



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA PROCESO DE PRODUCCIÓN DE  
AIRE COMPRIMIDO, EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE GALLETA**

**Rodrigo Argueta Wolke**

Asesorado por el Ing. Otto Fernando Andrino González

Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco

Guatemala, octubre de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA PROCESO DE PRODUCCIÓN DE  
AIRE COMPRIMIDO, EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE GALLETA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**RODRIGO ARGUETA WOLKE**

ASESORADO POR EL ING. OTTO FERNANDO ANDRINO GONZÁLEZ

ING. ESDRAS FELICIANO MIRANDA OROZCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



### **NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

### **TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Alberto Quijivix Racancoj
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **DISEÑO DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO, EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE GALLETA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 7 de septiembre de 2005.

Rodrigo Argueta Wolke

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Mis padres</b>	Rolando y Olga, por su esfuerzo, dedicación, apoyo y amor.
<b>Mis hermanos</b>	Roland y Mafer, por el apoyo y el amor compartido siempre.
<b>Mi esposa</b>	Gaby, por tu apoyo incondicional y por estar conmigo estos años.
<b>Mis Hijos</b>	Anita y Rodriguito, por ser mi inspiración a seguir siempre adelante.



# ÍNDICE GENERAL

<b>INDICE DE ILUSTRACIONES</b>	VII
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	XI
<b>GLOSARIO</b>	XVII
<b>RESUMEN</b>	XXV
<b>OBJETIVOS</b>	XXVII
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XXIX
<b>1. FUNDAMENTOS</b>	1
1.1 Principios básicos	2
1.1.1 El aire	2
1.1.2 El aire como gas ideal	3
1.1.2.1 Leyes de los gases ideales	4
1.1.3 El aire comprimido	8
1.2 Parámetros de medición y unidades de medida	9
1.2.1 Definiciones	10
1.2.2. Presión	15
1.2.3 Caudal	16
1.2.4 Otras unidades	18
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL ACTUAL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO</b>	21
2.1 Características de diseño	22
2.1.1 Descripción de las unidades de compresores	22
2.1.1.1 Principio de compresión	24

2.1.1.2 Descripción de los compresores	26
2.1.2 Descripción de las unidades de secadores	33
2.1.2.1 Secadores refrigerados	34
2.1.2.2 Principio de refrigeración	34
2.1.2.3 Descripción de los secadores	37
2.1.3 Descripción de tubería y unidades de distribución	39
2.1.4 Medición en línea utilizada actualmente	40
2.1.4.1 Manómetro de Bourdon	41
2.2 Operación	43
2.2.1 Descripción de los principios de operación actual	43
2.2.2 Tiempos de operación de cada compresor	45
2.2.3 Gráficos de operación del sistema y de cada compresor	47
2.3 Capacidad y eficiencia	48
2.3.1 Cálculo de capacidades	48
2.3.1.1 Capacidad de compresores	48
2.3.1.2 Capacidad de secadores	50
2.3.2 Cálculo de eficiencias de cada compresor	52
2.3.2.1 Método B IEEE 112	53
2.3.2.2 Eficiencia NEMA	60
2.3.2.3 Eficiencia real	62
<b>3. COSTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA</b>	<b>65</b>
3.1 Definiciones	66
3.1.1 Demanda	66
3.1.1.1 Medición de la demanda	68
3.1.1.2 Demandómetros	68
3.1.1.2.1 Demandómetro integrador	69
3.1.1.2.2 Demandómetro térmico	69



3.1.1.2.3 Demandómetro de corriente	70
3.1.1.2.4 Demandómetro de potencia	71
3.1.1.2.5 Demandómetro de electrónico	71
3.1.2 Energía	72
3.1.3 Normas de facturación aplicadas por el proveedor de energía	73
3.1.3.1 Potencia contratada	73
3.1.3.2 Demanda máxima	74
3.1.3.3 Factor de carga	75
3.1.3.4 Banda horaria	75
3.1.3.5 Factor de potencia	77
3.1.3.6 Otros cargos	78
3.1.4 Costo actual de la energía eléctrica	80
3.2 Gráficos de demanda y energía	81
3.3 Cálculo del costo de operación actual del sistema de producción de aire Comprimido	84
<b>4. DEMANDA DE AIRE COMPRIMIDO INSTALADA</b>	<b>87</b>
4.1 Medición y tabulación de cargas de aire comprimido consideradas fijas	87
4.2 Medición y tabulación de cargas de aire comprimido consideradas súbitas	88
4.3 Gráficas del comportamiento de la demanda de aire comprimido en el Tiempo	89
<b>5. LÓGICA DE CONTROL</b>	<b>97</b>
5.1 Transformación de cargas súbitas en cargas fijas	97
5.1.1 Línea de limpieza	98
5.1.1.1 Reducción de la presión	98
5.1.1.2 Estaciones de limpieza	100
5.1.1.3 Pistolas economizadoras para limpieza	100

5.1.2 Tanques pulmón	101
5.2 Demanda estimada con cargas súbitas eliminadas	102
5.3 Definición de compresores base, seguidores y de punta	103
5.4 Secuencia y rotación de funciones base, seguidor y punta	105
5.5 Gráficos de demanda contra suministro de aire comprimido	105
<b>6. VARIABLES DE CONTROL</b>	<b>107</b>
6.1 El lazo de control retroalimentado	108
6.1.1 Medición	109
6.1.2 Control	109
6.1.3 Suministro	109
6.1.4 Variable controlada	110
6.1.5 Variable manipulada	110
6.2 La presión como variable de control del proceso de aire comprimido	111
6.3 Relación entre la presión y la demanda de aire	112
6.4 Puntos de medición de la presión	113
6.5 Transductores piezoresistivos	114
6.6 Válvulas reguladoras de presión	116
<b>7. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL</b>	<b>117</b>
7.1 Fundamentos del sistema de control	117
7.1.1 Controlador lógico programable	118
7.1.1.1 Descripción y requerimientos	119
7.1.1.1.1 Fuente de alimentación	120
7.1.1.1.2 Unidad central de proceso	120
7.1.1.1.3 Módulo de entradas	121
7.1.1.1.4 Módulo de salidas	122
7.1.1.1.5 Terminales de programación	122

7.1.1.1.6 Periféricos	123
7.1.1.2 Entradas y salidas	123
7.1.1.2.1 Señales de entrada	123
7.1.1.2.1.1 Señales de entrada digital o discreta	124
7.1.1.2.1.2 Señales de entrada analógica	125
7.1.1.2.2 Señales de salida	126
7.1.1.2.2.1 Señales de salida digital o discreta	126
7.1.1.2.2.2 Señales de salida analógica	127
7.1.2 Criterio de selección del controlador lógico programable	129
7.1.3 Valores umbrales de entrada y salida de compresores	130
7.1.4 Diagrama de flujo	131
7.1.5 Reducción del impacto por arranques	139
7.2 Programación del controlador lógico programable	140
7.2.1 Programa de control	141
7.3 Diagramas	141
7.3.1 Diagrama mecánico	141
7.3.2 Diagramas eléctricos	142
7.3.2.1 Panel de control interno	142
7.3.2.2 Panel eléctrico exterior	142
7.3.2.3 Diagrama de conexión del sensor de presión	143
7.3.3 Diagramas de control	143
<b>8. INVERSIÓN PARA EL PROYECTO</b>	145
8.1 Cálculo de materiales	145
8.2 Cálculo de mano de obra	146
8.3 Tiempo de implementación	148
8.4 Ahorro por energía eléctrica	150

