiento no adecuado.

**TABLA # 3**

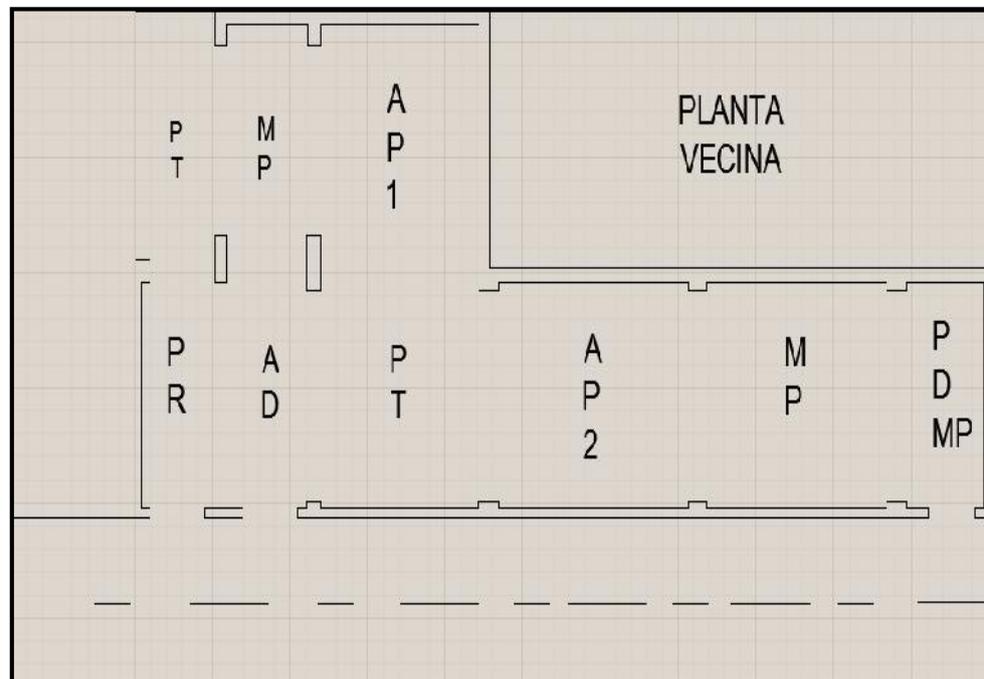
**CAPACIDAD DE LA PLANTA A TRES TURNOS**

<b>LINEAS</b>	<b>Ton. / hora</b>	<b>Horas</b>	<b>Ton. Diarias</b>
<b>LCF1</b>	1,24	24	29,76
<b>LCF2</b>	1,57	24	37,68
<b>LCF3</b>	0,82	24	19,68
<b>LCF4</b>	0,21	24	5,04
<b>LCF5</b>	0,45	24	10,8
<b>LCF6</b>	2,04	24	48,96
<b>LCL</b>	1,63	24	39,12
<b>LCT</b>	1,61	24	38,64
<b>Total</b>			<b>228</b>

Esta situación hizo que los accionistas de la empresa decidieran invertir en la planta industrial para mejorar la infraestructura y reorganizar las áreas de la planta, esto es bodega de materia prima, producción y bodega de producto terminado. Con el propósito de disminuir los tiempos improductivos, por los muchos movimientos que se realizan por el traslado de MP y PT por medio de montacargas. En lo que respecta el área de MP, se mejoró las condiciones de almacenamiento y se aumentó el espacio, a causa que la MP tarda meses en arribar a las bodegas de la planta, debido a que la compra se la realiza en los países lejanos como India y China y para evitar desabastecimiento de MP. En lo que respecta al PT también se amplió el sector de su almacenamiento debido a que la empresa tema de estudio tiene clientes a nivel nacional y el entregar el PT se demora a veces por semanas. En el área de Producción se desea tener dos áreas, una para perfiles y otra para paneles. Para eliminar el uso de los montacargas en la alimentación de MP y en el retiro de PT, se analizó la compra de cinco puentes grúas de diez toneladas. El mantenimiento de los puentes grúas es más económico y tiene una vida útil mayor a los del montacargas.

El proyecto de ampliar la infraestructura de la planta consiste en los siguientes puntos:

Obra civil, eléctrica y mecánica. En la figura 1.5 se muestra la nueva distribución de las diferentes áreas en la planta:



**FIG.1.5 NUEVA DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA**

MP: Materia Prima

PT: Producto Terminado

PR: Producto de Reventa

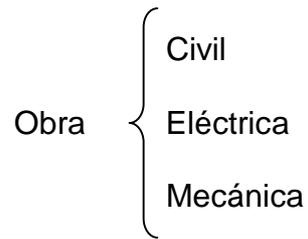
PD-MP: Patio de descarga de Materia Prima

AD: Área de despacho

AP1: Área de producción 1 (perfiles)

AP2: Área de producción 2 (paneles)

Para lo cual se requiere ejecutar diferentes obras:

**Obra civil:**

1. Compactación del terreno donde se asentara la planta para soportar las cargas estáticas y dinámicas de las máquinas y de la materia prima.
2. Pavimentación del terreno de la planta y construcción de pilares.
3. Instalación de cerchas, paredes y cubiertas metálicas.

**Obra eléctrica:**

1. Instalación de las acometidas eléctricas para todo el galpón tanto para el sector de iluminarias como el sector de máquinas.

**Obra mecánica:**

1. Instalación de 5 puentes grúas de 10 toneladas de capacidad
2. Distribución de aire comprimido a las nuevas posiciones de las máquinas.

3. Cambio de posición de equipos y maquinarias de las líneas de fabricación e instalación de las mismas, en sus nuevas aéreas ya sea de perfiles ó de paneles.

Lo que es, tema de estudio en esta tesis, es el rediseño del sistema de generación de aire comprimido, analizar las características técnicas necesarias para poder abastecer de aire en las nuevas posiciones de las máquinas y determinar el costo que tendría implementar este proyecto.

## **1.2 Objetivos Generales**

- I. Suministrar de aire comprimido a las líneas de producción.
- II. Rediseñar el sistema de aire comprimido

## **1.3 Objetivos Específicos**

- I. Medición del consumo real de aire en las líneas de fabricación.
- II. Medición del suministro de caudal en CFM del equipo generador de aire comprimido, hacia las líneas de fabricación.
- III. Análisis de las características técnicas del equipo generador.
- IV. Análisis del tratamiento existente del aire comprimido y el material de la nueva red de aire comprimido.

- V. Definir la distribución para la nueva red de aire comprimido y cuantificar las pérdidas de carga.
- VI. Definición del presupuesto para la implementación del proyecto.

#### **1.4 Metodología.**

Para la implementación de este proyecto, el objetivo principal es de abastecer con aire comprimido a las líneas de fabricación y se realizó el análisis en tres partes, que son los siguientes:

1. Equipo generador y tratamiento de aire
2. Conducción del aire comprimido
3. Equipos consumidores de aire comprimido

En el equipo generador de aire comprimido se determinó sus características técnicas y se midió la generación real de aire comprimido, en la cual se determinó el porcentaje de su capacidad operativa que está siendo utilizada; se revisó si está en condiciones de operación eficiente; las ventajas y desventajas de operar con este equipo. En el tratamiento de aire se analizó si es el adecuado para este tipo de industria; se revisó las características técnicas de los

equipos y accesorios en las cuales puedan ser útil como componentes en la nueva distribución del aire comprimido.

Se revisó las condiciones del transporte de aire comprimido es decir la tubería, se determinó las caídas de presión; se seleccionó el material, el diámetro adecuado para el transporte del aire; y se analizó el tipo de red más conveniente para la planta.

Se determinó el consumo de los equipos consumidores de aire comprimido, de tal forma que se determinó el factor de coincidencia, ya que todos los equipos no operan al mismo tiempo, debido a los tiempos de preparación de máquina, que son considerables por efecto de las calibraciones de matricería y cambios de materia prima.

Las mediciones del caudal de aire del equipo generador se realizó por medio de una auditoria de aire, contratando una empresa especializada en esa actividad, que consistió en colocar un medidor de flujo en la salida del compresor y un equipo electrónico que permite tomar lectura de los CFM durante diez días. La operación del compresor generó una tabla de resultados del consumo en CFM vs el tiempo de operación del equipo generador.

La medición de los consumos de aire en las líneas de fabricación se realizó por medio de un medidor de caudal.

Con los datos que se obtuvieron de las mediciones, se procedió a calcular y a seleccionar los equipos y accesorios del sistema de generación, tratamiento y transporte para la nueva red de aire comprimido, que luego de los análisis se determinó el costo de implementación del proyecto.

### **1.5 Estructura de la Tesis**

El primer capítulo muestra la identificación del problema, descripción de los objetivos y la metodología para encontrar la solución al problema propuesto en esta tesis.

En el segundo capítulo denominado situación actual de la fábrica, se describe el proceso de producción de la planta y los equipos que intervienen en el proceso de fabricación, se realiza una descripción y análisis de los componentes que intervienen en la generación y tratamiento de aire comprimido, la trayectoria actual de la tubería y

la demanda de aire comprimido de la planta, además se determina qué tipo de red de distribución es la más conveniente para la planta.

En el tercer capítulo denominado Cálculo y Selección, nos dedicaremos a determinar el diámetro óptimo de tubería y a seleccionar el material de la tubería, la capacidad del compresor, secador y demás accesorios, etc.

En el cuarto capítulo se realiza un análisis técnico, en el cual se evalúa si los equipos y accesorios del sistema actual de aire comprimido tienen la capacidad para cubrir el nuevo tendido de red que requiere del proyecto y también definir si las condiciones de los equipos y accesorios están aptas para seguir operando ó se opta por reemplazarlos. El análisis económico del proyecto determina el costo que representa en ejecutar este proyecto.

En el quinto capítulo se dan recomendaciones y conclusiones del proyecto.

# CAPÍTULO 2

## 2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA FÁBRICA

### 2.1 Descripción del proceso de producción de los paneles y perfiles

El principio para la fabricación de paneles, cubiertas y perfiles metálicos, que utiliza esta fábrica es el *conformado en frío*.

El conformado en frío comprende todos los métodos de fabricación que permiten deformar plásticamente (a temperatura ambiente y ejerciendo una presión elevada) metales o aleaciones de metales, pero sin modificar el volumen, el peso o las propiedades mecánicas del material. Durante el conformado en frío la materia prima recibe su nueva forma mediante un proceso que consta de diferentes etapas de deformación, de tal manera que no exceda la capacidad de deformación del material y por lo tanto su rotura.

**Paneles y Cubiertas metálicas:** Para fabricar este producto, se utilizan bobinas de acero que pueden ser:

- { Galvalume
- { Galvanizado
- { Pre pintado

Galvalume: Es una aleación que recubre al acero base y se compone de 55% Aluminio, 43% de Zinc y 2% de Silicio. En la figura 2.1 se muestra un liso de galvalume.



**FIG. 2.1 MUESTRA DE ACERO GALVALUME**

Galvanizado: Es una capa de zinc puro o aleada con hasta un 15% de hierro o hasta un 6% de aluminio. En la figura 2.2 se muestra una plancha de galvanizado.



**FIG 2.2 MUESTRA DE ACERO GALVANIZADO**

Pre pintado: Las bobinas prepintadas pueden ser galvanizadas o galvalume que vienen con una capa de imprimación y otra de acabado, y en una gran variedad de colores. En la figura 2.3 se muestra una lámina lisa pre pintada



**FIG. 2.3 LÁMINA PRE PINTADA COLOR ROJO ARCILLA**

El Galvalume se utiliza generalmente en cubiertas y paneles metálicos, en espesores de 0.25 mm hasta 0.60 mm.

El Galvanizado se lo utiliza para fabricar placas colaborantes que sirven para construir lozas, también perfiles estructurales de espesores entre 1.2 mm a 1.9 mm.

El Pre pintado es utilizado para cubiertas y paneles metálicos, con espesores entre 0.35 mm a 0.80 mm. Las bobinas de acero generalmente tienen un peso entre 3.800 Kg hasta 8000Kg., y no deben venir mayores a 10000Kg, ya que la planta tiene equipos que soportan hasta este máximo peso.

Las bobinas son montadas en un desbobinador, que es una máquina que toma la bobina por el núcleo y este comienza como su nombre lo indica a desbobinar la bobina, para que este pueda sacar las láminas lisas listas para el conformado. En la figura 2.4 se muestra un desbobinador desenrollado una bobina de 6 toneladas.



**FIG. 2.4 DESBOBINADOR DE 8 TONELADAS DE CAPACIDAD**

Una vez que se remueven las láminas lisas, son trasladadas a una cizalla, la cual se corta a la medida del producto de distribución o una medida especial, dependiendo de la orden de fabricación.



**FIG. 2.5 CIZALLA DE CORTE CONTINUÓ**

En la figura 2.5 se muestra una cizalla neumática, en el momento de corte de una lámina lisa, antes de su conformado en el roll – former.

La lámina lisa después de corte continuo pasa por un roll former, que se encarga de darle forma a la cubierta o panel. En la figura 2.6 se muestra un roll former, en la cual la lámina lisa es arrastrada por los rodillos de la matricería. Luego de estos pasos los paneles pasan por un apilador de paneles, el cual permite agrupar por paquetes los pedidos generados por los clientes.



**FIG. 2.6 ROLL - FORMER**

En la figura 2.7 se muestra un apilador de paneles, que tienen diseños diferentes dependiendo a la geometría del producto.



**FIG. 2.7 APILADORES DE PANEL**

Para concluir el proceso de fabricación las cubiertas son transportadas a la bodega de producto terminado (PT).

En el proceso de fabricación de los paneles metálicos intervienen diferentes máquinas, como:

- Desbobinador: contiene sistemas hidráulicos y neumáticos. (Embragues neumáticos).
- Cizalla: contiene sistemas hidráulicos y neumáticos. (Actuadores neumáticos).
- Roll – Formers: contiene sistemas mecánicos y neumáticos. (Embragues neumáticos).

- Apilador: contiene sistemas neumáticos. (Actuadores neumáticos).

**Perfiles Metálicos:** Para fabricar este producto, se utilizan flejes de acero galvanizado de diferentes espesores para producir perfiles de 0.40mm hasta 1.9mm. El material de estos perfiles, es de acero estructural, que tiene mayor resistencia que el acero comercial.

Para fabricar el fleje se coloca una bobina galvanizada en un desbobinador, el cual es transportada a una maquina llamada Slitter (LCL), que corta la bobina de forma longitudinal, formando flejes de diferentes desarrollo (ancho del fleje), es decir los flejes siempre son menores al ancho de la bobina.

En la figura 2.8 se muestra la Slitter automático en la cual se corta a la laminas en sentido longitudinal produciendo los denominados flejes y esta a su vez se encarga de enrollarlos.



**FIG. 2.8 SLITTER AUTOMÁTICO (LCL)**

Una vez obtenido los flejes de acuerdo al espesor y al desarrollo requerido del perfil a conformar, este es trasladado a la línea de fabricación de perfiles.

En la figura 2.9 se muestra un desbobinador de flejes, que son utilizados en las líneas de perfiles.



**FIG. 2.9 DESBOBINADOR DE FLEJES.**

El proceso de conformado consiste en montar los flejes a un desbobinador, y transportarlo a una cizalla y seguidamente el fleje pasa por un roll former que conforma el tipo de perfil, que puede ser tipo G, Z, Stud y Track.

En la figura 2.10 se muestra como el fleje es conformado, en los rodillos de la matricería.



**FIG. 2.10 CONFORMACIÓN DE PERFILES**

## **2.2 Generación de Aire Comprimido**

En este subcapítulo se describen las características de los equipos que conforman el sistema de generación de aire comprimido.

### **2.2.1 Compresor de Tornillo**

El compresor que actualmente genera el aire comprimido para consumo de la fábrica, es el compresor tipo tornillo marca Atlas Copco, modelo **GA 30**, de 40 Hp de potencia, entrega hasta 161 CFM a 132 psi., y el año de fabricación es de 1990.

Cuando se realiza un mantenimiento correctivo al compresor de tornillo, un compresor de pistón de Ingersoll- Rand, Model No:

T30151204, sirve como back up, aunque no cubre toda la capacidad de la planta.

En la figura 2.11 se muestra el compresor Atlas Copco que está operativo en la planta



**FIG. 2.11 COMPRESOR ATLAS COPCO DE 40 HP.**

El tiempo de trabajo de la planta es de tres turnos de ocho horas cada uno, de lunes a sábado, es decir se trabaja 6 días a la semana las 24 horas.

### **2.2.2 Secador**

Para deshumidificar el aire se utiliza un secador, el aire siempre contiene una cantidad mayor o menor de humedad que

depende de las condiciones ambientales. Sin embargo, el aire es requerido para utilizarse en los diferentes equipos.

Antes de que el aire comprimido llegue a las unidades consumidoras, debe conseguirse que se condense la mayor cantidad posible del vapor de agua. El secador existente en la fábrica es un equipo marca Atlas Copco, modelo FD-24, actualmente se encuentra fuera de servicio. Esto ha provocado paradas de producción, por actividades de mantenimiento correctivo en las líneas de fabricación y se dieron casos como:

- 1.- Los vasos lubricadores de las unidades de mantenimiento llenos de agua.
- 2.- Los actuadores neumáticos comenzaron a dar problemas debido a que sus sellos y retenedores se encontraban degradados y en algunos casos fracturados debido a la alta humedad que se encontraban en los cilindros.
- 3.- Las válvulas electro-neumáticas, tenían que ser reemplazados a muy corto tiempo debido al daño en sus spool.

### 2.2.3 Tanque Pulmón

Los tanques de almacenamiento son componentes muy importantes en el sistema de aire comprimido ya que cumplen con las siguientes funciones:

- I. Amortiguan variaciones de demanda de aire.
  
- II. Proporcionan capacidad de aire almacenado que sirve para evitar que los ciclos de operación de un compresor sean muy cortos, con lo que se reduce el desgaste y uso del compresor. Esto implica un ahorro de energía.
  
- III. Incrementar el enfriamiento y permiten recuperar posibles residuos de condensado y aceite.
  
- IV. Una de las principales medidas para obtener ahorros de energía es la de reducir el número de ciclos que efectúa un compresor, ya que al producirse ciclos muy cortos se incrementa en forma directa el desgaste, y como consecuencia el consumo de energía del compresor por encendido.

Para el caso de compresores tipo tornillo se recomienda que el tiempo mínimo de operación sea de alrededor de 2 minutos.