<b>CONCLUSIONES</b>	153
<b>RECOMENDACIONES</b>	157
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	159
<b>ANEXOS</b>	163

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Ley de Boyle – Mariotte	5
2	Ley de Charles	5
3	Ley de Gay – Lussac	6
4	Diseño de rotores de un compresor de tornillo	24
5	Diagrama de secuencia para el proceso de compresión de aire	25
6	Diagrama para la compresión isentrópica de la compresión de aire	26
7	Distribución de los compresores y secadores	27
8	Ciclo de refrigeración por compresión de vapor a.	36
9	Ciclo de refrigeración por compresión de vapor b.	36
10	Vista interna de un secador refrigerado	37
11	Manómetros de tubo Bourdon	42
12	Horas / semana de uso de uso para los compresores	47
13	Demanda máxima y mínima en KW	82
14	Gráfica de energía utilizada en KWH	84
15	Gráfica de tendencia de demanda de aire comprimido	95
16	Pistolas economizadoras para limpieza con aire comprimido	101
17	Operación de compresores (estimado)	104
18	Demanda contra suministro de aire comprimido	106
19	Lazo de control con retroalimentación	108
20	Indicador numérico Red Lion Modelo LD	128
21	Rutina de arranque inicial	133
22	Rutina de operación normal	134

23	Rutina de diferencial	135
24	Rutina de apagado de compresores	136
25	Rutina de encendido de compresores	137
26	Rutina de operación de secadores	138
27	Diagrama de flujo para el tiempo de implementación del proyecto	149
28	Tendencia de la energía con el comportamiento esperado de los compresores.	150
29	Diagrama de conexión mecánica del sensor de presión	163
30	Panel eléctrico interior	164
31	Diagrama de conexión de la fuente de alimentación	164
32	Diagrama de panel eléctrico exterior	165
33	Diagrama de conexión del sensor de presión	165
34	Diagrama de conexión del módulo de entradas discretas 1	166
35	Diagrama de conexión del módulo de entradas discretas 2	166
36	Diagrama de conexión del módulo de salidas discretas 1	167
37	Diagrama de conexión del módulo de salidas discretas 2	168
38	Diagrama de conexión del módulo de entradas analógicas	169
39	Diagrama de conexión del módulo de salidas analógicas	170

## TABLAS


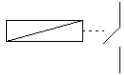


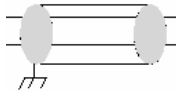
I	Dimensiones de tuberías cédula 40	40
II	Horas de uso para cada compresor	46
III	Horas de uso durante 5 semanas	47
IV	Capacidad de compresores	49

V	Capacidad de Secadores	51
VI	Tabla NEMA de eficiencias nominales normalizadas	61
VII	Eficiencia NEMA de los motores de los cinco compresores evaluados	62
VIII	Consumo de Corriente de cada uno de los compresores	63
IX	Datos para determinar relación aire comprimido y potencia eléctrica	64
X	Bandas horarias, según niveles de demanda	76
XI	Consumo de kilovatios hora en las diferentes bandas horarias.	76
XII	Justificación de los otros cargos que encontramos en una factura de servicio de suministro de energía eléctrica.	78
XIII	Horas de uso de cada compresor en una semana promedio	81
XIV	Demandas máximas y mínimas en kilovatios en la sala de compresores.	82
XV	Tendencia de la energía en una semana promedio	83
XVI	Cargas de aire comprimido en el área de preparación	90
XVII	Cargas de aire comprimido línea de producción No. 1	90
XVIII	Cargas de aire comprimido línea de producción No. 2	91
XIX	Cargas de aire comprimido línea de producción No. 3	91
XX	Cargas de aire comprimido línea de producción No. 4	92
XXI	Cargas de aire comprimido línea de producción No. 5	92
XXII	Cargas de aire comprimido líneas de producción No. 6 y 7	93
XXIII	Cargas de aire comprimido línea de producción No. 8	93
XXIV	Cargas de aire comprimido por líneas de producción y puntos de consumo	94
XXV	Cargas de aire comprimido con cargas súbitas eliminadas	102
XXVI	Definición de Compresores bases, seguidores y punta	103
XXVII	Referencia para diagramas mecánico, eléctrico y de control.	144
XXVIII	Lista de materiales	145
XXIX	Costos de mano de obra	148





## LISTA DE SÍMBOLOS

	Actividad en un diagrama de flujo
<b>AMM</b>	Administrador del mercado mayorista
<b>A</b>	Amperios
<b>A</b>	Área
<b>NEMA</b>	Asociación nacional de fabricantes de equipos eléctricos
	Bobina de contactor de arranque
	Botón de arranque o botón de paro
	Botón de emergencia
<b>HP</b>	Caballos de fuerza
	Cable con pantalla de protección aterrizada al chasis.
<b>Q</b>	Caudal o flujo volumétrico
<b>CNEE</b>	Comisión nacional de la energía eléctrica



Compresor



Secador

***K o C*** Constante

**R** Constante particular de los gases

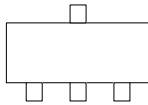
**Ru** Constante universal de los gases ideales

**PLC** Controlador lógico programable

**I** Corriente



Decisión



Distribuidor de aire

**US\$** Dólares estadounidenses

**H** Eficiencia

**AWG** Estándares americanos de medición de cableados



Evaporador

**FP** Factor de potencia

**F** Fuerza

**°C** Grados centígrados o Celsius

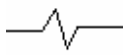
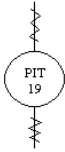

**K** Kelvin






**°R** Rankin



**HZ** Hertz

**Ω** Humedad específica

**Φ** Humedad relativa

<b>IEEE</b>	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos
<b>CAGI</b>	Instituto del aire y gases comprimidos
<b>Kg</b>	Kilogramos
<b>KW</b>	Kilovatios
<b>KWH</b>	Kilovatios hora
<b>KVA</b>	Kilovoltios amperio
<b>PSI</b>	Libras por pulgada cuadrada de presión
	Mando electromagnético
<b>M</b>	Masa
<b>Ma</b>	Masa de aire
<b>Mg</b>	Masa de vapor de agua
<b>M</b>	Masa molar
	Medidor transmisor de presión
<b>Mm</b>	Milímetros
<b>N</b>	Newton
	Normalmente abierto
<b>NCC</b>	Normas de coordinación comercial
<b>Na</b>	Número de Avogadro
<b>N</b>	Número de moles de un gas
<b>Pa</b>	Pascal
<b>W</b>	Peso
<b>Γ</b>	Peso específico
<b>CFM o cfm</b>	Pies cúbicos por minuto

	PLC
%	Porcentaje
<b>P</b>	Potencia
<b>BHP</b>	Potencia de frenado
<b>P</b>	Presión
<b>P</b>	Presión
<b>P abs</b>	Presión absoluta
<b>P atm</b>	Presión atmosférica
<b>Pg</b>	Presión de saturación
<b>Pv</b>	Presión real de vapor
<b>P rel</b>	Presión relativa
<b>PSIg</b>	Presión relativa leída en un instrumento
	Proceso establecido
“	Pulgadas
	Relé
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
	Secador
	Selector
<b>SI</b>	Sistema internacional de unidades de medidas
<b>T</b>	Temperatura