En la figura 2.12 se muestra el tanque acumulador de aire de un metro cúbico de capacidad, que existe en la planta ubicado en el cuarto de compresores:



**FIG. 2.12 TANQUE ACUMULADOR UBICADO EN EL CUARTO DE COMPRESORES**

#### **2.2.4 Filtros coalescentes y de partículas**

El aire del ambiente contiene contaminantes que son ingresados por el aire cuando ingresan al compresor. Estos

contaminantes son concentrados durante la compresión y salen por el sistema de aire comprimido. Un sistema típico de compresión se contamina con partículas sólidas abrasivas como el polvo, residuos de tubería y de óxido, lubricantes del compresor, gotas de agua condensada, aceite y vapor de hidrocarburos. Los sistemas de aire comprimido contaminados aumentan los costos de operación debido al mayor uso de energía que requiere del sistema de aire. Esto da como resultado la reducción en eficiencia, daños a equipos operados con aire, mayor mantenimiento y costos de reparación; reduciendo la productividad.

Los tres filtros que existen en la planta industrial tema de estudio, son dos de partículas y un coalescente, los de partículas son de 5 y 10 micras.

El proceso de filtrado del aire es el siguiente: después que sale el aire comprimido del compresor pasa por un filtro de partículas de diez micras y luego a otro filtro de partículas de cinco micras, luego este aire pasa al secador y la última etapa de filtrado la hace el filtro coalescente una vez que recibe el aire comprimido

del secador. Este aire filtrado es transportado por medio de las tuberías a las líneas de fabricación.

En la figura 2.13 se muestra un filtro de partículas que tiene un medidor de saturación, en el cual muestra cuando se debe cambiar el elemento filtrante, este además tiene un drenado automático.



**FIG. 2.13 FILTRO DE PARTÍCULAS DE 5 MICRAS**

Para obtener aire comprimido de alta calidad, es necesario prever varias fases de filtración. Un solo filtro “fino” no es suficiente para obtener aire de calidad satisfactoria, ya que se satura en muy corto tiempo, por lo que se debe realizar filtración en forma progresiva.

Los filtros que existen en la fábrica actualmente son:

1. Filtro de Partículas de 10 micras:

Marca: Parker

Código: HN5S-10CUY

Max. Press 250 psi

Max. Temp 175°F

2. Filtro de Partículas de 5 micras:

Marca: Parker

Código: HN8S-6CUY

Max. Press 250 psi

Max. Temp 175°F

3. Filtros Coalescentes:

Marca: Parker

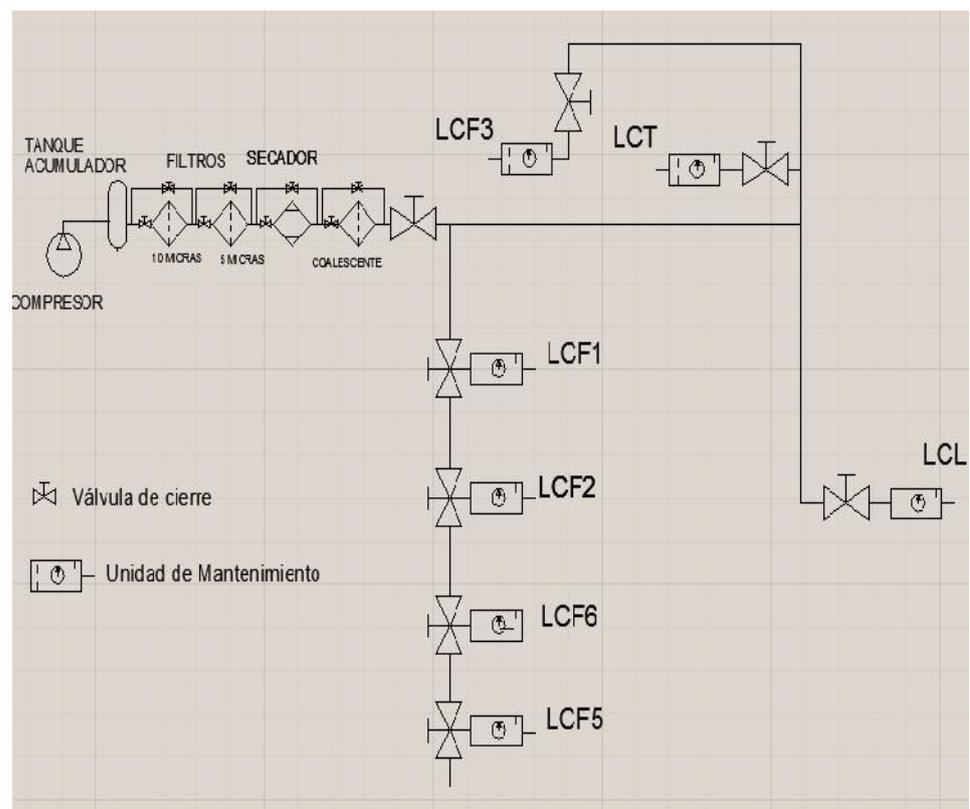
Código: HN5S-100WSY

Max. Press 250 psi

Max. Temp 175°F

### 2.3 Trayectoria de la red de aire comprimido

Actualmente el tipo de tendido en la planta que es una red abierta, la cual consiste en una tubería que sale del compresor y llega hasta las máquinas, que necesitan aire comprimido. En el plano A1, Apéndice C, se describe la trayectoria de las tuberías del circuito de aire comprimido y la distribución de los equipos y máquinas. En la figura 2.14 se muestra el esquema del tendido de la tubería de aire comprimido.



**FIG. 2.14 ESQUEMA ACTUAL DEL TENDIDO DE LA TUBERÍA**

Lo que se desea implementar en este proyecto es un circuito neumático de anillo cerrado, el cual permita, distribuir aire comprimido a toda la planta, según como se describe en el plano A2, Apéndice C el cual muestra las nuevas posiciones de las máquinas y del recorrido de la tubería que se propone.

#### **2.4 Análisis de la situación actual del sistema de aire comprimido**

El estado actual de la planta con respecto al sistema de aire comprimido, es el siguiente:

Compresor de aire comprimido tipo tornillo marca Atlas Copco, modelo GA-30, el cual tiene más de veinte años de operación, el compresor tiene una capacidad de 40 HP y 161 CFM según datos de placa. Este compresor cubre la demanda actual de la planta. Se analiza si con el nuevo tendido, cuya ruta es mayor y con mayores pérdidas de carga, este permite cubrir la demanda.

El secador de aire marca Atlas Copco, modelo FD-24, debido a que ya está fuera de servicio, es urgente su reemplazo, debido a esto se ha tenido inconvenientes con algunos actuadores neumáticos, los

cuales se han dañado sus sellos y empaques debido a la gran concentración de humedad en el aire comprimido.

El tanque pulmón tiene una capacidad de un metro cúbico, visualmente está en buen estado, sin embargo habría que analizar si se requiere incrementar la capacidad de almacenamiento para el nuevo sistema de aire comprimido. Los elementos de los filtros coalescentes y de partículas ya deben ser reemplazados debido a que se encuentran saturados de impurezas y de agua.

## **2.5 Demanda del caudal de aire comprimido en la fábrica**

En la planta existen cuatro líneas de producción de paneles, una de producción de perfiles, dos de corte transversal y una de corte longitudinal.

Antes de realizar la auditoria de aire, se efectuó una toma en cada línea, con un medidor de caudal de aire, para determinar la demanda en CFM en cada línea, como se muestra en la Tabla #4.

**TABLA # 4**  
**CONSUMO DE AIRE COMPRIMIDO DE LAS LÍNEAS DE**  
**PRODUCCIÓN**

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Caudal en CFM</b>	<b>Presión de Trabajo (Bar)</b>
1	LCF1	30	5
1	LCF2	30	5
1	LCF5	15	4
1	LCF6	30	3
1	LCF3	30	6
1	LCT	20	5
1	LCL	35	1
<b>Total</b>		190	-----

En base a la Tabla #4 se obtuvo un consumo teórico de la planta de aproximadamente 190 CFM. Este flujo se consumiría si todas las máquinas accionarían su cizalla y sus actuadores neumáticos al mismo tiempo, pero en la realidad esto no sucede, debido a que se debe realizar cambios de matricería, calibración y poner a punto la operación del equipo antes de empezar la producción, esto es en el caso de las líneas de paneles y perfiles. En la línea de corte longitudinal se debe realizar armados en las cuchillas para cortar flejes, los cuales a veces duran hasta 4 horas en realizarlos. La línea de corte transversal no está operativa al cien por ciento debido a que

en esta línea se debe colocar bobinas y calibrar cuchillas para los diferentes espesores que se cortan.

Es por esta razón es que se aplica un factor de coincidencia, el cual indica un dato real de cómo se comporta la planta, en lo que respecta al consumo de aire comprimido.

En la siguiente Tabla #5, se muestra el consumo corregido con el factor de coincidencia. Que asciende a 114 CFM necesarios para operar la planta, sin embargo, para determinar de una manera más exacta, la empresa tema de estudio, contrato los servicios de una empresa local para realizar una auditoría del consumo de aire comprimido, en la planta industrial.

**TABLA #5**  
**TABLA CON FACTOR DE COINCIDENCIA**

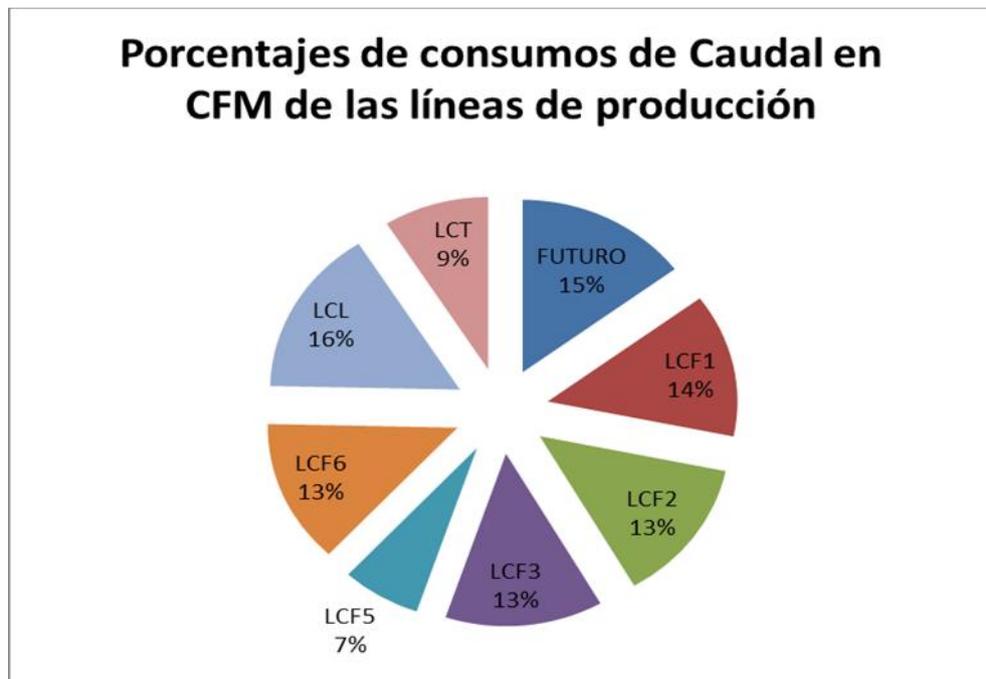
<b>Requerimiento real aplicando factor de coincidencia</b>			
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>CFM</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
1	LCF1	30	17,65
1	LCF2	30	17,65
1	LCF5	15	8,82
1	LCF6	30	17,65
1	LCF3	30	5,88
1	LCT	20	11,76
1	LCL	35	20,59
	<b>Total</b>	<b>190</b>	<b>100</b>
<b>Factor de coincidencia</b>		<b>0,6</b>	<b>-----</b>
<b>Total requerido</b>		<b>114</b>	<b>-----</b>

Para la determinación del consumo coincidente, se colocó un medidor de caudal en la línea principal de aire comprimido, que sale del banco de compresores y que por medio de un software se aprecian las variaciones de los CFM vs el tiempo. Este instrumento fue colocado por un tiempo de 10 días, durante la cual la planta trabajó en tres turnos a producción normal. Los datos que mostró el sistema fueron los siguientes:

- 1.- El flujo máximo requerido por la planta es de 82 CFM.

2.- Las presiones máximas y mínimas son 100 y 90 psig respectivamente.

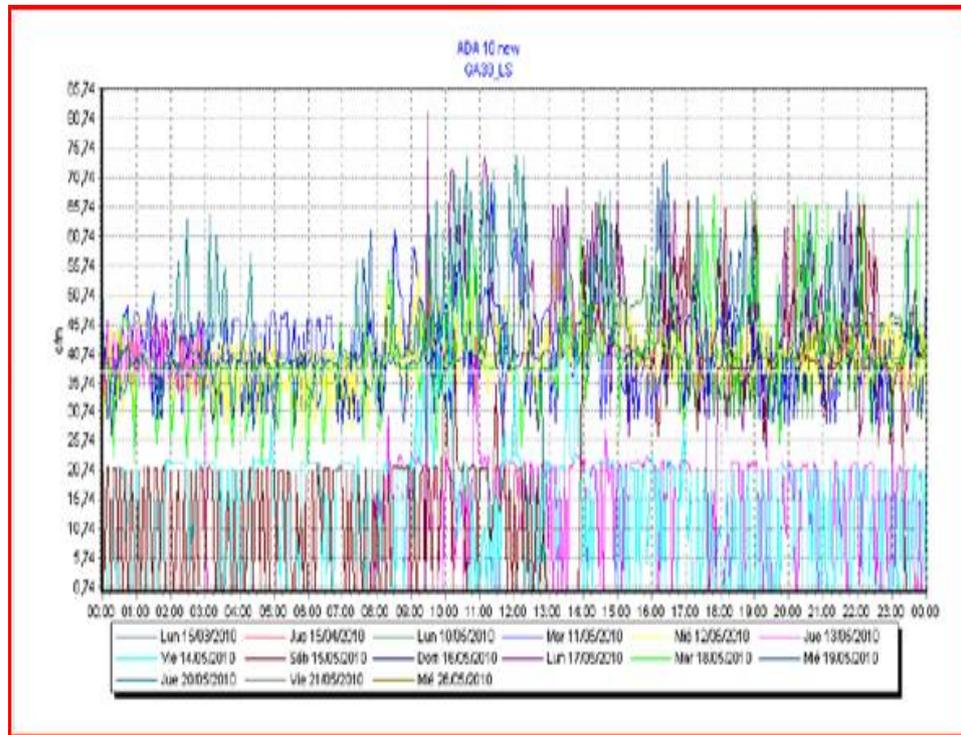
A este consumo se le adiciona, para efecto de cálculo, un 15% para máquinas que se instalen a futuro por incrementos en líneas de fabricación. En la figura 2.15 se muestra el porcentaje de consumos de las líneas de fabricación, que incluye el consumo a futuro de la planta.



**FIG 2.15 CONSUMOS DE CFM DE LAS LÍNEAS**

En la figura 2.16 se muestra un gráfico del consumo de aire comprimido de la Planta (CFM) vs el tiempo de operación, tomado

durante una semana y reportado a través de la auditoría de aire comprimido.



**FIG. 2.16 DEMANDA DE CFM DE LA PLANTA**

Con estos resultados de la auditoría de aire, se puede decir que el compresor actual utiliza un 51% de su capacidad, esto es 82 CFM de las 161CFM que entrega el equipo. Esto indica que el compresor actualmente está sobredimensionado para los requerimientos reales de aire comprimido de la planta.

# CAPÍTULO 3

## 3. CÁLCULO Y SELECCIÓN

### 3.1 Cálculo y diámetro de la tubería de aluminio

La empresa que realizó la auditoria de aire en la planta tema de estudio, determinó la demanda de todos los equipos de la planta que es de 82 CFM y 100 psig., tal como se demuestra en el subcapítulo 2.5, en base a estas mediciones se procederá a realizar los cálculos para seleccionar el diámetro de tubería óptimo.

Una empresa local que provee de tuberías y accesorios de tuberías de aluminio, utiliza un software que permite calcular el diámetro óptimo para las redes de tuberías, en el cual se pueden introducir los siguientes parámetros como son:

- Longitud de la red
- Caudal
- Presión de trabajo
- Tipo de red

La figura 3.1 muestra la pantalla del programa utilizado para determinar la geometría de las tuberías en el cual se puede observar los datos requeridos para el desarrollo del mismo.

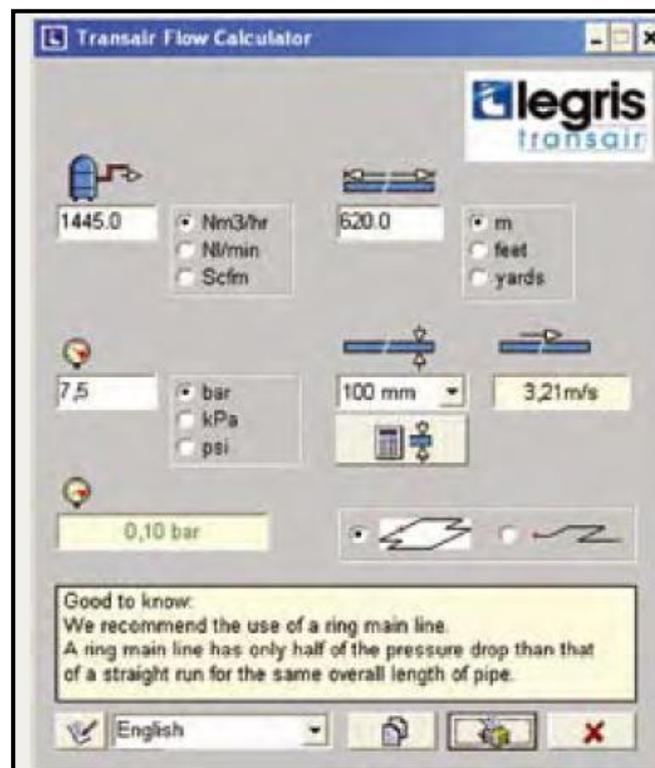


Imagen tomada de la referencia [3]

**FIG 3.1 PANTALLA DE PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE DIÁMETRO DE TUBERÍAS.**

Se procedió a ingresar los datos que requiere el software como es: Presión de trabajo, red abierta ó cerrada, caudal en CFM y

porcentaje de caída de presión, que permitirá determinar el diámetro más óptimo. El diámetro de la tubería calculado es de 40 mm, para comprobar este resultado, se procedió a realizar el cálculo, para verificar si con este diámetro la caída de presión no supera el 10% de la presión de trabajo.

En este proyecto se va a utilizar una instalación de anillo cerrado con un perímetro de 329 metros de longitud, pero para el presente caso se toma el punto más alejado de nuestro anillo cerrado, tomando como referencia el banco de compresores.

Los CFM necesarios para cubrir la demanda de la planta se le adiciona un 15% para un posible incremento de demanda en el futuro, en lo que respecta a un crecimiento de la planta, aumento de líneas que utilicen aire comprimido, más el diez por ciento de pérdidas.

La presión es de 100 psig.

El caudal es de  $82 \text{ cfm} \times 1.15 = 94 \text{ cfm}$ .

La longitud del anillo cerrado de la tubería es de 337 metros.

Con los datos antes indicando y con el diámetro de la tubería que proveyó la Tabla del fabricante de la tubería y con el diagrama de Moody, mostrado en la Figura A.1 Apéndice A, la ecuación de Darcy – Weisbach, y la ecuación de Bernoulli, se determinó la pérdida de carga la cual no debe exceder del 10% de la presión de servicio que en proyecto tema de tesis es de 7 bares.

### **Ecuación de Bernoulli**

A continuación la ecuación (3.1) representa la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{p_1}{\rho_1} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho_2} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (3.1)$$

Dónde:

P = presión del fluido

$\rho$  = densidad del fluido

Z = altura del fluido

v = velocidad del fluido

g = aceleración de la gravedad

### Ecuación de Darcy – Weisbach

Para el cálculo de las pérdidas de presión se utiliza la ecuación (3.2) de Darcy – Weisbach.

$$H_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (3.2)$$

Dónde:

$H_f$  = Pérdida de carga

$f$  = Coeficiente de pérdida de carga

$L$  = Longitud de la tubería

$D$  = Diámetro de la tubería

$g$  = Gravedad

$V$  = Velocidad del fluido

Las propiedades del aire como la densidad y la viscosidad dinámica a una temperatura promedio de 30°C y a 1 bar de presión que son las condiciones ambientales de Guayaquil, lugar donde se encuentra la planta que es tema de estudio, se las puede observar en la Tabla B.1 Apéndice B

Densidad del aire  $\rho = 0.07217 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}$

Viscosidad dinámica del aire  $\mu = 1.265 \times 10^{-5} \frac{\text{lbm}}{\text{ft. seg}}$

Viscosidad cinemática del aire  $\nu = 1.74 \times 10^{-4} \frac{\text{ft}^2}{\text{s}}$

Los valores de la longitud equivalente mostrada en la Tabla # 6 de las tuberías de aluminio de 40mm de diámetro, son tomados de la Tabla B.2 Apéndice B

**TABLA #6**

**LONGITUD EQUIVALENTE DE ACCESORIOS DE DIÁMETRO 40 MM, PARA LA TUBERÍA DE ALUMINIO**

Accesorios	Cantidad	Longitud Equivalente Unitario (m.)	Longitud Equivalente Total (m.)
Codos 90°	8	3.62	28.96
Te	3	0.4	1.2
Válvulas	5	0.35	1.75
Uniones	33	0.36	11.88
		<b>Total</b>	<b>43.79</b>

Longitud equivalente o cabezal de pérdidas por accesorios ( $H_L$ ) es igual a 43.79 metros = 143.63 ft.

$$H_L = 143.63 \text{ ft.}$$

La longitud total es igual a 337 metros, pero como es un anillo cerrado vamos a tomar al punto más lejano del anillo cerrado que es 203 metros o 665.84 ft.

El cálculo de la velocidad del flujo del aire se efectúa por medio de la ecuación (3.3):

$$Q = v \times A \tag{3.3}$$

Donde

$Q$ : Caudal

$v$ : Velocidad

$A$ : Área de la tubería

$$V = \frac{Q}{A} ;$$

$$V = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} ;$$

$$V = \frac{4 \times 94}{\pi \times \left[ \frac{1.57}{12} \right]^2}$$

$$V = 116.53 \frac{ft}{s} = 35.51 \frac{m}{s}$$

Esta velocidad, está dentro del rango del de aire comprimido recomendable que es de 30 a 35 metros sobre segundos.

Se procedió a calcular el número de Reynolds, por medio de la ecuación (3.4):

$$Re = \frac{V \times D_i \times \rho}{\mu} \quad (3.4)$$

$V$  = Velocidad del aire que circula por la tubería

$D_i$  = Diámetro interno de la tubería

$\mu$  = Viscosidad dinámica

$\rho$  = Densidad del aire

$$Re = \frac{116.53 \frac{ft}{s} \times \left[ \frac{1.57}{12} ft \right] \times 0.07217 \frac{lbm}{ft^3}}{1.265 \times 10^{-5} \frac{lbm}{ft \cdot s}}$$

$$Re = 8.7 \times 10^4$$

Para determinar la rugosidad equivalente  $\varepsilon$  para tubos de aluminio, se revisó la Tabla de rugosidad y se determinó que es de 0.000005 ft, detallada en la Figura A.2, Apéndice A

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{\text{Rugosidad Equivalente}}{\text{Diametro del tubo}}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.000005 \text{ ft}}{\left[ \frac{1.57}{12} \text{ ft} \right]}$$

$$\varepsilon = 0.0000382 \approx 0.00004$$

Calculado el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se utiliza el diagrama de Moody, mostrado en la Figura A.1, Apéndice A, en el cual se determina el factor de fricción ( $f$ ):

$$f \approx 0.017$$

$$H_f = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (3.2)$$

$$H_f = 0.017 \times \frac{665.84 \text{ ft}}{\left[ \frac{1.57}{12} \text{ ft} \right]} \times \frac{\left[ 116.53 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \right]^2}{2 \left[ 32.2 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \right]}$$

$$H_f = 18242.74 \text{ ft}$$

$$H_T = H_f + H_L$$

$$H_T = 18242.74 \text{ ft} + 143.63 \text{ ft}$$

$$H_T = 18386.37\text{ft.}$$

$$\Delta P = H_T \times \rho \times g \quad (3.1)$$

$$\Delta P = 18386.37\text{ft} \times 0.07217 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \times 32.2 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \times \left[ \frac{1\text{ lbf}}{32.2\text{lbm} \cdot \text{ft}/\text{s}^2} \right]$$

$$\Delta P = 1326.94 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} = 9.21 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2}$$

$$\Delta P = 9.21 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2} \times \frac{1}{14.5036} \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2}$$

$$\Delta P = 0.63\text{bar}$$

Esta caída de presión representa un 9% de pérdidas, la cual se encuentra dentro de los márgenes aceptables, es decir el diámetro seleccionado por el software es el correcto. Este cálculo puede ser validado utilizando la Tabla #7, cuyo resultado se muestra en la figura 3.1, se toma en cuenta el caudal, longitud de la red y la potencia del compresor.

TABLA # 7.

## SELECCIÓN DE DIÁMETRO DE TUBERÍA DE ALUMINIO.

Flow rate			Length										Compressor (m)
Nm <sup>3</sup> /h	Nl/min	cfm	164ft	328ft	492ft	964ft	1940ft	2460ft	3280ft	4265ft	5249ft	6561ft	
10	167	6	50m	100m	150m	300m	500m	760m	1000m	1300m	1600m	2000m	2 - 10
30	500	18	16.5	16.5	16.5	25	25	25	25	25	25	25	
60	833	29	16.5	25	25	25	25	25	40	40	40	40	
70	1167	41	25	25	25	25	40	40	40	40	40	40	10 - 40
100	1667	59	25	25	25	40	40	40	40	40	40	63	
150	2500	88	25	40	40	40	40	40	40	63	63	63	
250	4167	147	40	40	40	40	63	63	63	63	63	63	40 - 100
350	5833	206	40	40	40	63	63	63	63	63	63	76	
500	8333	294	40	40	63	63	63	63	63	76	76	76	
750	12500	441	40	63	63	63	63	63	76	76	76	76	100 - 125
1000	16667	589	63	63	63	63	63	76	76	100	100	100	
1250	20833	736	63	63	63	63	63	76	100	100	100	100	
1500	25000	883	63	63	63	76	76	76	100	100	100	100	> 425
1750	29167	1030	63	63	76	76	76	76	100	100	100	100	
2000	33333	1177	63	76	76	76	76	76	100	100	100	100	
2500	41667	1471	63	76	76	76	76	100	100	100	100	100	> 425
3000	50000	1766	76	76	76	100	100	100	100	100	100	100	
3500	58333	2060	76	76	100	100	100	100	100	100	100	100	
4000	66667	2354	76	100	100	100	100	100	100	100	100	100	> 425
4500	75000	2649	76	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
5000	83333	2943	76	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
5500	91667	3237	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	> 425
6000	100000	3531	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

Imagen tomada de la referencia [3]

Haciendo un análisis con la tubería de hierro galvanizada de 2 pulgadas de diámetro, que estaba en la red abierta de aire comprimido en instalaciones de la planta, se desea saber que tan eficiente era este sistema de aire comprimido.

La presión es de 100 psig, el caudal de 82 *cfm*, que es la demanda actual de la planta.

La longitud de la tubería al punto más distante de consumo de aire comprimido es 95.2 metros o 312.33 ft, ya que el tipo de red de la tubería es abierta.

En la Tabla #8, se muestra los datos de longitud equivalente de la tubería galvanizada de dos pulgadas de diámetro, de los accesorios de esta red, son tomadas de la Tabla B3, Apéndice B.

**TABLA #8.**  
**LONGITUD EQUIVALENTE DE ACCESORIOS DE DIÁMETRO**  
**2 PULGADAS, PARA LA TUBERÍA GALVANIZADA**

Accesorios	Cantidad	Longitud Equivalente Unitario (m.)	Longitud Equivalente Total(m.)
Codos 90°	3	3	9
Te	3	1	3
Válvulas esféricas	4	15	60
Uniones Universales	16	0.5	8
		<b>Total</b>	<b>80</b>

La longitud equivalente o cabezal de pérdidas por accesorios ( $H_L$ ) es igual a 80 metros = 262.47ft.

$$H_L = 262.47 \text{ ft.}$$

El cálculo de la velocidad del flujo del aire se efectúa por medio de la ecuación (3.3):

$$Q = v \times A \quad (3.3)$$

$$V = \frac{Q}{A} ;$$

$$V = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} ;$$

$$V = \frac{4 \times 82}{\pi \times \left[\frac{2}{12}\right]^2}$$

$$V = 62.64 \frac{ft}{s} = 19 \frac{m}{s}$$

Esta velocidad, no está dentro del rango del de aire comprimido recomendable que es de 30 a 35 m/s.

Se procedió a calcular el número de Reynolds, por medio de la ecuación (3.4):

$$Re = \frac{V \times Di \times \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{62.64 \frac{ft}{s} \times \left[\frac{2}{12} ft\right] \times 0.07217 \frac{lbm}{ft^3}}{1.265 \times 10^{-5} \frac{lbm}{ft \cdot s}}$$

$$Re = 5.96 \times 10^4$$

Para determinar la rugosidad equivalente  $\varepsilon$  para tubos, revisamos la Tabla de rugosidad para tubos de hierro galvanizado que es de 0.0005 ft, que se detalla en la Figura A.2, Apéndice A

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{\text{Rugosidad Equivalente}}{\text{Diametro del tubo}}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.0005 \text{ ft}}{\left[ \frac{2}{12} \text{ ft} \right]}$$

$$\varepsilon = 0.003$$

Calculado el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se utiliza el diagrama de Moody, mostrado en la Figura A.1, Apéndice A, en el cual se determina el factor de fricción ( $f$ ):

$$f \approx 0.027$$

$$H_f = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (3.2)$$

$$H_f = 0.027 \times \frac{312.33 \text{ ft}}{\left[ \frac{2}{12} \text{ ft} \right]} \times \frac{\left[ 62.64 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \right]^2}{2 \left[ 32.2 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \right]}$$

$$H_f = 3082.81 \text{ ft}$$

$$H_T = H_f + H_L$$

$$H_T = 3082.81 \text{ ft} + 262.47 \text{ ft}$$

$$H_T = 3345.27 \text{ ft.}$$

$$\Delta P = H_T \times \rho \times g \quad (3.1)$$

$$\Delta P = 3345.27 \text{ ft} \times 0.07217 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \times 32.2 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \times \left[ \frac{1 \text{ lbf}}{32.2 \text{ lbm} \cdot \text{ft}/\text{s}^2} \right]$$

$$\Delta P = 241.43 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} = 1.67 \frac{\text{Lbf}}{\text{plg}^2}$$

$$\Delta P = 1.67 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2} \times \frac{1}{14.5036} \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2}$$

$$\Delta P = 0.11 \text{ bar}$$

Esta caída de presión representa aproximadamente el 1.65% de pérdidas, la cual se encuentra dentro de los márgenes aceptables.

Seguidamente se procedió al cálculo con una tubería de hierro galvanizada de 1,5 pulg. De diámetro instalada en la red abierta.

En la Tabla #9, se muestra los datos de longitud equivalente de la tubería galvanizada de 1.5 pulg., las de los accesorios de esta red, son tomadas de la Tabla B3, Apéndice B.

**TABLA # 9.**  
**LONGITUD EQUIVALENTE DE ACCESORIOS DE 1.5 PULG.**  
**DE DIÁMETRO, PARA LA TUBERÍA GALVANIZADA**

<b>Accesorios</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Longitud Equivalente Unitario (m.)</b>	<b>Longitud Equivalente Total (m.)</b>
Codos 90°	3	2.4	7.2
Te	3	0.8	2.4
Válvulas esféricas	4	12	48
Uniones Universales	16	0.4	6.4
		<b>Total</b>	<b>64</b>

La longitud equivalente o cabezal de pérdidas por accesorios ( $H_L$ ) es igual a 64 metros = 203.22ft.

El cálculo de la velocidad del flujo del aire se efectúa por medio de la ecuación (3.3):

$$Q = v \times A \quad (3.3)$$

$$V = \frac{Q}{A} ;$$

$$V = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} ;$$

$$V = \frac{4 \times 82}{\pi \times \left[\frac{1.5}{12}\right]^2}$$

$$V = 111.36 \frac{ft}{s} = 34 \frac{m}{s}$$

Esta velocidad, está dentro del rango recomendable que es de 30 a 35 metros sobre segundos.

Se procedió a calcular el número de Reynolds, por medio de la ecuación (3.4):

$$Re = \frac{V \times Di \times \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{111.36 \frac{ft}{s} \times \left[\frac{1.5}{12} ft\right] \times 0.07217 \frac{lbm}{ft^3}}{1.265 \times 10^{-5} \frac{lbm}{ft \cdot s}}$$

$$Re = 7.94 \times 10^4$$

Para determinar la rugosidad equivalente  $\varepsilon$  para tubos, revisamos la Tabla de rugosidad para tubos de hierro galvanizado que es de 0.0005 ft, que se detalla en la Figura A.2,

Apéndice A

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{\text{Rugosidad Equivalente}}{\text{Diametro del tubo}}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.0005 \text{ ft}}{\left[ \frac{1.5}{12} \text{ ft} \right]}$$

$$\varepsilon = 0.004$$

Calculado el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se utiliza el diagrama de Moody, mostrado en la Figura A.1, Apéndice A, en el cual se determina el factor de fricción ( $f$ ):

$$f \approx 0.03$$

$$H_f = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (3.2)$$

$$H_f = 0.03 \times \frac{312.33 \text{ ft}}{\left[ \frac{1.5}{12} \text{ ft} \right]} \times \frac{\left[ 111.36 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \right]^2}{2 \left[ 32.2 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \right]}$$

$$H_f = 14434.36 \text{ ft}$$

$$H_T = H_f + H_L$$

$$H_T = 14434.36 \text{ ft} + 203.22 \text{ ft}$$

$$H_T = 14637.58 \text{ ft}$$

$$\Delta P = H_T \times \rho \times g \quad (3.1)$$

$$\Delta P = 14637.58 \text{ ft} \times 0.07217 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \times 32.2 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \times \left[ \frac{1 \text{ lbf}}{32.2 \text{ lbm} \cdot \text{ft}/\text{s}^2} \right]$$

$$\Delta P = 1056.39 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} = 7.336 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2}$$

$$\Delta P = 7.336 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2} \times \frac{1}{14.5036 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}}$$

$$\Delta P = 0.50 \text{ bar}$$

Esta caída de presión representa 7.14% de pérdidas, la cual se encuentra dentro de los márgenes aceptables.

Seguidamente se procedió al cálculo con una tubería de hierro galvanizada de 1,5 pulg. De diámetro, en la red de anillo cerrado.

En la Tabla #10, se muestra los datos de longitud equivalente de la tubería galvanizada de 1.5 pulg., las de los accesorios de esta red, son tomadas de la Tabla B3, Apéndice B.

**TABLA # 10.**  
**LONGITUD EQUIVALENTE DE ACCESORIOS DE 1.5 PULG.**  
**DE DIÁMETRO, PARA LA TUBERÍA GALVANIZADA**

<b>Accesorios</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Longitud Equivalente Unitario (m.)</b>	<b>Longitud Equivalente Total (m.)</b>
Codos 90°	8	2.4	19.2
Te	3	0.8	2.4
Válvulas	5	12	60
Uniones	33	0.4	13.2
		<b>Total</b>	<b>94.8</b>

La longitud equivalente o cabezal de perdidas por accesorios

( $H_L$ ) es igual a 94.8 metros = 311.02ft.

$$H_L = 311.02 \text{ ft.}$$

El cálculo de la velocidad del flujo del aire se efectúa por medio de la ecuación (3.3):

$$Q = v \times A$$

$$V = \frac{Q}{A} ;$$

$$V = \frac{Q}{\frac{\pi \times D^2}{4}} ;$$

$$V = \frac{4 \times 94}{\pi \times \left[\frac{1.5}{12}\right]^2}$$

$$V = 127.66 \frac{\text{ft}}{\text{s}} = 38.91 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Esta velocidad, no está dentro del rango del de aire comprimido recomendable que es de 30 a 35 metros sobre segundos.