	Terminal de conexión fija
<b>T</b>	Tiempo
<b>CPU</b>	Unidad central de proceso
	Válvula de expansión
<b>VAC</b>	Voltaje en señal alterna
<b>VDC</b>	Voltaje en señal directa o continua
<b>V</b>	Volumen



## GLOSARIO

<b>Alineadores</b>	Elementos accionados reumáticamente para mantener estable la dirección de una banda transportadora.
<b>ASTM</b>	Conjunto de estándares de los Estados Unidos de América, para las pruebas de las características de los materiales.
<b>Atomización</b>	Acción que consiste en hacer pasar un líquido por boquillas que tienen orificios de área muy pequeña, a fin de separar el fluido en cantidades muy pequeñas y así hacer que las gotas se vuelvan muy pequeñas y se desplacen a alta velocidad.
<b>CAGI</b>	<i>Compressed Air and Gas Institute</i> , en español, Instituto del aire y los gases comprimidos, entidad internacional que propone normas y estándares para la operación y aplicación del aire y otros gases comprimidos.
<b>Capacidad</b>	Máximo nivel de operación que puede alcanzar el funcionamiento de un proceso.
<b>CFM</b>	Del inglés <i>cubic feet meter</i> , unidad de medida que indica la cantidad de pies cúbicos, que fluyen durante un minuto en un sistema de aire comprimido representado por el símbolo $\text{p}^3/\text{min}$ .

<b>Compresibilidad</b>	Razón de cambio en el volumen de un cuerpo cuando se incrementa la presión a la que está sometido
<b>CPU</b>	Unidad central de proceso, parte de un PLC que contiene los programas con las instrucciones a ejecutar, así como la información asociada para que estos programas funcionen.
<b>Demanda</b>	Es la potencia en kilovatios promediada en un intervalo de tiempo estipulado, normalmente cada quince minutos, es un término que indica la potencia media.
<b>Demanda máxima</b>	Valor más alto de demanda registrado por los demandómetros y es el valor que se tomará de referencia para la facturación del proveedor de energía eléctrica.
<b>Eficiencia</b>	La eficiencia se define por la relación de la potencia de salida respecto a la potencia de entrada, y esta fracción indica qué cantidad de potencia de entrada se ha disipado en los diferentes tipos de pérdidas y qué parte se aprovechado para realizar el trabajo esperado
<b>Electroválvula</b>	Elemento de control que abre o cierra el paso de un fluido accionado por la excitación eléctrica de una bobina.
<b>Entrehierro</b>	Espacio de aire que existe dentro de una máquina eléctrica entre el rotor y el estator.
<b>Festo</b>	Fabricante de equipos neumáticos.



<b>Frecuencia de sincronismo</b>	Velocidad de rotación de los campos magnéticos en el entrehierro.
<b>Kelvin</b>	Unidad de temperatura basada en la escala centígrada, estableciendo el punto cero en el cero absoluto es decir en -273 °C.
<b>Hornos de recirculación</b>	Tipo de hornos que basan su funcionamiento en transferir el calor de una llama hacia un flujo de aire, y posteriormente este aire caliente recircularlo en las cámaras donde se requiere aumentar la temperatura.
<b>HP</b>	Caballo de fuerza, que es una unidad de medida de potencia en el sistema de medición inglés.
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , es una asociación técnico-profesional mundial dedicada a la estandarización, entre otras cosas. Es la mayor asociación internacional sin fines de lucro formada por profesionales de las nuevas tecnologías, como ingenieros en telecomunicación, ingenieros en electrónica, ingenieros en informática e ingenieros en computación..
<b>Internet</b>	Red mundial de acceso a información.
<b>Kilovatio</b>	Unidad de medida del trabajo efectuado por unidad de tiempo, es equivalente a mil vatios.

<b>Kilovatio hora</b>	Expresión del trabajo como el producto de potencia y tiempo, unidad de medida de energía, que equivale al trabajo desarrollado por una potencia de 1 kilovatio en una hora.
<b>Lóbulos</b>	Parte sobresaliente del tornillo rotativo de un compresor que formará junto con las carcazas la celda que contendrá el aire que se va a comprimir
<b>Lógica de escalera</b>	Estructura de lenguaje más común para la programación de los PLC.
<b>Manufactura</b>	Actividad de transformar materias primas en productos terminados útiles para satisfacer alguna necesidad del ser humano.
<b>Mercado mayorista del sistema eléctrico</b>	Lo conforman todos los participantes en el sistema eléctrico interconectado, generadores, transportistas, comercializadores y los grandes usuarios.
<b>Mol</b>	Unidad básica del sistema internacional de medidas que se usa para medir la cantidad de una sustancia, cuando tiene $6.02 \times 10^{23}$ moléculas de una misma sustancia.
<b>Molécula</b>	Es la menor cantidad de una sustancia que puede coexistir manteniendo las propiedades de la misma sustancia

<b>NEMA</b>	<i>National Electric Manufacturer's Association</i> , que es la asociación nacional de fabricantes de equipos eléctricos de los Estados Unidos de América, encargada de definir estándares para fabricantes de equipos eléctricos.
<b>Neumática</b>	Disciplina que trata los procesos y aplicaciones de aire comprimido para realizar trabajos mecánicos y de control.
<b>Número de Avogadro</b>	Número que representa la cantidad de átomos que hay en un mol de átomos.
<b>Paro de emergencia</b>	Actividad en la operación de cualquier proceso que detiene todas las actividades relacionadas, cuando se detecta una condición de peligro por parte de un operador.
<b>PLC</b>	Controlador lógico programable, elemento de control, que tiene la capacidad de recibir señales de entrada, interpretarlas, ejecutar instrucciones programadas con la información recibida y generar señales de salida de acuerdo al resultado de la operación de la información.
<b>Potencia contratada</b>	Potencia establecida de mutuo acuerdo entre un proveedor de energía eléctrica y un usuario, y es la cantidad de potencia que el proveedor tiene la obligación de tener disponible en cualquier momento para ser consumida por el usuario.
<b>Productividad</b>	Relación de producto obtenido con respecto a los recursos utilizados.

<b>Retroalimentación</b>	Modo de control que se basa en tomar mediciones de la variable controlada continuamente y tomar estas mediciones para enviarlas al PLC, para que éste compare el valor de la variable controlada con el set point, y tome decisiones para actuar sobre la variable manipulada, en sistemas de control este término también lo encontramos como <i>feedback</i> .
<b>Refrigerante</b>	Elementos que tienen cualidades que les permiten fácilmente absorber calor sin alterar sus propiedades físicas o químicas.
<b>Rotor</b>	Elemento de una máquina que estará sometido a movimiento circular rotativo respecto a su eje.
<b>Rozamiento</b>	Resistencia de los elementos mecánicos al movimiento rotatorio.
<b>RS Logix</b>	Lenguaje de programación para los PLC SLC 500 de Allen Bradley
<b>Rutina</b>	Conjunto de instrucciones preestablecidas en un programa de control.
<b>Señal analógica</b>	Señal eléctrica que tiene un rango continuo.
<b>Señal discreta</b>	Señal eléctrica que tiene únicamente dos estados encendido o apagado, también es conocida como señal digital.