Se procedió a calcular el número de Reynolds, por medio de la ecuación (3.4):

$$Re = \frac{V \times Di \times \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{127.66 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \times \left[\frac{1.5}{12} \text{ft}\right] \times 0.07217 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}}{1.265 \times 10^{-5} \frac{\text{lbm}}{\text{ft} \cdot \text{s}}}$$

$$Re = 9.1 \times 10^4$$

Para determinar la rugosidad equivalente  $\varepsilon$  para tubos, revisamos la Tabla de rugosidad para tubos de hierro galvanizado que es de 0.0005 ft, que se detalla en la Figura A.2, Apéndice A

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{\text{Rugosidad Equivalente}}{\text{Diametro del tubo}}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.0005\text{ft}}{\left[\frac{1.5}{12}\text{ft}\right]}$$

$$\varepsilon = 0.004$$

Calculado el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se utiliza el diagrama de Moody, mostrado en la Figura A.1, Apéndice A, en el cual se determina el factor de fricción ( $f$ ):

$$f \approx 0.028$$

$$H_f = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (3.2)$$

$$H_f = 0.028 \times \frac{665.84\text{ft}}{\left[\frac{1.5}{12}\text{ft}\right]} \times \frac{\left[127.66 \frac{\text{ft}}{\text{s}}\right]^2}{2\left[32.2 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2}\right]}$$

$$H_f = 37743.46 \text{ ft}$$

$$H_T = H_f + H_L$$

$$H_T = 37743.46 \text{ ft} + 311.02 \text{ ft}$$

$$H_T = 38054.48\text{ft.}$$

$$\Delta P = H_T \times \rho \times g \quad (3.1)$$

$$\Delta P = 38054.48 \text{ft} \times 0.07217 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \times 32.2 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \times \left[ \frac{1 \text{ lbf}}{32.2 \text{ lbm} \cdot \text{ft}/\text{s}^2} \right]$$

$$\Delta P = 2746.39 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} = 19.072 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2}$$

$$\Delta P = 19.072 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2} \times \frac{1}{14.5036 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2}}$$

$$\Delta P = 1.31 \text{bar}$$

Esta caída de presión representa un 18.78% de pérdidas, la cual no se encuentra dentro de los márgenes aceptables.

Seguidamente se procedió al cálculo con una tubería de hierro galvanizada de 2 pulg. De diámetro, en la red de anillo cerrado.

En la Tabla #11, se muestra los datos de longitud equivalente de la tubería galvanizada de 2 pulg., las de los accesorios de esta red, son tomadas de la Tabla B3, Apéndice B.

**TABLA # 11.**  
**LONGITUD EQUIVALENTE DE ACCESORIOS**  
**GALVANIZADOS DE 2 PULG. DE DIÁMETRO**

<b>Accesorios</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Longitud Equivalente Unitario (m.)</b>	<b>Longitud Equivalente Total (m.)</b>
Codos 90°	8	3	24
Te	3	1	3
Válvulas	5	15	75
Uniones	33	0.5	16.5
		<b>Total</b>	<b>118.5</b>

La longitud equivalente o cabezal de pérdidas por accesorios ( $H_L$ ) es igual a 118.5 metros = 388.78ft.

$$H_L = 388.78 \text{ ft.}$$

El cálculo de la velocidad del flujo del aire se efectúa por medio de la ecuación (3.3):

$$Q = v \times A$$

$$V = \frac{Q}{A} ;$$

$$V = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} ;$$

$$V = \frac{4 \times 94}{\pi \times \left[\frac{2}{12}\right]^2}$$

$$V = 71.81 \frac{ft}{s} = 21.88 \frac{m}{s}$$

Esta velocidad, no está dentro del rango del de aire comprimido recomendable que es de 30 a 35 m/s.

Se procedió a calcular el número de Reynolds, por medio de la ecuación (3.4):

$$Re = \frac{V \times Di \times \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{71.81 \frac{ft}{s} \times \left[\frac{2}{12} ft\right] \times 0.07217 \frac{lbm}{ft^3}}{1.265 \times 10^{-5} \frac{lbm}{ft \cdot s}}$$

$$Re = 6.8 \times 10^4$$

Para determinar la rugosidad equivalente  $\varepsilon$  para tubos, revisamos la Tabla de rugosidad para tubos de hierro galvanizado que es de 0.0005 ft, que se detalla en la Figura A.2, Apéndice A

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{\text{Rugosidad Equivalente}}{\text{Diametro del tubo}}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.0005ft}{\left[\frac{2}{12}ft\right]}$$

$$\varepsilon = 0.003$$

Calculado el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se utiliza el diagrama de Moody, mostrado en la Figura A.1, Apéndice A, en el cual se determina el factor de fricción ( $f$ ):

$$f \approx 0.027$$

$$H_f = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (3.2)$$

$$H_f = 0.027 \times \frac{665.84ft}{\left[\frac{2}{12}ft\right]} \times \frac{\left[71.81 \frac{ft}{s}\right]^2}{2\left[32.2 \frac{ft}{s^2}\right]}$$

$$H_f = 8637.12 \text{ ft}$$

$$H_T = H_f + H_L$$

$$H_T = 8637.12 \text{ ft} + 388.78 \text{ ft}$$

$$H_T = 9025.89ft.$$

$$\Delta P = H_T \times \rho \times g \quad (3.1)$$

$$\Delta P = 9025.89ft \times 0.07217 \frac{lbm}{ft^3} \times 32.2 \frac{ft}{s^2} \times \left[ \frac{1lb_f}{32.2lbm * ft/s^2} \right]$$

$$\Delta P = 651.39 \frac{lb_f}{ft^2} = 4.52 \frac{Lbf}{plg^2}$$

$$\Delta P = 4.52 \frac{lb_f}{plg^2} \times \frac{1}{14.5036 \frac{lb_f}{plg^2}}$$

$$\Delta P = 0.31 \text{ bar}$$

Esta caída de presión representa un 4.45% de pérdidas, la cual se encuentra dentro de los márgenes aceptables.

En la Tabla #12 se muestran un resumen de los cálculos de caída de presión.

**TABLA #12.**

**RESUMEN DE CAÍDAS DE PRESIÓN**

Tipo de red	Material de la tubería	Diámetro de la tubería	Caudal en CFM	Punto más alejado de la tubería (m)	Porcentaje de caída de presión (%)
Anillo Cerrado	Aluminio	40mm	94	203	9
Anillo Cerrado	Hierro Galvanizada	1,5 Pulgadas	94	203	18.78
Anillo Cerrado	Hierro Galvanizada	2 Pulgadas	94	203	4.45
Red Abierta	Hierro Galvanizada	2 Pulgadas	82	95.2	1.65
Red Abierta	Hierro Galvanizada	1,5 Pulgadas	82	95.2	7.14

### 3.2 Selección de Compresor

Para el requerimiento de la planta se necesita un generador de aire comprimido que abastezca unos 94 CFM a 7 bares, un compresor de 25 a 30 Hp se apegan a estas características técnicas.

Para la selección del compresor además de la presión y los CFM que puedan generar el equipo es necesario calcular la cantidad de agua que circula en el sistema de aire comprimido, para eso debemos conocer la temperatura y la humedad relativa del cuarto del compresor, los datos tomados en el cuarto de compresor fueron los siguientes:

Temperatura de bulbo seco: 32.2°C

Temperatura de bulbo húmedo: 25.6°C

La humedad relativa se obtuvo utilizando una carta psicométrica que se indica en la Figura A.4, Apéndice A por medio de las temperaturas de bulbo seco y húmedo.

Se realiza el siguiente cálculo para determinar la cantidad de agua que circula en la red de aire comprimido debido al compresor Atlas Copco GA30.

Se asume que el aire es un gas ideal.

Datos:

$V = 82 \text{ CFM} = 2.32 \text{ m}^3$  volumen de aire que ingresa al compresor en un minuto.

$P = 101.35 \text{ KPa}$ .

$T = 30^\circ\text{C} = 303^\circ\text{K}$ , esta es la temperatura media del sitio donde está ubicado el compresor.

Humedad relativa  $\phi = 72\%$

De la ecuación 3.4 de humedad relativa, se determina la presión de vapor de agua

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} \quad (3.5)$$

$P_v$ : Presión de vapor de agua.

$P_g$ : Presión de saturación del agua a cierta temperatura.

$P_g$  a  $30^\circ\text{C} = 4.2469 \text{ KPa}$  (Tabla B.4 Apéndice B ).

$$P_v = \phi \cdot P_g$$

$$P_v = (0.72) \times (4.2469)$$

$$P_v = 3.057 \text{ KPa}$$

De la ecuación (3.5) del gas ideal se calcula la masa de vapor de agua contenido en un volumen de  $2.32 \text{ m}^3$  de aire a una temperatura de  $30^\circ\text{C}$ .

$$M_v = \frac{P_v V}{R_v T} \quad (3.6)$$

$M_v$  = Masa de vapor de agua

$$P_v = 3.057 \text{ Kpa}$$

$$V = 2.32 \text{ m}^3$$

$R_v = 0.4615 \frac{\text{Kpa} \cdot \text{m}^3}{^\circ\text{K} \cdot \text{Kg}}$  constante de gas vapor de agua (Tabla B.5,

Apéndice B).

$$T = 303^\circ\text{K}$$

$$M_v = \frac{P_v V}{R_v T} \quad (3.7)$$

$$M_v = \frac{3.057 \text{ KPa} \times 2.32 \text{ m}^3}{0.4615 \frac{\text{Kpa}}{\text{K} \cdot \text{Kg}} \cdot \text{m}^3 \times 303 \text{ K}}$$

$$M_v = 0.051 \text{ Kg de vapor de agua}$$

La densidad del agua a 30°C es  $995.7 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ; (Tabla B.6 Apéndice B).

Para calcular el volumen del agua utilizamos la siguiente formula:

$$\rho = \frac{M_v}{V_{\text{agua}}} \quad (3.8)$$

$$V_{\text{agua}} = \frac{0.051 \text{ Kg}}{995.7 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V_{\text{agua}} = 5.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$V_{\text{agua}} = 5.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3 = 0.051 \text{ litros}$$

El volumen de agua que ingresa al sistema debido al compresor es de 0.051 litros por minuto.

### 3.3 Selección de secador

El objetivo final es determinar el caudal corregido de aire que ingresa al secador, pues, la cantidad de agua contenida en el aire comprimido en distintas condiciones de operaciones no es la misma. Los factores más importantes que influyen son: temperatura de ambiente, presión de compresión, temperatura después de la compresión (que es la de la entrada del secador) y la temperatura

de enfriamiento que se fija en el secador, estos factores se muestran en la Tabla #13.

**TABLA #13.**

**FACTORES PARA LA SELECCIÓN DEL SECADOR.**

Factores multiplicadores Fi							
Presión de entrada	4	5	7	8	10	12	14
Fp	0.77	0.85	1	1.06	1.15	1.21	1.25
Temperatura ambiente (tbs)	25	30	35	40	45		
Fa	1	0.98	0.95	0.9	0.8		
Temperatura de entrada	30	35	40	45	50	55	
Fi	1.2	1	0.85	0.75	0.61	0.49	
Temperatura de enfriamiento	3	5	7	10			
Fr	1	1.09	1.18	1.38	0.61	0.49	

*Imagen tomada de la referencia [12]*

Cuando la temperatura ambiente es de 30°C, el (Fa) factor de corrección es 0.98.

Presión de Compresión es 100 psig, el (Fp) factor de corrección es 1

Temperatura de entrada es 35°C, el (Fi) factor de corrección es 1

Temperatura de enfriamiento es de 5°C, el (Fr) factor de corrección es de 1.09.

Caudal Corregido = Caudal x Fp x Fa x Fi x Fr

Caudal Corregido = 94 CFM x 1 x 0.98 x 1 x 1.09

Caudal Corregido = 100.41 CFM

Bajo esta característica se necesita un compresor frigorífico de  $\frac{3}{4}$  Hp, tal como se muestra en la Tabla # 14.

**TABLA # 14.**

**SELECCIÓN DEL SECADOR.**

Secador	Caudal de aire corregido			Compresor frigorífico		
	Alfaire	ft <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /h	lt/min	kW	HP
SE-20		10	17	283	0.29	1/6
SE-40		20	34	567	0.36	1/5
SE-60		30	51	850	0.45	1/4
SE-70		40	68	1,133	0.58	1/3
SE-100		60	102	1,700	0.86	1/2
SE-140		80	136	2,267	0.86	1/2
SE-170		100	170	2,833	1.2	3/4
SE-220		130	221	3,683	1.2	3/4
SE-260		150	255	4,250	1.2	3/4
SE-380		220	374	6,233	1.75	1
SE-430		250	425	7,083	2.63	1 1/2
SE-560		330	561	9,350	2.63	1 1/2
SE-680		400	680	11,333	3.5	2
SE-850		500	850	14,167	5.25	3
SE-1100		650	1,105	18,417	5.25	3
SE-1400		800	1,360	22,667	7	4
SE-1700		1,000	1,700	28,333	8.75	5
SE-2000		1,200	2,040	34,000	8.75	5
SE-2500		1,500	2,550	42,500	13	7 1/2
SE-3400		2,000	3,400	56,667	17.5	10
SE-4300		2,500	4,250	70,833	30	17
SE-5100		3,000	5,100	85,000	35	20

*Imagen tomada de la referencia [12]*

### 3.4 Selección de la capacidad del tanque pulmón

Para dimensionar el tanque acumulador se utiliza una ley empírica que indica que por cada CFM de consumo se le asigna un volumen de 4 galones al tanque pulmón.

$$V_t = 4 \text{ galones} \times c/cfm$$

$$V_t = 4 \times 102.5$$

$$V_t = 410 \text{ Galones} = 1.86 \text{ m}^3$$

Actualmente en las instalaciones de la empresa, tema de estudio, existe un tanque pulmón de  $1 \text{ m}^3$ , que mediante cálculos efectuados el volumen del tanque pulmón se debe aproximar a  $2 \text{ m}^3$ , por lo tanto se debe contar con otro tanque pulmón adicional de similares características al actual instalado en la planta.

Las dimensiones actuales del tanque acumulador están detalladas en el Figura A.5, Apéndice A.

### 3.5 Selección de los filtros coalescentes y de partículas

El filtrado se realiza de manera progresiva, ya que el aire que se requiere en la planta no debe ser de tan alta calidad como la que se requeriría para uso en actividades humanas de buceo. Lo que se desea es que el aire suministrado a las máquinas y componentes

neumáticos como son las electroválvulas, actuadores y embragues neumáticos sean libres de partículas y de humedad.

El filtro coalescente y dos filtros de partículas (uno de 10 micras y otro de 5 micras) serán distribuidos de la siguiente manera:

El filtro de partículas de 10 micras se coloca después del tanque pulmón, luego seguido a esta línea se coloca un filtro de partículas de 5 micras que está localizado antes del secador de aire, finalmente el filtro coalescente se coloca después del secador y luego este aire filtrado va a ser suministrado por las tuberías a las maquinas.

# CAPÍTULO 4

## 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

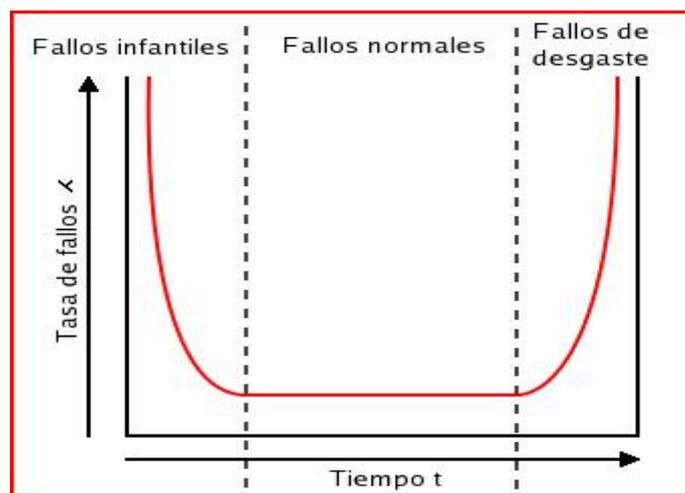
### 4.1 Análisis Técnico

El análisis técnico del proyecto comprende desde la unidad generadora, el tratamiento y el transporte del aire comprimido.

El actual compresor es un compresor de tornillos de 40 hp que suministra hasta 161 CFM a una presión de trabajo de 7 bar, el cual según los datos adquiridos en la auditoría de aire comprimido que se realizó en la planta que es tema de estudio, está sobredimensionado, ya que la planta actualmente necesita unos 82 CFM con una presión de trabajo de 7 bar, pero hay que tener en cuenta que la planta en un futuro se puede expandir en lo que es aumento de líneas y por eso el caudal medido en la auditoría se le debe aumentar un 15% de su valor, que vendrá a hacer 94 CFM, con estas características un compresor de 30 hp se ajusta al requerimiento de la planta, ya que en sus características técnicas puede suministrar una presión de 7 bar y proporcione un caudal mayor o igual a los 100 CFM, existen

compresores de diferentes marcas en el mercado de 30 Hp, que pueden suministrar 100 a 139 CFM, que está en un rango a lo que requiere la planta.

Una razón por la cual el compresor actual, debería ser cambiado es debido a que tiene 23 años de servicio y por la curva de la bañera, mostrada en la figura 4.1, se encuentra en la etapa fallos producidos por desgastes, debido al transcurso del tiempo y adicional porque se complica encontrar repuestos de ese modelo de compresor.



*Imagen tomada de la referencia [12]*

**FIG.4.1 CURVA DE LA BAÑERA**

El secador que está en la planta actualmente es refrigerativo y no está operativo y por ende no elimina la humedad del aire, por lo que la falta de este proceso está perjudicando algunos equipos en las líneas de fabricación, debido al exceso de humedad en el aire. El proceso de secado se realizara a través de un secador con una

capacidad de  $\frac{3}{4}$  Hp de potencia para un compresor refrigerativo, que soporte una presión de 7 bar y 94 CFM.

El tanque pulmón que se encuentra operando actualmente es de 1 m<sup>3</sup>, y según los cálculos realizados se necesitan 2 m<sup>3</sup> de capacidad, para llegar a ese volumen, se necesita adquirir un tanque de 1 m<sup>3</sup>.

Los filtros que están instalados actualmente en la planta son dos de partículas (5 y 10 micras) y uno coalescente, estos pueden soportar una presión y temperatura máxima de 250 psi y 175°F, solo se debe cambiar los elementos filtrantes, ya que la carcasa se encuentra en buen estado.