<b>Set Point</b>	Valor deseado al que queremos mantener nuestra variable controlada.
<b>Sistema primario</b>	Líneas y subestaciones de un sistema eléctrico interconectado que se encuentran al nivel de voltaje más alto.
<b>SLC 500</b>	Familia de controladores lógicos programables de la firma Allen Bradley
<b>Sullair</b>	Fabricante de compresores y secadores.
<b>Transductor</b>	Elemento que transforma un elemento físico en señal eléctrica, convierte algún tipo de energía en una señal eléctrica..
<b>Umbral</b>	Valor que marca el inicio o el final de algún evento en sistemas de control.
<b>Variable Manipulada</b>	Es la variable sobre la cual estaremos tomando acciones para mantener la variable controlada lo mas cerca posible del set point.
<b>Variable controlada</b>	Es una variable que influye significativamente en el funcionamiento de un proceso, y es sobre estas variables que toma acciones un sistema de control.



## **RESUMEN**

Uno de los principales objetivos de diseñar un sistema de control automático para cualquier proceso, es aprovechar la tecnología de control disponible en la actualidad para mejorar su eficiencia.

Para poder controlar un proceso, es necesario conocer qué variables inciden en su desempeño y cuáles son las leyes naturales que describen su funcionamiento.

Para un proceso de producción de aire comprimido, debemos primero identificar como podemos mejorar la utilización del aire comprimido que utilizamos para alimentar equipos neumáticos y para realizar rutinas de limpieza seca.

Para poder controlar adecuadamente el proceso de producción de aire comprimido presentado en este estudio, vamos a tomar la presión como variable de control y utilizaremos para ello un sistema de control de tipo dos posiciones, encendido y apagado, esto quiere decir que utilizaremos la presión como variable controlada y encenderemos o apagaremos compresores según la demanda de aire que exista, esto nos llevará a mantener encendidos únicamente los compresores que sean necesarios para satisfacer nuestra demanda de aire.

El uso de un controlador lógico programable nos permitirá cambiar la operación manual y dedicada de los operadores que tenemos actualmente, que representa tiempos de operación ineficientes, para implementar un proceso que utilice los recursos adecuadamente y así mejorar la relación del aire comprimido producido respecto a la energía eléctrica utilizada para la operación del sistema de aire comprimido.





## **OBJETIVOS**

### **General**

Diseñar un sistema de control automático para el proceso de producción de aire comprimido para una planta de producción de galleta ubicada en San José Pinula, departamento de Guatemala, ya que actualmente el sistema existente únicamente se enciende y se apaga al principio y al final de la semana productiva sin usar ninguna herramienta de medición y control del proceso.

### **Específicos**

1. Definir la terminología y principios que se usan para determinar las características de un sistema producción de aire comprimido.
2. Definir las características de capacidad y eficiencia de nuestro sistema de producción de aire comprimido.
3. Describir la situación actual de la operación del sistema de producción de aire comprimido incluyendo el comportamiento de la demanda de aire comprimido en el tiempo en la planta de producción de galleta.
4. Describir cómo se cuantifica la energía eléctrica consumida por nuestro sistema de producción de aire comprimido.

5. Definir cuáles son las variables que debido a su impacto deben ser medidas para la toma de acciones de control sobre nuestro sistema de producción de aire comprimido y que fundamentos y elementos usaremos para su medición.
6. Definir la lógica de control que se usará para que la utilización de nuestro sistema de producción de aire comprimido obedezca el comportamiento de la demanda instantánea de aire comprimido.
7. Diseñar el sistema de control que se implementará presentando diagramas eléctricos, mecánicos y de control, así como la descripción de herramientas de control automático a utilizarse.
8. Presentar la cuantificación económica de la implementación del sistema de control.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad muchos de los procesos industriales que encontramos funcionando han crecido sin planificación alguna, muchos de ellos no tuvieron una etapa de diseño en sus inicios y únicamente fueron instalados de acuerdo a las necesidades que se determinaban con el transcurrir del día a día.

Una de las metas de la ingeniería es evaluar los procesos ya existentes, a fin de hacerlos cada vez más eficientes, tratamos de encontrar la forma de medir el desempeño de nuestros procesos con el fin de encontrar medios para controlarlos y así hacer un mejor uso de los recursos y mejorar la eficiencia de los mismos.

El control automático de procesos se ha desarrollado intensamente después de la Segunda Guerra Mundial y en los últimos 50 años su aplicación en la industria ha sido tan notable como necesaria para poder hacer los procesos más eficientes elevando la competitividad de las empresas que implementan este tipo de control.

Los fundamentos que dan base al control automático de un proceso empiezan por determinar cuáles son las variables que al medirse nos pueden dar parámetros de decisión para tomar una u otra acción que impacte en el resultado y desempeño de un proceso cualquiera, no se trata de medir todas las variables presentes sino se trata de determinar cuáles variables es necesario medir para tener un nivel de control suficiente y aceptable para mantener un sistema dentro de rangos adecuados de seguridad, control y desempeño.

Uno de los errores más comunes son las mediciones innecesarias, lo cual lleva a tener sistemas de control extravagantes que desvían su atención del objetivo para el que son diseñados teniendo costos innecesariamente altos.

Es por esto que también es necesario determinar el nivel adecuado de control que queremos tener y que se ajuste a la lógica de control que definimos para operar nuestro sistema.

Cuando hablamos de un proceso de aire comprimido resulta inevitable plantearnos la pregunta ¿cómo podemos evaluar si nuestro sistema de producción de aire comprimido está controlado? Si como respuesta encontramos que el sistema depende del criterio del personal de mantenimiento o producción, encendemos y apagamos compresores a discreción de la persona que está operando el sistema confiando en la experiencia y el buen sentido de dicha persona, encontramos que el nivel de control es muy bajo.

El hecho de encontrar un proceso de producción de aire comprimido donde se desconoce cuál es el comportamiento de la demanda de aire comprimido, donde no se han evaluado las características de los compresores que se tienen disponibles, y donde la operación es determinada por el criterio del operador, ofrece una gran oportunidad de mejora, ya que podemos aplicar fundamentos de ingeniería para evaluar la situación actual y a partir de ella diseñar una herramienta de control que permita operar de una manera más fácil y más segura el sistema ya existente.

En el presente trabajo de graduación se describirá la situación actual del sistema de producción de aire comprimido en una planta de alimentos, se definirán las características de los componentes del sistema, se hará un estudio del comportamiento de la demanda instalada y se planteará el diseño de un sistema sugerido para satisfacer las necesidades de control que lleven a tener un sistema seguro, con un mejor desempeño y más eficiente, que tenga una lógica de control enfocada en aprovechar las unidades de compresores utilizándolas de acuerdo al comportamiento de la demanda instantánea de aire comprimido en la planta, se plantea también una evaluación del impacto de las cargas súbitas en el lado de la demanda y la manera de convertir estas cargas súbitas en cargas estables.

El estudio de la situación actual se realiza bajo condiciones de demanda reales en época de producción típica, los costos de energía que se aplican son calculados en quetzales de acuerdo con la información y normas de el proveedor de energía contratado actualmente y en el diseño del sistema de control se evalúa el uso de elementos disponibles en el mercado, se presentará una evaluación económica del proyecto para su futura implementación a discreción de la planta de alimentos donde se realiza el presente estudio dicha evaluación se realiza en moneda local.