La tubería actual es de hierro galvanizada de 2 pulgadas de diámetro, y presenta en su superficie interna corrosión. El área técnica de la empresa decidió utilizar otro material en las tuberías que presente ciertas ventajas técnicas con respecto a las tuberías de hierro galvanizadas, ya que la corrosión producida en las tuberías actuales ha provocado daños en los equipos neumáticos de las líneas de fabricación provocando paradas de producción.

**Las ventajas de la tubería de aluminio con respecto a la tubería de acero son las siguientes:**

La condensación que se forma en las tuberías de hierro galvanizado, ocasiona la formación de óxido en el interior, que contamina con rapidez el suministro de aire e incrementar la pérdida de presión a través del sistema, el óxido perfora las tuberías y provoca fugas de aire, como se muestra en la figura 4.2 una tubería de 2 pulgadas de diámetro de hierro galvanizado utilizada en la red de tubería abierta.



**FIG. 4.2. TUBERÍA GALVANIZADA DE 2 PULGADAS DE DIÁMETRO**

Una de las propiedades del aluminio es que es resistente a la corrosión, al contacto con el aire se cubre rápidamente con una capa dura y transparente de óxido de aluminio que resiste a la corrosión, su densidad es de  $2.70 \text{ g/cm}^3$ , comparada con la del acero que es de  $7.85 \text{ g/m}^3$ , es un metal ligero, es maleable y dúctil pero que tiene escasa resistencia mecánica.

El bajo coeficiente de rugosidad del aluminio con respecto a la del acero para un mismo diámetro, ocasiona menores pérdidas de presión del aire comprimido en las tuberías. En la figura 4.3 se muestra una tubería de aluminio de 40 mm. de diámetro.

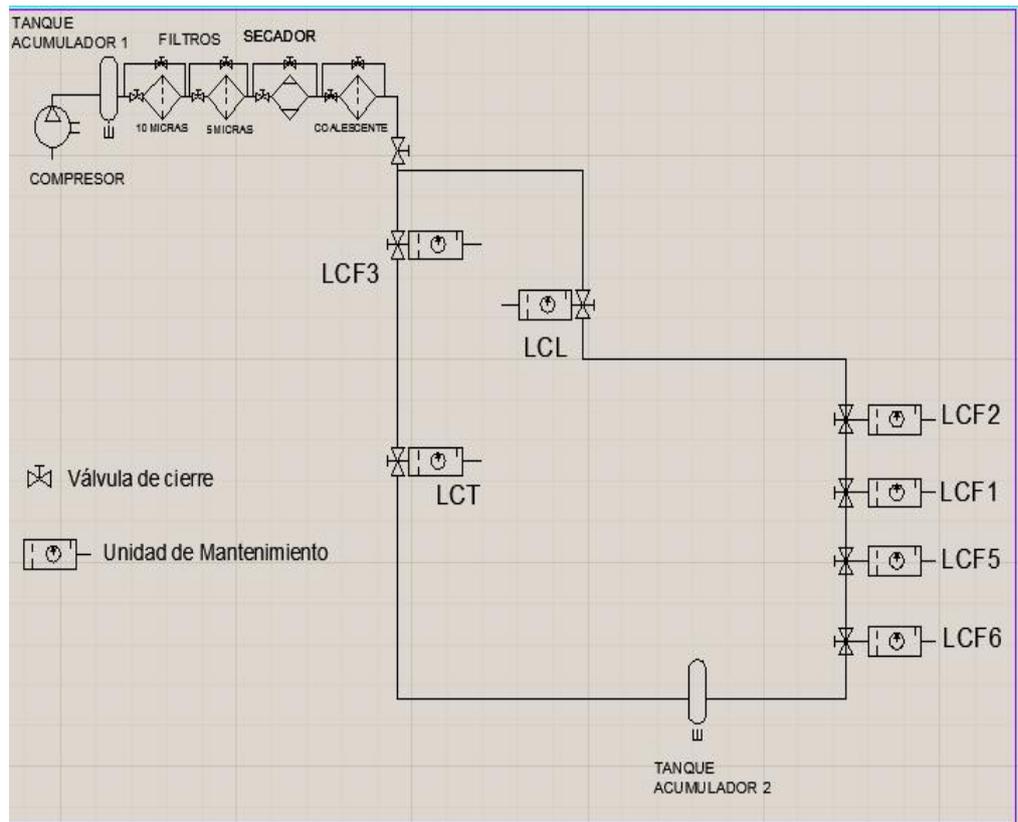


**FIG. 4.3 TUBERÍA DE ALUMINIO DE 40MM DE DIÁMETRO**

La rapidez de la instalación de la tubería de aluminio, con respecto a la de tubería de hierro galvanizado que utiliza uniones roscadas y cuya instalación toma más tiempo, se debe al acoplamiento rápido tipo racor, las piezas pueden desmontarse y volver a montarse en cuestión de minutos, adicionalmente la tubería de aluminio es más liviana que la de hierro galvanizado en el manipuleo para su instalación.

### Tipo de la red de tubería.

En la figura 4.4 se muestra la propuesta del nuevo tendido de la tubería de aire comprimido.



**FIG. 4.4 ESQUEMA DE LA NUEVA TRAYECTORIA DEL TENDIDO DE LA TUBERÍA**

Con este tipo de montaje de la red de aire comprimido se obtiene una alimentación uniforme cuando el consumo de aire es alto. El aire puede ser conducido en dos direcciones. Ciertos tramos de la red de tuberías pueden ser bloqueadas mediante válvulas de cierre (correderas), en el caso de que haya que separarlas para efectuar

reparaciones y trabajos de mantenimiento. También existe la posibilidad de comprobar fallas de estanqueidad.

En el plano A3, Apéndice C se muestra el plano isométrico de la propuesta de anillo cerrado o también llamada red cerrada, en la cual las tuberías de aire comprimido tendrían que pasar por las ménsulas, mostrado en la figura 4.5 que soportan los rieles donde se desplazan los puentes grúas, localizados a siete metros de altura con respecto al piso del galpón.

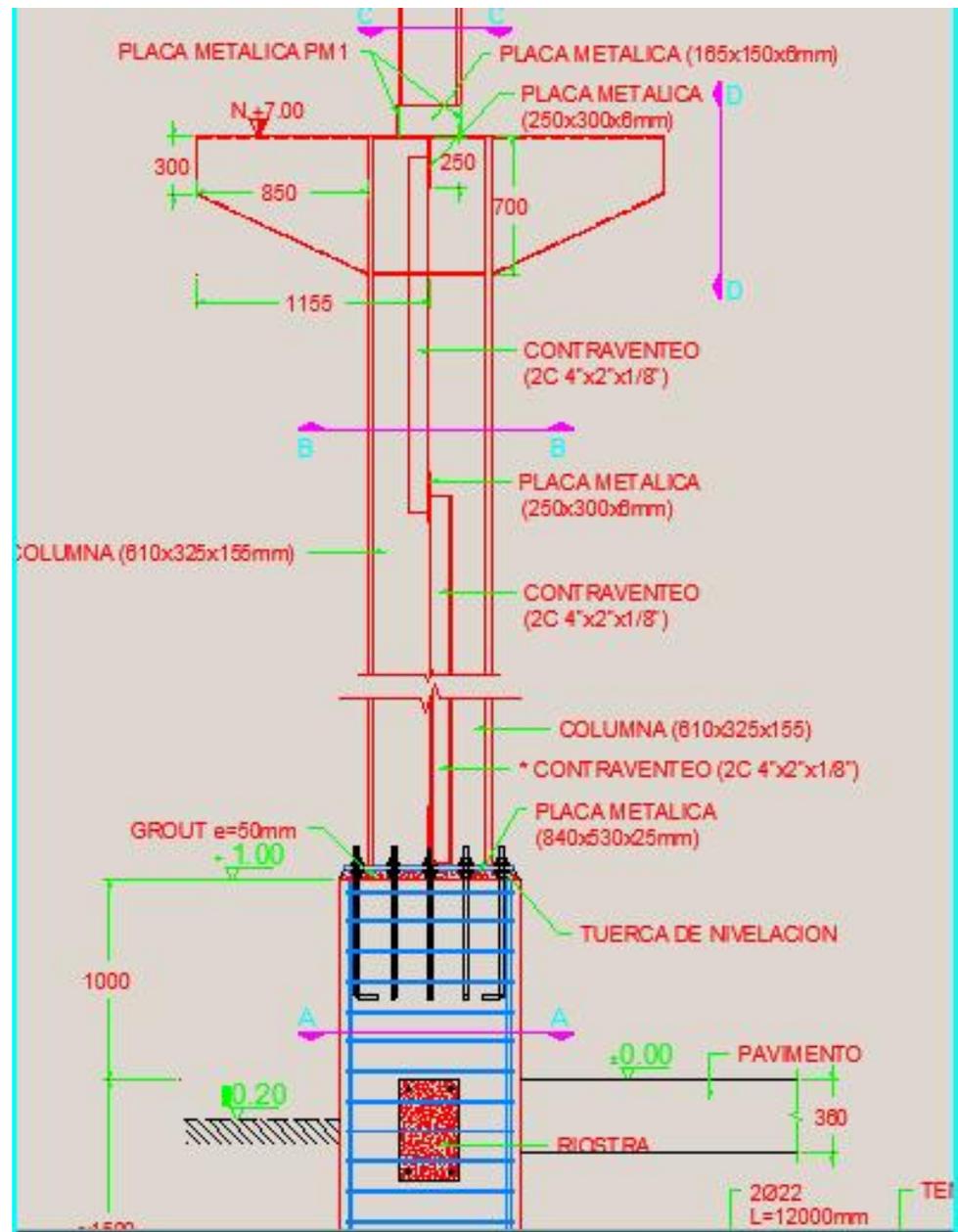
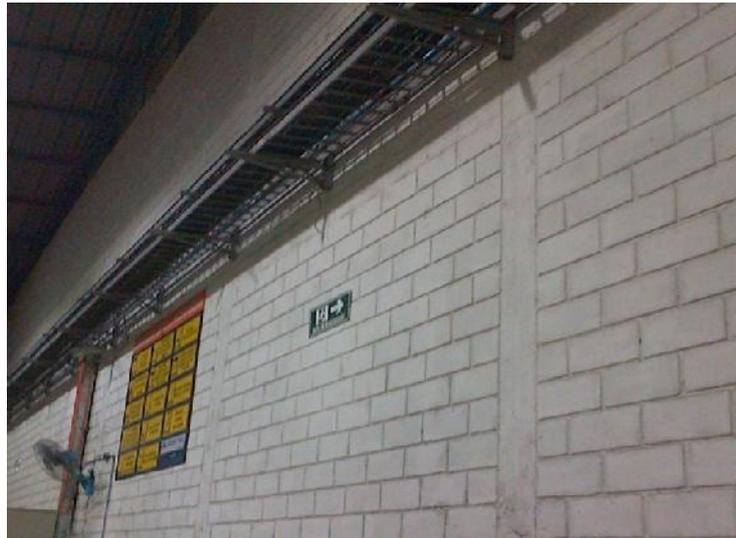


FIG. 4.5 DETALLE DE PILAR CON LA MÉNSULA

Las canaletas de cables eléctricos, mostrados en la figura 4.6, están colocadas a la altura de seis metros de altura con respecto al piso del galpón.



**FIG. 4.6 CANALETAS ELÉCTRICAS.**

Debido a que en las instalaciones de la planta se trabaja con puentes grúas para llevar la materia prima y producto terminado, no se debe dejar tuberías a media altura ya que estas podrían obstaculizar el transporte de la carga.

La figura 4.7 permite observar cómo están colocados los puentes grúas.



**FIG. 4.7 PUENTES GRÚAS EN EL NUEVO GALPÓN**

En la construcción de este nuevo galpón se construyeron dos trincheras cerca de las máquinas, las cuales están destinadas para que pasen las acometidas eléctricas y también las líneas de aire comprimido, como se muestra en la figura 4.8



**FIG. 4.8 TRINCHERAS PARA EL PASO DE ACOMETIDAS Y TUBERÍAS DE AIRE COMPRIMIDO.**

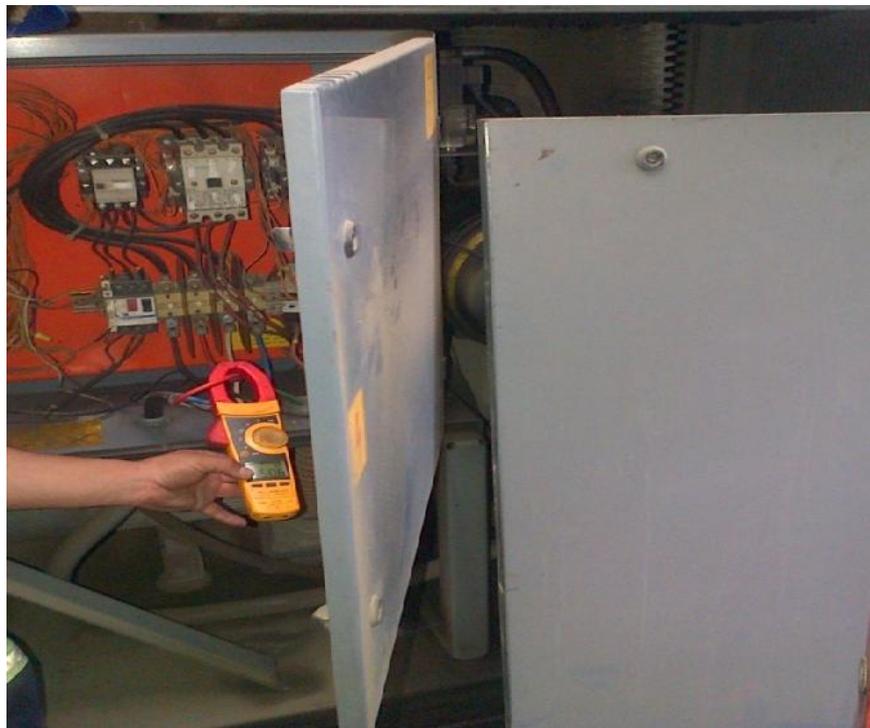
En esta configuración la línea principal constituye un anillo. La inversión inicial de este tipo de red es mayor que si fuera abierta. Sin embargo, con ella se facilitan las labores de mantenimiento de manera importante puesto que ciertas partes de ella pueden ser aisladas sin afectar la producción.

## **4.2 Análisis Económico**

El análisis económico que vamos a realizar en este proyecto ha sido dividido de la siguiente manera:

- Costo de equipos y accesorios
- Costo de Mano de obra

El costo de operar un compresor de 40 Hp que está sobredimensionado para la capacidad de la planta. El personal de mantenimiento eléctrico de la empresa tema de estudio, realizo mediciones del compresor marca Atlas Copco, modelo GA30, tal como se muestra en la figura 4.9.



**FIG. 4.9 TOMA DE AMPERAJE Y VOLTAJE  
EN COMPRESOR GA30**

Se midió los amperajes en carga y descarga y también el voltaje, cuyos valores se presentó en la Tabla #15.

TABLA #15.

## DATOS TOMADOS DEL COMPRESOR GA30

Compresor GA 30 - 40HP	
CFM	161
Voltaje (Voltios)	460
Amperaje en carga (Amperaje)	54
Amperaje en descarga (Amperaje)	23
Potencia en Carga (KW)	24,84
Potencia en Vacío (KW)	10,58

En la auditoria de aire comprimido, que se realizó en la planta, tema de estudio, se midió la eficiencia del equipo generador, la cual es:

$$\text{Eficiencia del generador de aire comprimido: } \frac{42.34 \text{ Kw}}{100 \text{ cfm}}$$

El costo de la energía eléctrica del año 2012 de operación del compresor GA30 esta detallado en la siguiente Tabla # 16, datos que fueron tomados de los registros del departamento de mantenimiento eléctrico de la empresa tema de estudio, que registran los consumos mensuales de los kilovatios de todas las áreas de la planta, como se muestra en la Figura A.6, Apéndice A donde se detalla los consumos por área de la planta.

**TABLA # 16**

**CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**DEL COMPRESOR MARCA ATLAS COPCO GA30.**

<b>Consumo de Energía del Año 2012 del compresor Atlas Copco GA30</b>		
<b>Meses</b>	<b>KWH</b>	<b>PRECIO</b>
Enero	4109,8	\$ 302,69
Febrero	3899,2	\$ 294,86
Marzo	4109,7	\$ 278,90
Abril	4021,7	\$ 304,49
Mayo	3746,7	\$ 262,41
Junio	3405,6	\$ 303,37
Julio	3114,72	\$ 287,09
Agosto	4698,62	\$ 406,58
Septiembre	5042,2	\$ 431,73
Octubre	5191,8	\$ 445,74
Noviembre	5698,35	\$ 475,56
Diciembre	4258,6	\$ 355,40
TOTAL	51296,99	\$ 4.148,82

Los valores del consumo de energía promedio al año de la operación del compresor GA30 en kW-h es de 4274.74, y el consumo anual es de 51296.99 KW-h, que multiplicando este consumo por el precio del kW-h que es de \$0.08 centavos de dólares americanos, el costo mensual promedio alcanza la cifra de \$345.73 y el costo anual es de \$4148.82.

Ahora se analiza un compresor de tornillos 30 HP, marca Kaeser, modelo AS-30, que una empresa local facilito los siguientes datos, mostrados en la Tabla #17.

**TABLA #17.**

**DATOS DEL COMPRESOR AS30**

<b>COMPRESOR AS – 30HP</b>	
CFM	124
Potencia en Carga (KW)	25.88
Potencia en Vacío (KW)	6.90
Eficiencia de la estación kWh/CFM	34.28 KWh / [100 CFM]

Según los datos de la Tabla #17 todas las características, se ajustan al requerimiento de la planta que es tema de estudio.

Para calcular el ahorro energético (A.E.) por el uso de un compresor de 30 Hp, se divide las dos eficiencias de los dos compresores (40 Hp y el de 30Hp):

$$A.E. = \frac{\text{Eficiencia del compresor de 30 Hp}}{\text{Eficiencia del compresor de 40 Hp}} = \frac{34.28Kw/100cfm}{42.34Kw/100cfm}$$

$$A.E. = 80.96\%$$

Al operar con un compresor de 30 HP se obtendría un 19.04% de Ahorro energético.

Es decir, al año el compresor de 40 HP genera un costo de US\$ 4148.82 y si operaría la planta industrial con un compresor de 30HP se ahorraría US\$ 789.93 anuales.