## **1. FUNDAMENTOS**

El control de procesos es un concepto mediante el cual un sistema mecánico o eléctrico busca el equilibrio a partir del comportamiento e interacción de una o más variables, las cuales se miden para poder, en base a dicha medición tomar acciones en el proceso. Tiene como objetivo mantener un proceso estable en el tiempo, aún en presencia de perturbaciones, usando para esto mediciones de variables, puntos de referencia para hacer comparaciones y tomar decisiones para actuar sobre las variables manipulables del proceso.

El control por realimentación puede definirse como un medio de control para un sistema usando la diferencia entre valores reales de variables del sistema y sus valores deseados.

El control automático es una disciplina de la ingeniería que como tal, su progreso y aplicación está atado estrechamente a la resolución de problemas prácticos de la vida real.

Es esencial y básico definir las variables que están presentes en el sistema que deseamos controlar, pero principalmente tenemos que conocer los fenómenos naturales, físicos, químicos, eléctricos o mecánicos asociados al sistema en sí, para saber como van a actuar e interactuar entre ellas las variables presentes en el dicho proceso.

Por lo que iniciaremos analizando los conceptos básicos que dan razón de ser a los procesos de compresión de aire, enfocándonos primero al aire como un gas.

## **1.1 Principios básicos**

La atmósfera terrestre está constituida en su mayor parte por aire, el cual es una mezcla gaseosa formada principalmente por vapor de agua y otros elementos, el contenido de vapor de agua del aire varía considerablemente en función de la temperatura y de la humedad relativa mientras que la combinación de los demás elementos se describen a continuación.

### **1.1.1 El aire**

Se considera que los componentes principales del aire son, aproximadamente 21% de oxígeno, 78% de nitrógeno y 1% de argón, en volumen. Además se encuentran presentes dentro de esta mezcla gaseosa pequeñas cantidades de dióxido de carbono y otros gases. Por conveniencia es aceptable suponer que el aire atmosférico está compuesto de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno.

El aire como todo gas si lo encerramos en un recipiente tiende a expandirse hasta llenar completamente el recipiente que lo contiene. Si éste recipiente se abre, el aire tiende a seguir expandiéndose y escapa del contenedor, de igual forma si el volumen de



este recipiente lo hacemos disminuir el gas ocupará un volumen más pequeño aumentando su presión interna, a esta propiedad se le conoce como compresibilidad.

La compresibilidad se define entonces como el cambio que sufre en el volumen una sustancia cuando hay un cambio en la presión a la que está sometido.

Para comprender las propiedades del aire como un gas debemos partir de establecer un concepto fundamental: la masa, que es la propiedad del aire que se mide por su inercia o resistencia al cambio de movimiento, que es también una medida de la cantidad de fluido de aire.

### **1.1.2 El aire como gas ideal**

El estado gaseoso es un estado disperso de la materia, es decir, que las moléculas del gas están separadas unas de otras por una distancia mucho mayor que el tamaño real de las moléculas. El volumen que ocupa el gas depende entonces de la presión y la temperatura a la que está sometido y del número de moles que conforman el gas.

El aire cumple con las propiedades necesarias para que su comportamiento pueda considerarse como el de un gas ideal dichas propiedades son:

- El aire se adapta a la forma y el volumen del depósito que lo contiene, al cambiar de contenedor el aire se comprime o se expande de manera que ocupa todo el volumen y toma la forma de su contenedor.

- Se deja comprimir fácilmente, ya que al existir grandes espacios entre sus moléculas éstas pueden acercarse unas a otras reduciendo su volumen cuando aplicamos presión (a esto llamamos comprimir el aire).
- El aire se difunde con facilidad, al no existir fuerza de atracción intermolecular en sus partículas, se esparce de manera espontánea.
- El aire también se dilata, y la energía cinética promedio de sus moléculas es directamente proporcional a la temperatura aplicada.

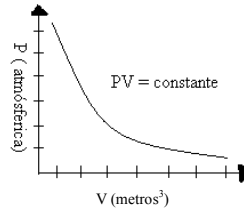
### 1.2.1.1 Leyes de los gases ideales

Ley de Boyle – Mariotte: a temperatura constante el volumen de cualquier gas es inversamente proporcional a la presión a la que se somete.

$$\frac{V1}{V2} = \frac{P2}{P1}$$

### Figura 1. Ley de Boyle – Mariotte

Fuente: [www.eneayudas.cl/gasentrada.htm](http://www.eneayudas.cl/gasentrada.htm)

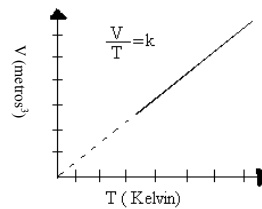


Ley de Charles: a presión constante, el volumen de una masa dada de gas varía directamente con la temperatura absoluta.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

### Figura 2. Ley de Charles

Fuente: [www.eneayudas.cl/gasentrada.htm](http://www.eneayudas.cl/gasentrada.htm)

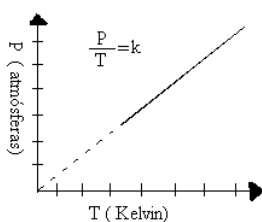


Ley de Gay – Lussac: a volumen constante, la presión de un gas es directamente proporcional a la temperatura.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

**Figura 3. Ley de Gay – Lussac**

**Fuente:** [www.eneayudas.cl/gasentrada.htm](http://www.eneayudas.cl/gasentrada.htm)



Ley combinada de los gases: a partir de las leyes anteriormente descritas podemos llegar a la ley combinada de los gases, que postula que podemos conocer la forma como cambia el volumen, la presión o la temperatura cuando conocemos el valor del estado inicial de las tres variables y el valor de dos de las tres variables en el estado final.

$$\frac{PV}{T} = k$$

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

Ecuación de Estado: si se combinan adecuadamente las leyes de Boyle y Charles con el principio de Avogadro, se puede obtener una expresión que relaciona simultáneamente el volumen de determinada cantidad de un gas con la presión y la temperatura del mismo. Esta es la ecuación de estado que recibe también el nombre de ley de los gases ideales

$$PV = nR_u T$$

Donde  $R_u$  se conoce como la constante universal de los gases ideales y su valor depende de las unidades en que se expresen los valores de las diferentes variables y  $n$  es el número de moles del gas. Una mol de una sustancia contiene el número de Avogadro de moléculas, que corresponde a  $6.023 \times 10^{26}$  moléculas por kilogramo – mol, además a la masa de una mol se le llama masa molar  $M$ . La relación entre el número de moles  $n$  y la masa  $m$ , puede expresarse por

$$n = m / M$$

Para el sistema internacional de unidades

$$N_a = 6.023 \times 10^{26} \text{ átomos / kg mol y}$$

$$R_u = 8.314 \text{ KJ / (kg mol – K)}$$

La ecuación del gas ideal se utiliza frecuentemente con unidades másicas, como kilogramos, en lugar de usar kilogramos – mol. En tales casos se utiliza una constante particular de los gases R, la relación entre ambas constantes está definido por

$$R = R_u / M$$

### **1.1.3 El aire comprimido**

El aire comprimido provee una fuente de energía para una gran variedad de procesos y operaciones de manufactura, también es usado para actividades de mantenimiento y limpieza, además el aire comprimido es usado ampliamente en sistemas de control neumático así como en motores y herramientas neumáticas.

Una presión de operación común para tales sistemas está en el rango de 60 hasta 125 PSI relativas. El funcionamiento y la productividad del equipo se degradan si la presión es inferior a la presión del diseño. Por lo tanto, se debe prestar atención especial a las pérdidas de presión entre la etapa de producción del aire comprimido (compresores) y los puntos de utilización. Si el cambio en la presión entre el punto de compresión y el punto de utilización es menor de aproximadamente 10%, las variaciones en las características del aire tendrán efectos despreciables.

Cuando usamos una unidad compresora para aumentar la presión en el aire, aplicamos trabajo sobre el sistema (generalmente este trabajo es proporcionado por un motor eléctrico) el aire que originalmente se encuentra a presión atmosférica es sometido a la acción de un compresor que aumentará la presión ejercida sobre el aire que sale del mismo, este recorre tuberías de distribución hasta llegar a su punto de utilización donde el aire comprimido se liberará a presión atmosférica, y es en esta expansión donde liberará su energía la cual será aprovechada para realizar algún trabajo, de este concepto podemos concluir que cuando el aire se comprime absorbe energía del sistema y cuando se expande entrega energía que será aprovechable para realizar un trabajo.

## **1.2 Parámetros de medición y Unidades de medida**

Las variables que actúan en un sistema de aire comprimido están directamente relacionadas con el comportamiento que tiene el aire como gas ideal, de allí que las leyes de los gases ideales nos dicen la mayoría de las variables que debemos tomar en cuenta, estas variables son: el volumen, la presión y la temperatura. Además debemos tomar en cuenta que cuando el aire comprimido viaja en las tuberías de distribución se comporta como un fluido tenemos que considerar las variables de velocidad de flujo y área de tuberías, las cuales al combinarse dan razón a una variable que para el control de un sistema de aire comprimido es fundamental, el caudal.

Es importante mencionar también que dentro de un sistema de aire comprimido también es necesario conocer las condiciones del aire atmosférico las cuales además de estar definidas por algunas de las variables anteriormente mencionadas están estrechamente relacionadas con la humedad relativa y la presión atmosférica en el punto de ubicación geográfica de las plantas.

### 1.2.1 Definiciones

Volumen: Es el espacio físico que ocupa un gas, este espacio está definido por las dimensiones del contenedor del aire, está dado en metros cúbicos.

Presión: Está definida como una fuerza aplicada por unidad de área, en un sistema de aire comprimido, la presión es un parámetro que indica la fuerza que ejercerá el aire comprimido al liberarse a la presión atmosférica sobre una superficie dada, para los sistemas de aire comprimido convencionales lo más común es encontrar la presión indicada en PSIg, libras por pulgada cuadrada relativas.

Presión Atmosférica y presión relativa: son dos parámetros de medición de la presión cuya diferencia es el punto de referencia que tomamos para la medición, el cero de la escala relativa es la presión atmosférica y el cero para la presión absoluta será el cero absoluto, por lo que cuando queremos expresar una presión dada en un punto cualquiera respecto de la atmósfera estamos hablando de presiones relativas, a esta presión también la encontramos llamada presión manométrica y en algunos manuales está indicada por un subíndice g.

$$P_{abs} = P_{rel} + P_{atm}$$



Donde:

Prel = Presión relativa

Patm = Presión atmosférica

Pabs = Presión Absoluta

Temperatura: Es la propiedad de un cuerpo que indica su estado relativo respecto a otro cuerpo, que indica si estos se encuentran en equilibrio térmico, aunque los términos temperatura y calor están relacionados entre si, la diferencia radica en que la temperatura indica el estado del sistema mientras que el calor es un flujo de energía entre dos cuerpos a diferentes temperaturas, del más caliente al más frío.

El peso específico: El peso específico del aire varía en función de los cambios de presión y temperatura, el peso específico de cualquier sustancia es la cantidad de peso por unidad de volumen y está dado por

$$\gamma = w / V$$

Entrega de Aire Libre: Los valores dados en los equipos que usamos en sistemas de aire comprimido, normalmente se expresan en términos de aire libre, llamados en algunas ocasiones entrega de aire libre (*fad*) por sus siglas en inglés. Esto proporciona la cantidad de aire entregada por unidad de tiempo en unidades de volumen suponiendo que el aire se encuentra a presión atmosférica y temperatura estándar.

Velocidad de Flujo: Es la cantidad de volumen de aire comprimido que se desplaza por unidad de tiempo en términos de la temperatura absoluta, recordando que para el sistema internacional de unidades la temperatura absoluta está expresada en kelvin, la expresión que relaciona temperaturas estándar con temperaturas absolutas será:

$$T = (t^{\circ}\text{C} + 273) \quad \text{K}$$

Y las unidades de Volumen (V) y tiempo (t) son metros cúbicos y segundos respectivamente por lo que el caudal Q está expresado como

$$Q = V/t$$

Dimensiones de Tuberías: El medio de transporte para el aire comprimido son líneas de tuberías las cuales están identificadas por su calibre o cédula, la variación en el calibre o cédula de una tubería indica el espesor de la pared de la tubería. Hay que mencionar que para tuberías de la misma medida pero de diferente calibre, el diámetro exterior es constante y la variación es en el diámetro interno y por consecuencia variación en el espesor de la pared. Para cálculo de velocidades de flujo en dato que nos interesa es el diámetro interno ya que es el dato que nos da la información necesaria para calcular la sección de flujo.

Humedad Relativa: El aire atmosférico está constituido por una mezcla de aire y vapor de agua insaturada, esto quiere decir que el vapor de agua contiene una parte de agua en fase líquida y una parte de agua en fase gaseosa.

El estado de saturación de una sustancia es cuando se halla totalmente definida en uno de los tres estados físicos de la materia, líquido, gaseoso o sólido, por eso decimos que el vapor de agua es una mezcla insaturada.

Para mezclas de aire, vapor y agua, se requiere poder indicar la cantidad de vapor (fase gaseosa) de agua presente en un estado dado de la mezcla. Por convención, esto se logra en dos formas: mediante la humedad relativa y mediante la humedad específica (relación de humedad). La humedad relativa  $\Phi$  se define como el cociente de la presión parcial de vapor en una mezcla entre la presión de saturación a la misma temperatura medida por un termómetro (temperatura de bulbo seco). Si  $P_v$  representa la presión real del vapor y  $P_g$  representa la presión de saturación a la misma temperatura.

$$\Phi = P_v / P_g \leq 1$$

El valor de esta relación se aproxima a 1 cuando la mezcla está cerca de alcanzar la presión de saturación para la fase gaseosa, quiere decir que una mezcla con un valor bajo para  $\Phi$  está mas cerca de la saturación líquida que de saturación gaseosa.

Esta relación es muy importante en los sistemas de aire comprimido, ya que la presencia de vapor de agua en la mezcla de aire puede experimentar condensación si en algún instante dado cede calor dentro del sistema lo que provocará que aparezca agua en estado líquido en las líneas de distribución, la cual si no se drena del sistema puede dañar los equipos neumáticos donde aplicaremos el aire comprimido.

La humedad específica  $\omega$  indica la cantidad de masa de vapor de agua  $m_g$  presente en la mezcla en relación con la masa de aire seco  $m_a$  presente. La relación de humedad específica no es una medida de la fracción de masa del vapor de agua en la mezcla, por lo que tenemos que tener cuidado de no confundir el término.

$$\omega = m_g / m_a$$

Las condiciones del aire atmosférico están definidas también por la posición geográfica de la planta, según su altitud sobre el nivel del mar, esto partiendo de la ley de Boyle de los gases ideales que establece que al incrementar la presión el volumen del gas disminuye, esto quiere decir que conforme aumenta la altura sobre el nivel del mar para la ubicación de la planta, la presión atmosférica disminuye por lo que el volumen del aire en consecuencia aumenta y su densidad disminuye.