El costo de equipos y materiales para implementar el proyecto de rediseño del sistema de aire comprimido para la planta que es tema de estudio, en la cual se detalla los precios de la unidad generadora de

aire comprimido de 30 HP, la unidad secadora de aire que tiene que ser reemplazada por la actual, los elementos de los filtros de partículas y un tanque pulmón de 1 metro cúbico.

La tubería se cotizo en material de aluminio, a pesar que su costo es más elevado en comparación con las tuberías de hierro galvanizado, pero sus beneficios se reflejaran a largo plazo debido a las bondades del material de aluminio, ventajas que fueron descritos en el análisis técnico. En la Tabla #18 se muestra los datos de las cotizaciones de los equipos y materiales.

TABLA # 18.

## COTIZACIÓN DE EQUIPOS Y MATERIALES

Cantidad	Especificaciones	Valor Unitario (USD)	Valor Total(USD)
1	Compresor de 30 Hp AS30 DE 132 CFM - 125 psig	\$ 18.014,63	\$ 18.014,63
1	Secador Frigorífico TC36 - 137CFM	\$ 5.985,00	\$ 5.985,00
1	Elemento del filtro de Partícula 10 micras HN5S - 100WSUY	\$ 80,00	\$ 80,00
1	Elemento del filtro de Partícula 5 micras HN8S - 6CUY	\$ 80,00	\$ 80,00
1	Elemento del filtro de Coalescente HN5S - 10CUY	\$ 70,00	\$ 70,00
1	Tanque de Almacenamiento de aire de 1000 m3 Marca Thunder TW	\$ 1.500,00	\$ 1.500,00
56	Tubos de 40mm Aluminio azul de 6000mm	\$ 164,28	\$ 9.199,68
14	Codos 90° de 40 mm para tubería de Aluminio	\$ 57,66	\$ 807,24
10	Te de 40mm para tubería de Aluminio	\$ 37,58	\$ 375,80
15	Válvulas de cierre para tubería de Aluminio	\$ 65,89	\$ 988,35
40	Uniones de 40mm para tubería de Aluminio	\$ 46,19	\$ 1.847,60
66	Clip de Fijación	\$ 3,51	\$ 231,66
	Sub - Total		\$ 39.179,96
	IVA 12%		\$ 4.701,60
	<b>Total</b>		<b>\$ 43.881,56</b>

### Costos por instalación de tuberías de aluminio.

El precio por instalación de tuberías de aluminio fue cotizado por metros lineales instalados, cuyo costo asciende a  $\frac{\$4 \text{ dólares}}{\text{metro}}$ , tal como se muestra en la Tabla #19.

**TABLA # 19.**

### COTIZACIÓN DE INSTALACIÓN DE TUBERÍA.

<b>Cantidad</b>	<b>Especificaciones</b>	<b>Valor Unitario (USD)</b>	<b>Valor Total(USD)</b>
329 metros	Instalación de red de tubería de aluminio en anillo cerrado de 329 metros lineales, la cual intervienen 1 supervisor de Obra y 2 mecánicos, duración de la instalación cinco días.	\$ 4,00	\$ 1.316,00
		Subtotal	\$ 1.31600,00
		IVA 12%	\$ 157,92
		<b>Total</b>	<b>\$ 1.473.92</b>

La instalación del compresor y el secador no tiene costo alguno, ya que son instalados por las empresas proveedoras de los equipos para garantizar su funcionamiento. La instalación de los elementos de los filtros de partículas y los coalescentes son realizados por personal del Departamento de Mantenimiento de la empresa tema de estudio.

En el costo total del proyecto interviene la compra de los equipos, materiales e instalación de las tuberías, detallados en la Tabla #20.

**TABLA #20.**

**COTIZACIÓN DE COSTO TOTAL DEL PROYECTO**

<b>Costo del Proyecto</b>	
Costo de Materiales	\$ 43,881.56
Costo de Instalación	\$ 1,473.92
<b>Costo Total</b>	<b>\$ 45,355.48</b>

El costo total de implementación del proyecto es de \$ 45,355.48 dólares americanos.

# CAPÍTULO 5

## 5.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

1. El compresor actual está sobredimensionado, debido en que la auditoria de aire comprimido, se midió el consumo de caudal en CFM y solo opera un 51% de su capacidad.
2. Es necesario la adquisición de un nuevo secador de aire comprimido, para el buen tratamiento al aire comprimido.
3. El sistema generador y tratamiento de aire comprimido para la planta tema de estudio, debe estar constituido por: compresor, filtros de partículas 10 y 5 micras, tanque de almacenamiento, un secador de aire y un filtro coalescente.
4. La distribución de la red del aire comprimido tendrá una configuración de anillo cerrado, con el objetivo de mantener la presión constante en todos los puntos de consumo.

5. Aumentar la capacidad de almacenamiento de aire comprimido en el tanque pulmón a  $2 \text{ m}^3$ , debido a que el tanque pulmón actual tiene una capacidad de  $1 \text{ m}^3$ .

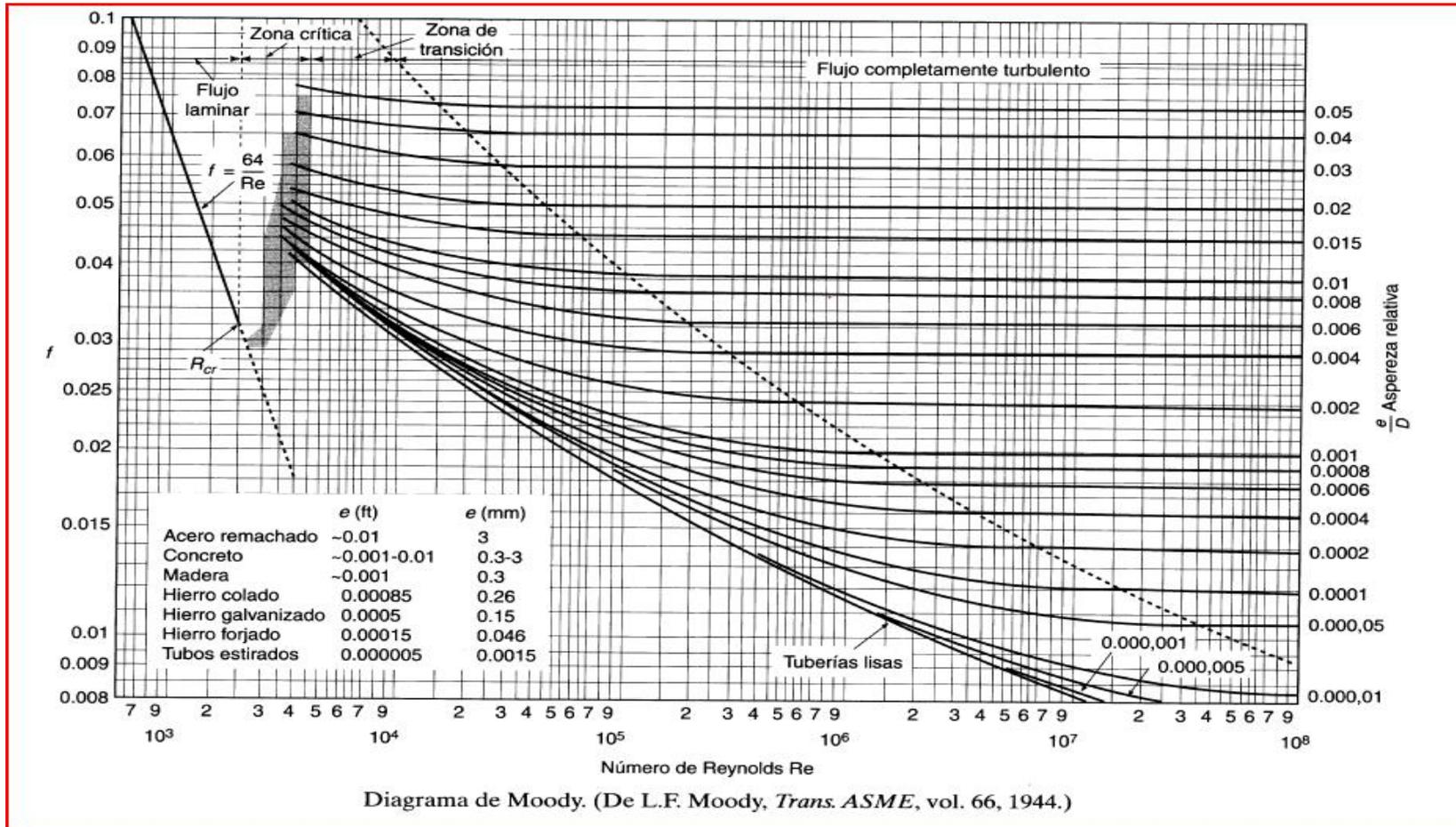
## 5.2 Recomendaciones

1. Instalar el compresor seleccionado, que tiene mayor eficiencia energética, el cual genera un ahorro en beneficio de la empresa.
2. Instalar el secador de aire seleccionado, para disminuir la excesiva humedad presentada en las unidades de mantenimiento que están causando daño en válvulas y actuadores neumáticos.
3. Se debe tener en cuenta que la causa más grande de caída de presión son los filtros saturados, por lo que se debe sustituir periódicamente.
4. Realizar un mantenimiento preventivo al sistema de tratamiento de aire comprimido, por ejemplo, cambios de lubricante, purga de agua del tanque pulmón, sustitución de elementos de filtros, verificación de fugas de aire de la red.

**APÉNDICE A**

**FIGURAS**

Figura A.1 Apéndice A diagrama de Moody.



gura

Figura A.2, Apéndice A rugosidad equivalente para la tubería de aluminio.

Valores de la Rugosidad Absoluta	
Material de construcción	Rugosidad (k: mm)
<u>Tuberías de plástico</u>	
Poliétileno (P.E.).....	0,002
Cloruro de polivinilo (PVC) .....	0,02
<u>Tuberías metálicas</u>	
Tuberías estiradas, sin soldaduras de latón, cobre, plomo.....	0,0015 - 0,01
Aluminio.....	0,015 - 0,06
<u>Acero estirado sin soldaduras:</u>	
Nuevas.....	0,02 - 0,10
Después de muchos años en servicio.....	1,2 - 1,5
<u>Acero galvanizado:</u>	
Nuevas, buena galvanización.....	0,07 - 0,10
Galvanización ordinaria.....	0,10 - 0,15
<u>Fundición:</u>	
Nuevas.....	0,25 - 1,00
Nuevas con revestimiento bituminoso.....	0,10 - 0,15
Asfaltadas.....	0,12 - 0,30
Después de varios años en servicio.....	1,00 - 4,00
<u>Hormigón y fibrocemento:</u>	
- <u>Hormigón:</u>	
Superficie muy lisa.....	0,3 - 0,8
Condiciones medias.....	2,5
Superficie rugosa.....	3 - 9
Hormigón armado.....	2,5
- <u>Fibrocemento (F.C.):</u>	
Nuevas.....	0,05 - 0,10
Después de varios años en uso.....	0,60

Figura A.3, Apéndice A rugosidad equivalente para la tubería galvanizada.

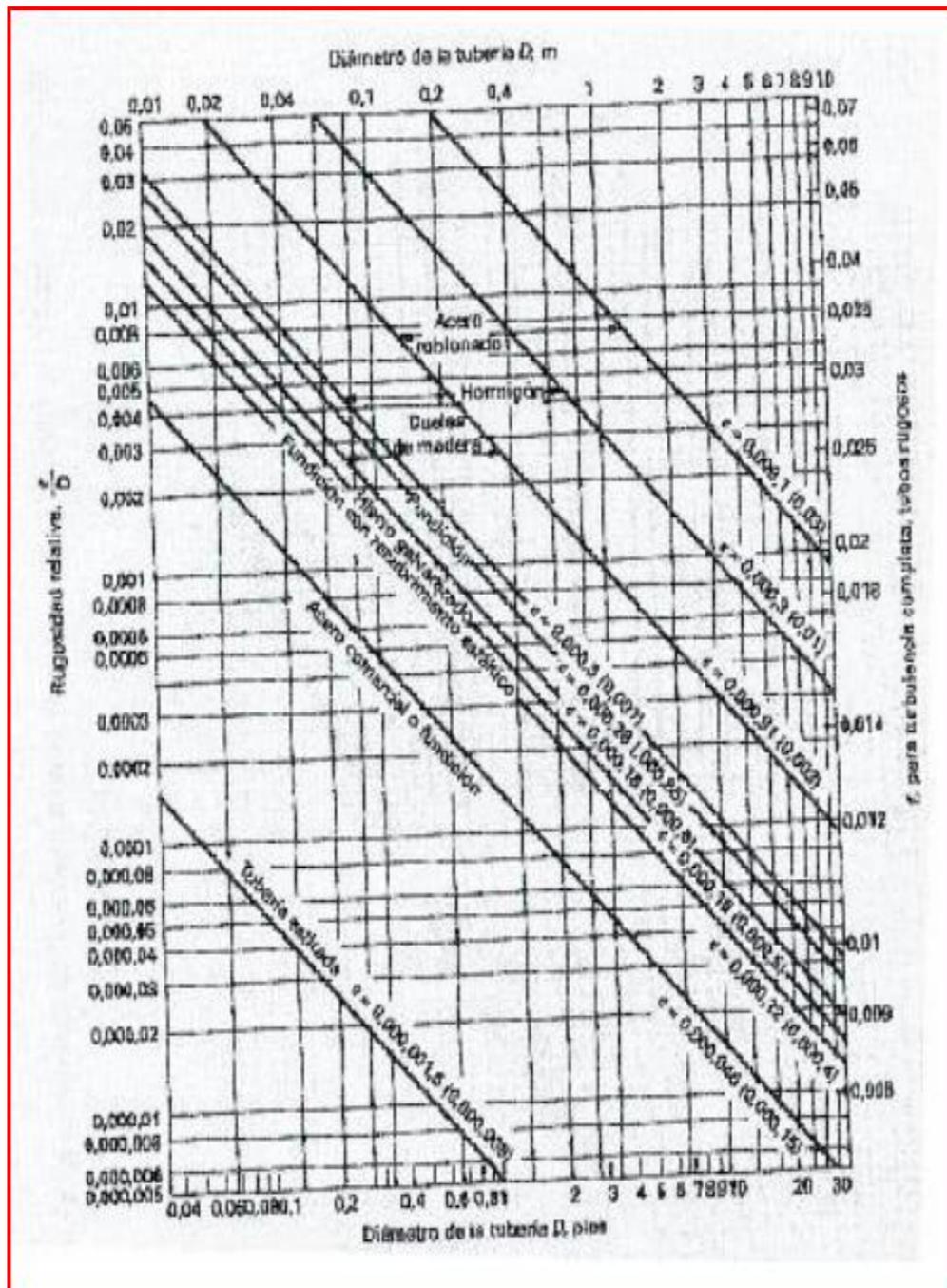


Figura A.4, Apéndice A carta psicrométrica.

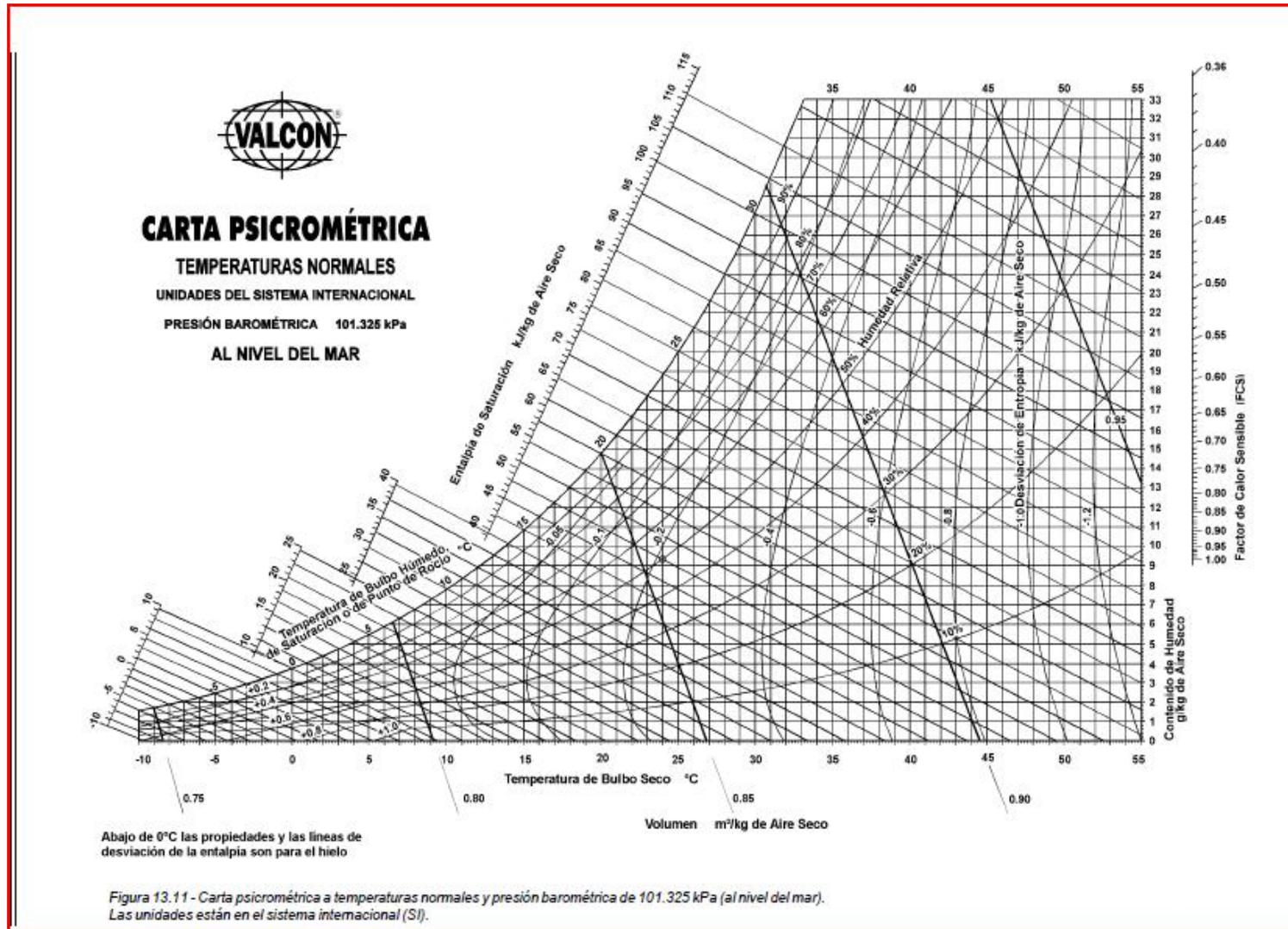


Figura A.5, Apéndice A dimensiones del tanque pulmón.