### 1.2.2 Presión

La presión es uno de los parámetros que definen un sistema de aire comprimido, es el parámetro que normalmente medimos en los puntos de producción, distribución y uso.

En el sistema internacional de unidades la presión, que está definida como fuerza por unidad de área, se describe con la siguiente dimensional

$$P = F / A \text{ [Newton / metro}^2 \text{ = Pascal]}$$

Pero en los sistemas de aire más comúnmente utilizados en el área nacional, la unidad de medida usada para la presión es la libra por pulgada cuadrada PSI.

Es común encontrar también que los equipos que normalmente usamos vienen diseñados para rangos de presiones definidos en esta unidad, incluso es más utilizada la unidad de PSI que las unidades del SI, el pascal, u otras unidades.

Una variante que es bastante utilizada es la unidad PSIG, que indica la presión relativa que se lee en un manómetro.

La presión está íntimamente relacionada con la fuerza de trabajo que puede ejercer el aire comprimido al ser liberado, esto en aplicación directa en la superficie de trabajo de un elemento cilindro pistón por ejemplo. Además de la ley de gases ideales nosotros sabemos que la presión y el peso específico del aire están relacionados con la fuerza de trabajo que puede ejercer el aire comprimido al ser liberado dependiendo de la cantidad de aire que está fluyendo y la temperatura de trabajo, ya que:

$$\gamma = P / RT \text{ [Fuerza / Volumen]}$$

### 1.2.3 Caudal

El caudal está definido dentro de la mecánica de fluidos como la razón de flujo de volumen por unidad de tiempo, además relaciona la velocidad lineal del fluido y la sección transversal del conducto por donde se desplaza el fluido, físicamente el caudal Q se define por:

$$Q = V/t \text{ [metros}^3 \text{ / seg]} = v A \text{ [m/s x m}^2\text{]}$$

Al igual que la presión en nuestro medio no es en unidades del sistema internacional de unidades como encontraremos comúnmente expresado el caudal de un sistema de aire comprimido, la unidad de medida que encontramos en la mayoría de sistemas son los pies cúbicos por minuto (cfm).

Para determinar la velocidad de flujo en condiciones diferentes a presión atmosférica y a cualquier temperatura dada podemos usar la expresión

$$Q_a = Q_s \times \frac{(P_{atm-s})}{P_{atm} + P_a} \times T_a$$

Donde

$Q_a$  = velocidad de volumen en condiciones reales.

$Q_s$  = velocidad de flujo de volumen en condiciones estándar definido por el fabricante de un compresor, por ejemplo o de cualquier otro elemento neumático

$P_{atm-s}$  = presión atmosférica absoluta estándar (14.7 PSI para el sistema inglés y 101.3 kPa para el SI)

$P_{atm}$  = presión atmosférica absoluta real

$P_a$  = presión real de medición

$T_a$  = temperatura absoluta Real

$T_s$  = temperatura absoluta estándar ( 520 °R o 285 °K)

El caudal está relacionado también con la disponibilidad de flujo necesario para poder operar un sistema, está claro que el aire comprimido será fuente de energía para todos los elementos neumáticos de la planta, es por ello que debemos garantizar la disponibilidad de todo el aire comprimido necesario para operar adecuadamente el sistema.

Los fabricantes de equipo neumático especifican la cantidad de flujo de aire, normalmente en nuestro medio en pies cúbicos por minuto que usará de aire comprimido cada elemento que diseñan a un rango de presiones dado.

#### **1.2.4 Otras unidades**

Físicamente el termino Potencia es el ritmo con que se genera o consume energía, para los equipos de compresión de aire, es común que la potencia está definida por la unidad BHP que es la potencia de frenado, en vez de estar descrita en las unidades del sistema internacional kilovatios,  $1 \text{ BHP} = 0.746 \text{ Kw}$  aproximadamente.

Para cuestiones de diseño, los fabricantes de equipo de compresión definen además del valor de la potencia en BHP la cantidad de cfm para que tomemos en cuenta que las características de diseño de un compresor no solo dependen de la potencia de su motor sino además de las condiciones del aire atmosférico que se usará como flujo de trabajo.

Además es necesario mencionar que la potencia descrita por un fabricante para un compresor es la potencia que usará el compresor para entregar la cantidad de pies cúbicos por minuto que especifica en el cuadro de características de los equipos.



Las pérdidas que aparecen en cualquier sistema de mecánica de fluidos más significativas son aquellas que se producen entre el fluido y las paredes del conducto por el cual se desplaza, estas pérdidas son llamadas pérdidas por fricción, además existen otro tipo de perdidas conocidas como pérdidas locales que son aquellas pérdidas de energía que sufre un fluido al pasar a través de accesorios de tubería como codos o válvulas, pero en los sistemas de aire comprimido, las pérdidas más sensibles son las pérdidas por fugas en las tuberías y accesorios, estas pérdidas se evalúan según la caída de presión que provocan por lo que las pérdidas normalmente las encontramos cuantificadas en unidades de presión PSI.



## **2. DESCRIPCIÓN DEL ACTUAL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO**

El proceso de producción de aire comprimido se refiere concretamente a la etapa de compresión del aire, y al tratamiento de secado que se hace previo a poner disponible el aire comprimido en las líneas de distribución que lo conducirán hasta el punto de uso o servicio. De allí que nos dedicaremos a definir las características tanto operativas como de diseño del sistema actual.

En el proceso de producción de aire comprimido que estamos evaluando contamos con la disponibilidad de 5 compresores de aire y 2 secadores, los cuales junto a su tablero de alimentación eléctrica, tuberías y accesorios de salida hacia un distribuidor de salida se encuentran instalados en un cuarto de compresores ubicado en la parte exterior de la planta de producción de galleta ubicado a una altura sobre el nivel del mar de 1,201 metros según información obtenida de la secretaría general de planificación del gobierno de Guatemala, Segeplan.

Los compresores están dispuestos en dos grupos, uno de tres compresores y un grupo de dos compresores, cada grupo está asociado a un secador en cuya entrada hay un manómetro para lectura de presión y posteriormente las líneas de salida de cada secador se dirigen a un distribuidor de 4 entradas y una salida con lectura de presión, que constituye el final de la etapa de producción de aire comprimido y da inicio a las líneas de distribución.

## **2.1 Características de diseño**

Los cinco compresores que se encuentran presentes dentro del sistema de producción de aire comprimido que estamos evaluando son compresores de tornillo rotativo, de una etapa, al igual que los dos secadores todo el equipo usado para la producción de aire comprimido es fabricado por la firma internacional Sullair.

### **2.1.1 Descripción de las unidades de compresores**

Los cinco compresores en uso son compresores de tornillo rotativo, los compresores de tornillo rotativo son máquinas que entregan aire comprimido a volumen constante, con algún rango de variación de presión, este tipo de compresores se encuentra disponible para rangos de presión desde 25 hasta 3000 cfm (pies cúbicos por minuto) a presiones de trabajo hasta de 600 psig. En configuraciones de etapa sencilla, doble y triple etapa.