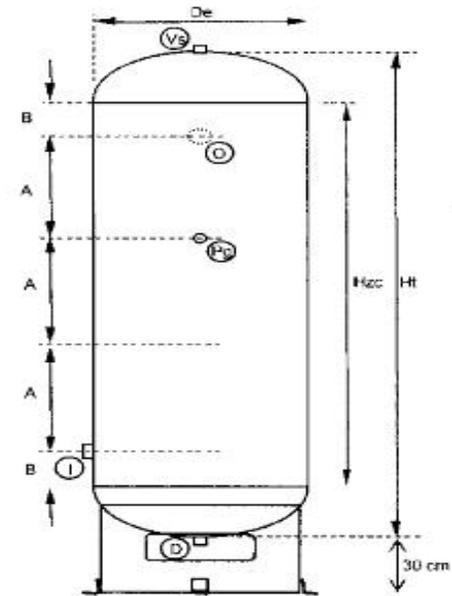


Vigencia: 01/10/2009

**Especificaciones Técnicas**

Modelo	Espesor mm	Material	Tiempo entrega	Acabado Int	Acabado Ext	Accs	comp
cv-35-125	6.00	A36/A283	5 días	Epox	Epox	No	SX
cv-70-125	6.00	A36/A283	7 días	Epox	Epox	No	SM
cv-85-125	6.00	A36/A283	7 días	Epox	Epox	No	SM/SK
cv-300-125	6.00	A36/A283	10 días	Epox	Epox	No	AS
cv-400-125-S	6.00	A36/A283	10 días	Epox	Epox	No	BS
cv-400-125	8.00	A36/A283	10 días	Epox	Epox	No	BS
cv-700-125	8.00	A36/A283	10 días	Epox	Epox	No	CS
cv-1000-125	10.00	A36/A283	15 días	Epox	Epox	No	DS

**División Construcciones & Proyectos**  
**Tanques de Presión para Aire Comprimido**  
**Fabricación Nacional**



Modelo	Capacidad		M. Presión (psig)	Dimensiones (mm)					Conexiones (mm)					Desarrollo mm	Peso Kg
	US gal	litros		De	Ht	Hcc	B	A	Vs	I	O	Pg	D		
cv-35-125	35	132.58	125.00	406	1,400.00	1,000.00	100.00	265.67	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	1,275.49	109.00
cv-70-125	70	265.15	125.00	508	1,620.00	1,220.00	100.00	340.00	12.70	19.05	19.05	12.70	12.70	1,586.93	171.00
cv-85-125	85	321.97	125.00	508	1,900.00	1,500.00	100.00	433.33	12.70	19.05	19.05	12.70	12.70	1,586.93	207.64
cv-300-125	300.00	1,136.36	125.00	810.00	2,400.00	2,000.00	200.00	533.33	12.70	38.10	38.10	12.70	19.05	2,544.70	520.00
cv-400-125-S	400.00	1,515.15	125.00	810.00	2,840.00	2,440.00	200.00	680.00	12.70	50.80	50.80	12.70	19.05	2,733.19	530.00
cv-400-125	400.00	1,515.15	125.00	940.00	2,400.00	2,000.00	200.00	533.33	12.70	50.80	50.80	12.70	19.05	2,953.10	670.00
cv-700-125	700.00	2,651.52	125.00	1,060.00	3,400.00	3,000.00	300.00	800.00	19.05	50.80	50.80	12.70	19.05	3,298.68	960.00
cv-1000-125	1,000.00	3,757.68	125.00	1,250.00	3,400.00	3,000.00	300.00	800.00	19.05	76.20	76.20	19.05	25.40	3,927.00	1,500.00

**Figura A.6, Apéndice A Consumo Mensuales de Kilovatios en Áreas de la Empresa tema de estudio**

<b>Distribución de Gastos por Energía Eléctrica del Mes de JUNIO 2012</b>									
<b>Edificio Administrativo</b>									
<b>Cuenta</b>	<b>Div/Dep/Cen</b>	<b>Departamento</b>	<b>EEA</b>	<b>M2</b>	<b>% A</b>	<b>% B</b>	<b>Monto A</b>	<b>Monto B</b>	<b>TOTAL</b>
73200505	04/ 48 /20	Manufactura Adm.	7	207	13%	12%	\$ 234,01	\$ 176,01	\$ 410,03
		Manufactura Planta	NA	201	NA	11%	NA	\$ 170,90	\$ 170,90
52200505	05/56/1	Despachos	NA	75	NA	4%	NA	\$ 63,30	\$ 63,30
	05/ 01 / 1	Comercial	13	385	25%	22%	\$ 434,60	\$ 326,76	\$ 761,35
		Instalación - Adm	4	104	8%	6%	\$ 133,72	\$ 88,33	\$ 222,06
		Instalación - Ope	NA	30	NA	2%	NA	\$ 25,32	\$ 25,32
51200505	10 / 102 /1	Compras	3	78	6%	4%	\$ 100,29	\$ 66,25	\$ 166,54
51200505	02 / 01 /1	Gerencia General	1	61	2%	3%	\$ 33,43	\$ 51,36	\$ 84,79
51200505	08 / 01 /1	Finanzas	10	296	19%	17%	\$ 334,30	\$ 251,39	\$ 585,69
51200505	09 / 90 /1	Gestión Humana	6	249	11%	14%	\$ 200,58	\$ 211,64	\$ 412,22
		Servicios Generales	NA	34	NA	2%	NA	\$ 29,17	\$ 29,17
		Seguridad Física	9	67	17%	4%	\$ 300,87	\$ 56,97	\$ 357,84
			53	1788	100%	100%			\$ 3.289,21

<b>Planta</b>				
<b>Cuenta</b>	<b>Div/Dep/Cen</b>	<b>Equipo/Linea</b>	<b>% C</b>	<b>Monto C</b>
73200505	04/ 41 /4	LC 1	25,0%	\$ 758,43
73200505	04/ 41 /5	LC 2	35,0%	\$ 1.061,80
73200505	04/ 41 /14	LC 5	6,0%	\$ 182,02
73200505	04/ 41 /15	LC 6	2,0%	\$ 60,67
73200505	04/ 42 /6	LC 3	2,0%	\$ 60,67
73200505	04/ 42 /13	LC 4	2,0%	\$ 60,67
73200505	04/ 43 /7	Sliter Automatico	10,0%	\$ 303,37
73200505	04/ 44 /8	Sliter Manual	1,0%	\$ 30,34
73200505	04/ 44 /9	Dobladoras	1,0%	\$ 30,34
73200505	04/ 44 /10	Prensas	0,5%	\$ 15,17
73200505	04/ 44 /11	Máquina de Angulos	0,5%	\$ 15,17
73200505	04/ 48 /19	Aire Comprimido	10,0%	\$ 303,37
73200505	04/ 48 /20	Otros, puente grua	5,0%	\$ 151,69
			100,0%	\$ 3.033,73

<b>Consumo mensual \$ x Medidor</b>		
<b>Medidor</b>	<b>KwH</b>	<b>\$</b>
A (Illum+PC)	19890	\$ 1.771,81
B (A/C)	17034	\$ 1.517,40
C (Planta)	34056	\$ 3.033,73
<b>TOTAL</b>	<b>70980</b>	<b>\$ 6.322,94</b>

# **APÉNDICE B**

## **TABLAS**

Tabla B.1

Propiedades de aire

Propiedades del aire a 1 atm de presión							
Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad específica $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl $Pr$
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-4}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-4}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-4}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-4}$	0.7263
-50	1.562	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-3}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-4}$	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	$1.356 \times 10^{-3}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-3}$	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	$1.465 \times 10^{-3}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-3}$	0.7421
-20	1.394	1005	0.02211	$1.578 \times 10^{-3}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-3}$	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	$1.696 \times 10^{-3}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-3}$	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	$1.814 \times 10^{-3}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-3}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-3}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-3}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-3}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-3}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-3}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-3}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-3}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-3}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-3}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-3}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-3}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-3}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-3}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-3}$	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	$2.346 \times 10^{-3}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-3}$	0.7253
45	1.109	1007	0.02699	$2.416 \times 10^{-3}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-3}$	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	$2.487 \times 10^{-3}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-3}$	0.7228
60	1.069	1007	0.02808	$2.632 \times 10^{-3}$	$2.006 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-3}$	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	$2.780 \times 10^{-3}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-3}$	0.7177
80	0.9894	1008	0.02953	$2.931 \times 10^{-3}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-3}$	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	$3.086 \times 10^{-3}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-3}$	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	$3.243 \times 10^{-3}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-3}$	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	$3.565 \times 10^{-3}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-3}$	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	$3.898 \times 10^{-3}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-3}$	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-3}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-3}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-3}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-3}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-3}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-3}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-3}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-3}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-3}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-3}$	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	$7.892 \times 10^{-3}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-3}$	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	$8.951 \times 10^{-3}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-3}$	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	$1.004 \times 10^{-2}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-3}$	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	$1.117 \times 10^{-2}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-3}$	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	$1.352 \times 10^{-2}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-3}$	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	$1.598 \times 10^{-2}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-2}$	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	$1.855 \times 10^{-2}$	$4.352 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-2}$	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	$2.122 \times 10^{-2}$	$4.560 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-2}$	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	$2.398 \times 10^{-2}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-2}$	0.7260
1500	0.2190	1234	0.09599	$3.908 \times 10^{-2}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-2}$	0.7428
2000	0.1553	1264	0.11113	$5.664 \times 10^{-2}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-2}$	0.7539

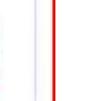
**Tabla B.2**

**Longitud equivalente para la tubería de aluminio.**

## PÉRDIDA DE CARGA

• longitudes equivalentes (en m)  
de tubo de aluminio *Transair*<sup>®</sup>

Para un metro de tubo de aluminio, los componentes *Transair*<sup>®</sup> tienen las longitudes equivalentes siguientes:

	válvula 4002	válvula 4089	codo 6602	té igual 6604		té de reducción 6604	unión doble 6606	reducción 6666	toma mural 6680	toma mural 6681	brida té 6662
Ø											
Ø16,5		0,14	0,70	0,80	0,15		0,14	0,12	0,56	1,47	
Ø25		0,35	2,08	2,10	0,36		0,35	0,40	3,64	3,98	23,85
Ø40	0,35		3,62	3,91	0,40		0,36	0,46			22,56
Ø63	0,70		4,71	4,16	0,52	4,62	0,40				

**Tabla B.3**

**Longitud equivalente de la tubería galvanizada**

Accesorios y válvulas expresados en pies (m) equivalente de tubería				
Accesorios y válvulas	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"
	(20 mm)	(25 mm)	(32 mm)	(40 mm)
Codo a 45°	1 (0,3)	1 (0,3)	1 (0,3)	2 (0,6)
Codo normalizado a 90°	2 (0,6)	2 (0,6)	3 (0,9)	4 (1,2)
Codo de gran radio a 90°	1 (0,3)	2 (0,6)	2 (0,6)	2 (0,6)
T o cruz (corriente que gira 90°)	4 (1,2)	5 (1,5)	6 (1,8)	8 (2,4)
Válvula de compuerta	---	---	---	---
Válvula de mariposa	---	---	---	---
Válvula de retención con clapeta oscilante*	4 (1,2)	5 (1,5)	7 (2,1)	9 (2,7)

Accesorios y válvulas expresados en pies (m) equivalente de tubería				
Accesorios y válvulas	2"	2 1/2"	3"	3 1/2"
	(50 mm)	(65 mm)	(80 mm)	(90 mm)
Codo a 45°	2 (0,6)	3 (0,9)	3 (0,9)	3 (0,9)
Codo normalizado a 90°	5 (1,5)	6 (1,8)	7 (2,1)	8 (2,4)
Codo de gran radio a 90°	3 (0,9)	4 (1,2)	5 (1,5)	5 (1,5)
T o cruz (corriente que gira 90°)	10 (3,1)	12 (3,7)	15 (4,6)	17 (5,2)
Válvula de compuerta	1 (0,3)	1 (0,3)	1 (0,3)	1 (0,3)
Válvula de mariposa	6 (1,8)	7 (2,1)	10 (3,1)	---
Válvula de retención con clapeta oscilante*	11 (3,4)	14 (4,3)	16 (4,9)	19 (5,8)

Tabla B.4

Tablas de temperatura para determinar la presión de saturación del agua.

Propiedades del agua saturada													
Temp. T, °C	Presión de saturación P <sub>sat</sub> , kPa	Densidad ρ, kg/m <sup>3</sup>		Entalpia de vaporización h <sub>fg</sub> , kJ/kg	Calor específico c <sub>p</sub> , J/kg · K		Conductividad térmica k, W/m · K		Viscosidad dinámica μ, kg/m · s		Número de Prandtl Pr		Coeficiente de expansión volumétrica β, 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792 × 10 <sup>-3</sup>	0.922 × 10 <sup>-3</sup>	13.5	1.00	-0.068 × 10 <sup>-3</sup>
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519 × 10 <sup>-3</sup>	0.934 × 10 <sup>-3</sup>	11.2	1.00	0.015 × 10 <sup>-3</sup>
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307 × 10 <sup>-3</sup>	0.946 × 10 <sup>-3</sup>	9.45	1.00	0.733 × 10 <sup>-3</sup>
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4186	1863	0.589	0.0179	1.138 × 10 <sup>-3</sup>	0.959 × 10 <sup>-3</sup>	8.09	1.00	0.138 × 10 <sup>-3</sup>
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002 × 10 <sup>-3</sup>	0.973 × 10 <sup>-3</sup>	7.01	1.00	0.195 × 10 <sup>-3</sup>
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891 × 10 <sup>-3</sup>	0.987 × 10 <sup>-3</sup>	6.14	1.00	0.247 × 10 <sup>-3</sup>
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798 × 10 <sup>-3</sup>	1.001 × 10 <sup>-3</sup>	5.42	1.00	0.294 × 10 <sup>-3</sup>
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720 × 10 <sup>-3</sup>	1.016 × 10 <sup>-3</sup>	4.83	1.00	0.337 × 10 <sup>-3</sup>
40	7.384	991.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653 × 10 <sup>-3</sup>	1.031 × 10 <sup>-3</sup>	4.32	1.00	0.377 × 10 <sup>-3</sup>
45	9.593	988.0	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596 × 10 <sup>-3</sup>	1.046 × 10 <sup>-3</sup>	3.91	1.00	0.415 × 10 <sup>-3</sup>
50	12.35	984.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547 × 10 <sup>-3</sup>	1.062 × 10 <sup>-3</sup>	3.55	1.00	0.451 × 10 <sup>-3</sup>
55	15.76	980.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504 × 10 <sup>-3</sup>	1.077 × 10 <sup>-3</sup>	3.25	1.00	0.484 × 10 <sup>-3</sup>
60	19.94	976.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467 × 10 <sup>-3</sup>	1.093 × 10 <sup>-3</sup>	2.99	1.00	0.517 × 10 <sup>-3</sup>
65	25.03	972.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433 × 10 <sup>-3</sup>	1.110 × 10 <sup>-3</sup>	2.75	1.00	0.548 × 10 <sup>-3</sup>
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404 × 10 <sup>-3</sup>	1.126 × 10 <sup>-3</sup>	2.55	1.00	0.578 × 10 <sup>-3</sup>
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378 × 10 <sup>-3</sup>	1.142 × 10 <sup>-3</sup>	2.38	1.00	0.607 × 10 <sup>-3</sup>
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355 × 10 <sup>-3</sup>	1.159 × 10 <sup>-3</sup>	2.22	1.00	0.635 × 10 <sup>-3</sup>
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333 × 10 <sup>-3</sup>	1.176 × 10 <sup>-3</sup>	2.08	1.00	0.670 × 10 <sup>-3</sup>
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315 × 10 <sup>-3</sup>	1.193 × 10 <sup>-3</sup>	1.96	1.00	0.702 × 10 <sup>-3</sup>
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	0.297 × 10 <sup>-3</sup>	1.210 × 10 <sup>-3</sup>	1.85	1.00	0.716 × 10 <sup>-3</sup>
100	101.33	957.9	0.5978	2257	4217	2029	0.679	0.0251	0.282 × 10 <sup>-3</sup>	1.227 × 10 <sup>-3</sup>	1.75	1.00	0.750 × 10 <sup>-3</sup>
110	143.27	950.6	0.8263	2230	4229	2071	0.682	0.0262	0.255 × 10 <sup>-3</sup>	1.261 × 10 <sup>-3</sup>	1.58	1.00	0.798 × 10 <sup>-3</sup>
120	198.53	943.4	1.121	2203	4244	2120	0.683	0.0275	0.232 × 10 <sup>-3</sup>	1.296 × 10 <sup>-3</sup>	1.44	1.00	0.858 × 10 <sup>-3</sup>
130	270.1	934.6	1.496	2174	4263	2177	0.684	0.0288	0.213 × 10 <sup>-3</sup>	1.330 × 10 <sup>-3</sup>	1.33	1.01	0.913 × 10 <sup>-3</sup>
140	361.3	921.7	1.965	2145	4286	2244	0.683	0.0301	0.197 × 10 <sup>-3</sup>	1.365 × 10 <sup>-3</sup>	1.24	1.02	0.970 × 10 <sup>-3</sup>
150	475.8	916.6	2.546	2114	4311	2314	0.682	0.0316	0.183 × 10 <sup>-3</sup>	1.399 × 10 <sup>-3</sup>	1.16	1.02	1.025 × 10 <sup>-3</sup>
160	617.8	907.4	3.256	2083	4340	2420	0.680	0.0331	0.170 × 10 <sup>-3</sup>	1.434 × 10 <sup>-3</sup>	1.09	1.05	1.145 × 10 <sup>-3</sup>
170	791.7	897.7	4.119	2050	4370	2490	0.677	0.0347	0.160 × 10 <sup>-3</sup>	1.468 × 10 <sup>-3</sup>	1.03	1.05	1.178 × 10 <sup>-3</sup>
180	1.002.1	887.3	5.153	2015	4410	2590	0.673	0.0364	0.150 × 10 <sup>-3</sup>	1.502 × 10 <sup>-3</sup>	0.983	1.07	1.210 × 10 <sup>-3</sup>
190	1.254.4	876.4	6.388	1979	4460	2710	0.669	0.0382	0.142 × 10 <sup>-3</sup>	1.537 × 10 <sup>-3</sup>	0.947	1.09	1.280 × 10 <sup>-3</sup>
200	1.553.8	864.3	7.862	1941	4500	2840	0.663	0.0401	0.134 × 10 <sup>-3</sup>	1.571 × 10 <sup>-3</sup>	0.910	1.11	1.350 × 10 <sup>-3</sup>
220	2.318	840.3	11.60	1859	4610	3110	0.650	0.0442	0.122 × 10 <sup>-3</sup>	1.641 × 10 <sup>-3</sup>	0.865	1.15	1.520 × 10 <sup>-3</sup>
240	3.344	813.7	16.73	1767	4760	3520	0.632	0.0487	0.111 × 10 <sup>-3</sup>	1.712 × 10 <sup>-3</sup>	0.836	1.24	1.720 × 10 <sup>-3</sup>
260	4.688	783.7	23.69	1663	4970	4070	0.609	0.0540	0.102 × 10 <sup>-3</sup>	1.788 × 10 <sup>-3</sup>	0.832	1.35	2.000 × 10 <sup>-3</sup>
280	6.412	750.8	33.15	1544	5280	4835	0.581	0.0605	0.094 × 10 <sup>-3</sup>	1.870 × 10 <sup>-3</sup>	0.854	1.49	2.380 × 10 <sup>-3</sup>
300	8.581	713.8	46.15	1405	5750	5980	0.548	0.0695	0.086 × 10 <sup>-3</sup>	1.965 × 10 <sup>-3</sup>	0.902	1.69	2.950 × 10 <sup>-3</sup>
320	11.274	667.1	64.57	1239	6540	7900	0.509	0.0836	0.078 × 10 <sup>-3</sup>	2.084 × 10 <sup>-3</sup>	1.00	1.97	
340	14.596	610.5	92.62	1028	8240	11,870	0.469	0.110	0.070 × 10 <sup>-3</sup>	2.255 × 10 <sup>-3</sup>	1.23	2.43	
360	18.651	528.3	144.0	720	14,690	25,800	0.427	0.178	0.060 × 10 <sup>-3</sup>	2.571 × 10 <sup>-3</sup>	2.06	3.73	
374.14	22.096	317.0	317.0	0	-	-	-	-	0.043 × 10 <sup>-3</sup>	4.313 × 10 <sup>-3</sup>			

Tabla B.5

Constante y calores específicos de varios gases comunes.

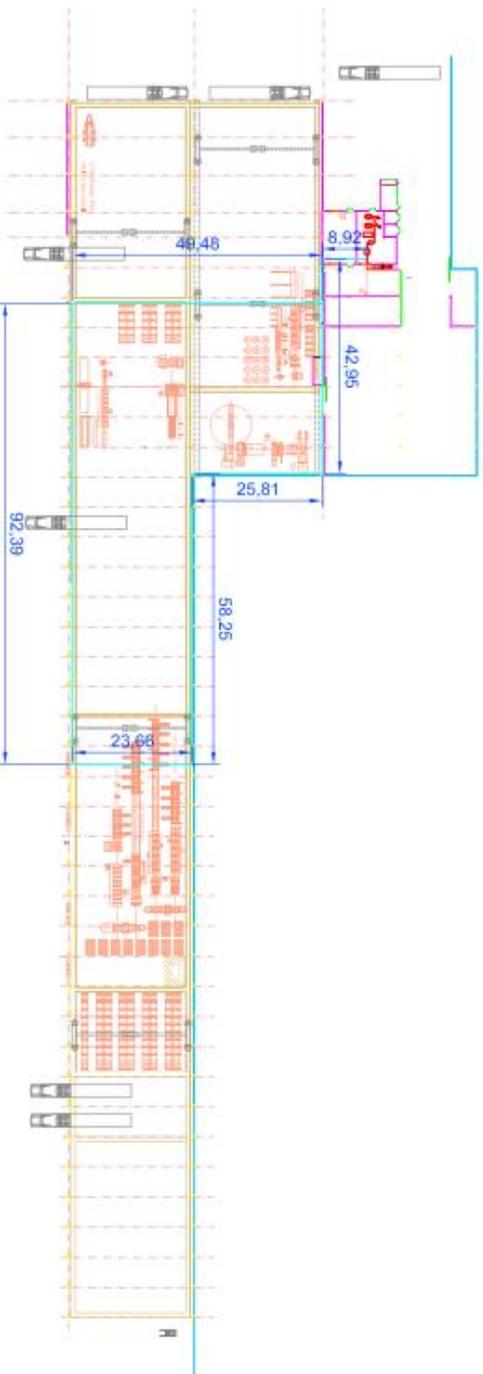
Sustancia	Masa molar <i>M</i> , kg/kmol	Constante de gas <i>R</i> , kJ/kg · K*	Datos de calores específicos a 25°C		
			<i>c<sub>p</sub></i> , kJ/kg · K	<i>c<sub>v</sub></i> , kJ/kg · K	<i>k</i> = <i>c<sub>p</sub></i> / <i>c<sub>v</sub></i>
Aire	28.97	0.2870	1.005	0.7180	1.400
Amoniaco, NH <sub>3</sub>	17.03	0.4882	2.093	1.605	1.304
Argón, Ar	39.95	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Bromo, Br <sub>2</sub>	159.81	0.05202	0.2253	0.1732	1.300
<i>n</i> -Butano, C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12	0.1430	1.694	1.551	1.092
Cloro, Cl <sub>2</sub>	70.905	0.1173	0.4781	0.3608	1.325
Clorodifluorometano (R-22), CHClF <sub>2</sub>	86.47	0.09615	0.6496	0.5535	1.174
Dióxido de azufre, SO <sub>2</sub>	64.06	0.1298	0.6228	0.4930	1.263
Dióxido de carbono, CO <sub>2</sub>	44.01	0.1889	0.8439	0.6550	1.288
Dióxido de nitrógeno, NO <sub>2</sub>	46.006	0.1889	0.8060	0.6171	1.306
Etano, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	0.2765	1.744	1.468	1.188
Etileno, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.054	0.2964	1.527	1.231	1.241
Flúor, F <sub>2</sub>	38.00	0.2187	0.8237	0.6050	1.362
Helio, He	4.003	2.077	5.193	3.116	1.667
<i>n</i> -Heptano, C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.20	0.08297	1.649	1.566	1.053
<i>n</i> -Hexano, C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.18	0.09647	1.654	1.558	1.062
Hidrógeno, H <sub>2</sub>	2.016	4.124	14.30	10.18	1.405
Isobutano, C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12	0.1430	1.663	1.520	1.094
Kriptón, Kr	83.80	0.09921	0.2480	0.1488	1.667
Metano, CH <sub>4</sub>	16.04	0.5182	2.226	1.708	1.303
Monóxido de carbono, CO	28.01	0.2968	1.039	0.7417	1.400
Neón, Ne	20.183	0.4119	1.030	0.6180	1.667
Nitrógeno, N <sub>2</sub>	28.01	0.2968	1.040	0.7429	1.400
Óxido nítrico, NO	30.006	0.2771	0.9992	0.7221	1.384
Oxígeno, O <sub>2</sub>	32.00	0.2598	0.9180	0.6582	1.395
<i>n</i> -Pentano, C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.15	0.1152	1.664	1.549	1.074
Propano, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	0.1885	1.669	1.480	1.127
Propileno, C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.08	0.1976	1.531	1.333	1.148
Tetraclorometano, CCl <sub>4</sub>	153.82	0.05405	0.5415	0.4875	1.111
Tetrafluorometano (R-134a), C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	102.03	0.08149	0.8334	0.7519	1.108
Trifluorometano (R-143a), C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>3</sub>	84.04	0.09893	0.9291	0.8302	1.119
Vapor de agua, H <sub>2</sub> O	18.015	0.4615	1.865	1.403	1.329
Xenón, Xe	131.30	0.06332	0.1583	0.09499	1.667

**Tabla B.6****Propiedades físicas del agua.**

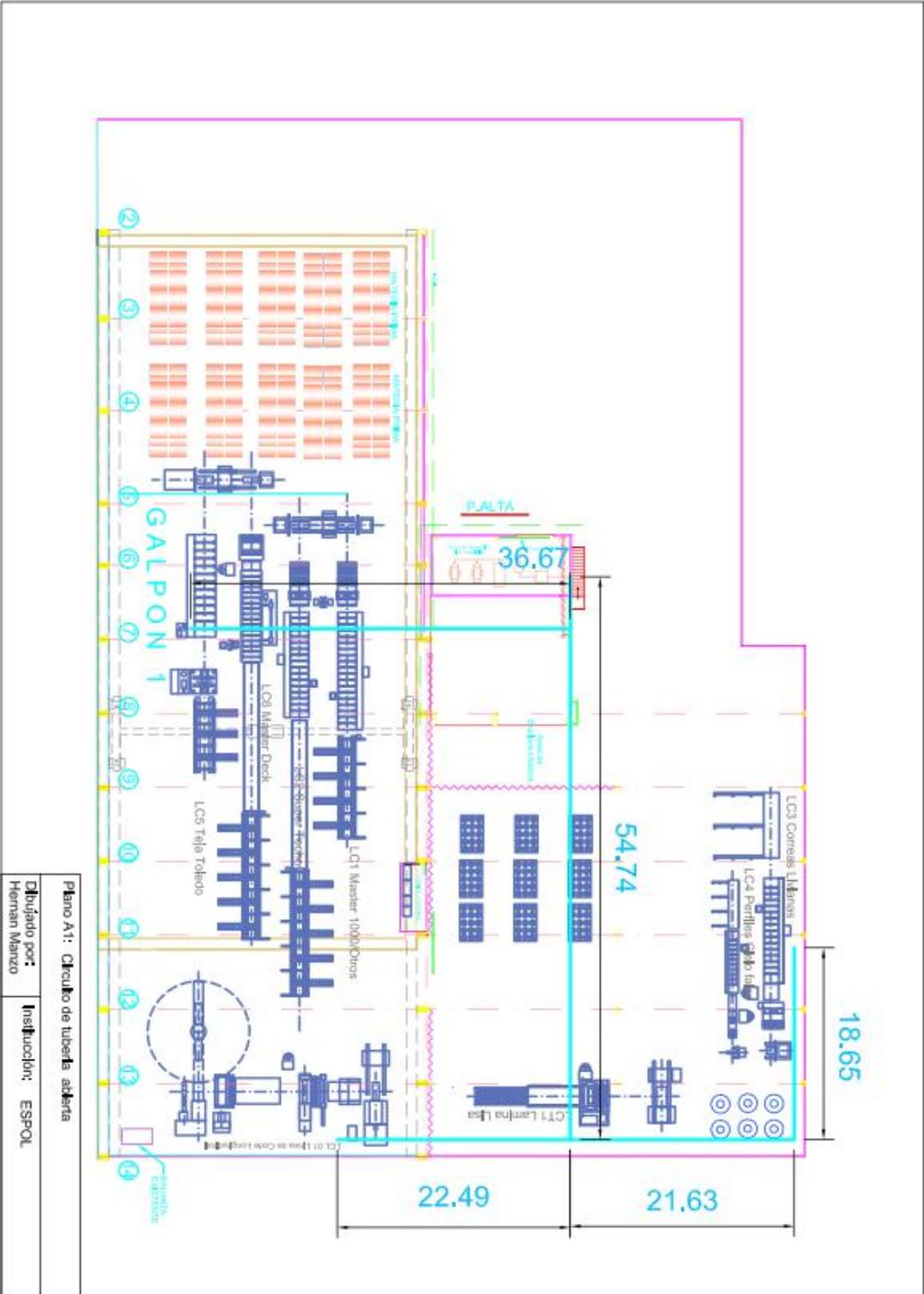
PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA							
Temperatura (°C)	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad (kN/m <sup>2</sup> )	Viscosidad dinámica (N·s/m <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática (m <sup>2</sup> /s)	Tensión superficial (N/m)	Presión de vapor (kN/m <sup>2</sup> )
0	9,805	999,8	$1,98 \cdot 10^6$	$1,781 \cdot 10^{-3}$	$1,785 \cdot 10^{-6}$	0,0765	0,61
5	9,807	1000,0	$2,05 \cdot 10^6$	$1,518 \cdot 10^{-3}$	$1,519 \cdot 10^{-6}$	0,0749	0,87
10	9,804	999,7	$2,10 \cdot 10^6$	$1,307 \cdot 10^{-3}$	$1,306 \cdot 10^{-6}$	0,0742	1,23
15	9,798	999,1	$2,15 \cdot 10^6$	$1,139 \cdot 10^{-3}$	$1,139 \cdot 10^{-6}$	0,0735	1,70
20	9,789	998,2	$2,17 \cdot 10^6$	$1,102 \cdot 10^{-3}$	$1,003 \cdot 10^{-6}$	0,0728	2,34
25	9,777	997,0	$2,22 \cdot 10^6$	$0,890 \cdot 10^{-3}$	$0,893 \cdot 10^{-6}$	0,0720	3,17
30	9,764	995,7	$2,25 \cdot 10^6$	$0,708 \cdot 10^{-3}$	$0,800 \cdot 10^{-6}$	0,0712	4,24
40	9,730	992,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,653 \cdot 10^{-3}$	$0,658 \cdot 10^{-6}$	0,0696	7,38
50	9,689	988,0	$2,29 \cdot 10^6$	$0,547 \cdot 10^{-3}$	$0,553 \cdot 10^{-6}$	0,0679	12,33
60	9,642	983,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,466 \cdot 10^{-3}$	$0,474 \cdot 10^{-6}$	0,0662	19,92
70	9,589	977,8	$2,25 \cdot 10^6$	$0,404 \cdot 10^{-3}$	$0,413 \cdot 10^{-6}$	0,0644	31,16

# **APÉNDICE C**

## **PLANOS**



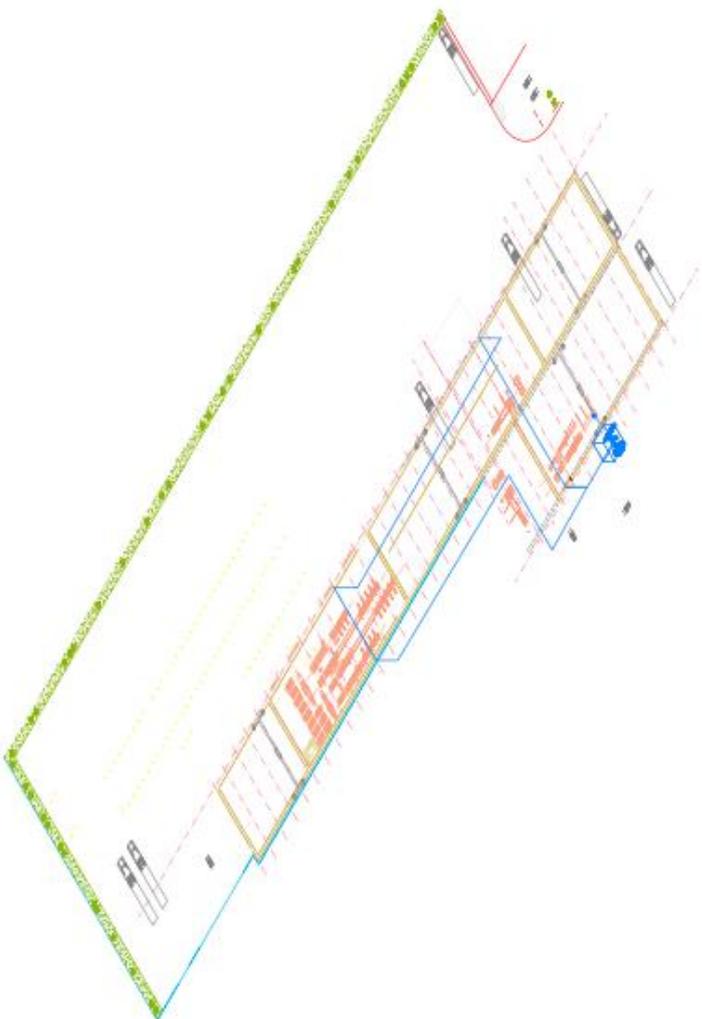
PROYECTO: <b>CIRCUITO DE TUBERÍA ABIERTA</b>	
AUTOR: Hernan Menzo	ESCALA: 1:100 ESPOL



Plano A1: Circuito de tuberia adheria

Dibujado por:  
Hernan Manzo

Institucion:  
ESPOL



PLANO A3: PLANO ISOMETRICO DEL ANILLO CERRADO EN LAS  
TUBERIAS DE AIRE COMPRIMIDO

DIBUJADO POR:  
HERNAN MANZO PIN

INSTITUCIÓN: ESPOL

## BIBLIOGRAFÍA

1.- Cengel Yunus – Boles Michael, Termodinámica, McGrawHill, Cuarta Edición, 2003.

2.- Stefan Hesse, Aire comprimido, fuente de energía, preparación y distribución, FESTO.

3. -Advanced Air Pipe system, Compressed Air, Vacuum, Inert Gas, Parker Legris Transair.

4.- Aire Comprimido, ¿Has sido bueno?, revista Atlas Copco, Diciembre 2009.

5.- Aire Comprimido, Un servicio de altura, revista Atlas Copco, Junio 2010.

6.- Técnica de aire comprimido, Nociones básicas y consejos: claro - completo – sencillo, revista de Kaeser compresores.

7.- [www.uclm.es/area/amf/gonzalo/Ingfluidosfiles/multimedia](http://www.uclm.es/area/amf/gonzalo/Ingfluidosfiles/multimedia)

8.- [www.valycontrol.com.mx/mt/mt\\_cap13.pdf](http://www.valycontrol.com.mx/mt/mt_cap13.pdf)

9.- [www.fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/flujoentuberias](http://www.fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/flujoentuberias)

10.-[www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Tablas/Propiedades](http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Tablas/Propiedades)

11.-[www.commons.wikimedia.org/wiki/File:Curva de la](http://www.commons.wikimedia.org/wiki/File:Curva_de_la)

[ba%C3%B1ERA.png](#)

12.- [www.todochiller.com.ar](http://www.todochiller.com.ar)