El uso más común para este tipo de compresores es en aplicaciones estacionarias para suministro de aire comprimido para procesos en plantas industriales, entre sus características principales se encuentra que operan a bajos niveles de vibración, el anclaje y estructuras de montaje necesarios no son tan complejos, disponibles en una amplia variedad de rangos de capacidad y presión de trabajo, periodos largos de vida útil con niveles de mantenimiento aceptables.

Los compresores que se emplean en el presente estudio son de tornillo rotativo de etapa sencilla, el diseño de etapa sencilla consiste en un par de rotores que trabajan en conjunto para formar una sola pieza. El rotor macho tiene un número de lóbulos helicoidales, normalmente cuatro, separados 90 grados uno de otro. El rotor hembra tiene un número mayor de lóbulos celda llamados también carcazas, a un rotor macho de cuatro lóbulos le corresponde un rotor hembra de seis carcazas, espaciados entre ellos en 60 grados.

La relación de velocidad del rotor es inversamente proporcional a la relación lóbulos-carcazas, para la relación más común 4-6, si el rotor macho gira a 1800 revoluciones por minuto, el rotor hembra girará a 1200 revoluciones por minuto.

El rotor macho puede tener un sistema de tracción con acople directo, o bien puede ser conducido por sistema de tracción por fajas y poleas, o por engranes o acoplado directamente a un motor eléctrico.

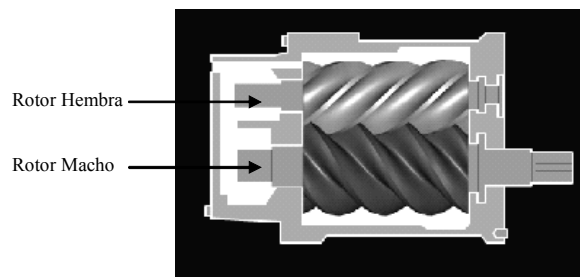
El rotor hembra es conducido por el rotor macho sin contacto metal con metal, entre ellos el único contacto es a través de la película de aceite que se desarrolla entre los rotores. En algunos casos especiales puede el rotor hembra tener un sistema de tracción independiente, pero no es este el caso para ninguno de los compresores que estamos evaluando.

Ambos rotores hembra y macho interactúan dentro de un cilindro, que provee el camino de entrada para el aire de alimentación, en este cilindro se encuentran también los puntos de inyección de aceite para la película que lubrica la operación entre rotores, en la parte final se encuentra la zona de compresión y finalmente los puntos de descarga.

Cada rotor es soportado por un eje y una pareja de rodamientos colocados cerca de los extremos de los ejes de cada rotor. Los rodamientos en uno de los extremos, usualmente en el lado de la descarga, tienen características que ayudan a contener el esfuerzo axial debido a la acción de los rotores, también soportan la carga radial de los rotores.

**Figura 4. Diseño de rotores de un compresor de tornillo**

**Fuente: [www.compair.es](http://www.compair.es)**



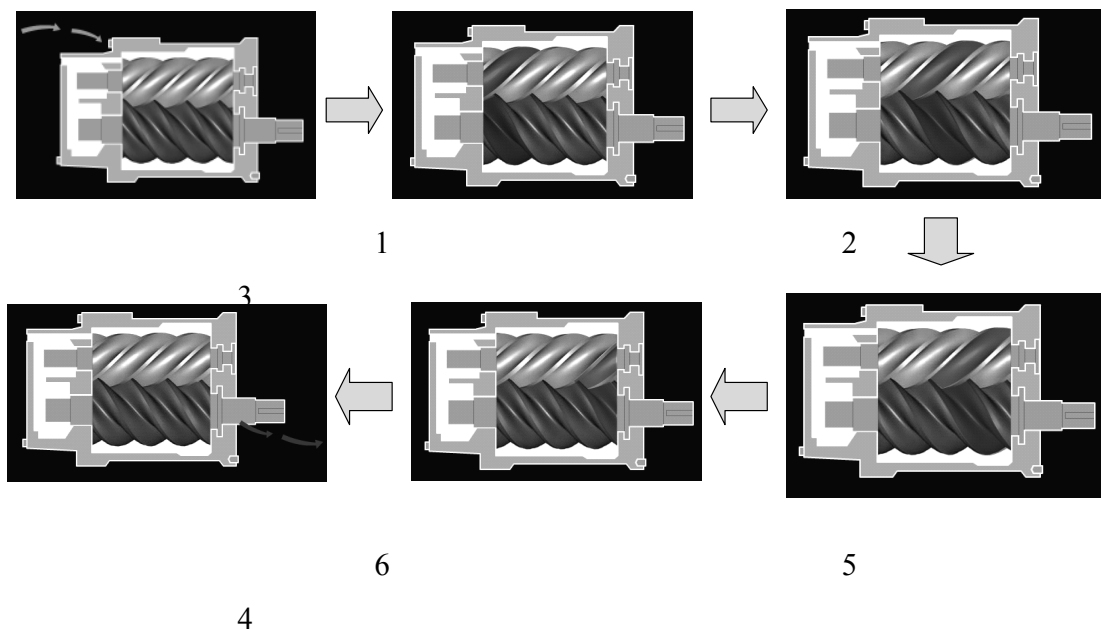
#### **2.1.1.1 Principio de compresión**

En el diseño de etapa sencilla, el aire de alimentación entra por la parte superior del cilindro cerca del extremo del eje de tracción del rotor macho. El puerto de descarga está localizado en la parte baja del extremo opuesto del cilindro.

La compresión inicia cuando el aire de alimentación es enviado hacia la cavidad que hay entre el rotor macho y el rotor hembra, a medida que la rotación continúa uno de los lóbulos del rotor macho cruza el extremo de la zona de alimentación, atrapando el aire en la celda formada entre este lóbulo, la celda del rotor hembra y las paredes del cilindro, la rotación hace que este volumen de aire pase a la cavidad del rotor hembra cuyo volumen es menor, por lo que aumenta la presión sobre el aire, en este paso se encuentra un punto de inyección de aceite que aparte de servir de sello, sirve también para absorber el calor de la compresión. La compresión continúa hasta que el lóbulo del rotor cruza el extremo del puerto de descarga y libera la mezcla de aire comprimido y aceite.

**Figura 5. Diagrama de secuencia para el proceso de compresión de aire**

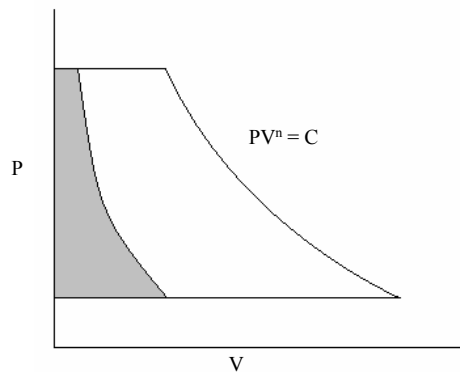
**Fuente: [www.compair.com](http://www.compair.com)**



El fenómeno de compresión de aire está basado en el proceso de compresión isotérmica debido a la acción refrigerante del aceite, la potencia y las pérdidas de capacidad pueden representarse por el área sombreada en la siguiente figura

**Figura 6. Diagrama para la compresión isentrópica de la compresión de aire**

**Fuente: Compressed Air and Gas Institute Handbook pág. 146**

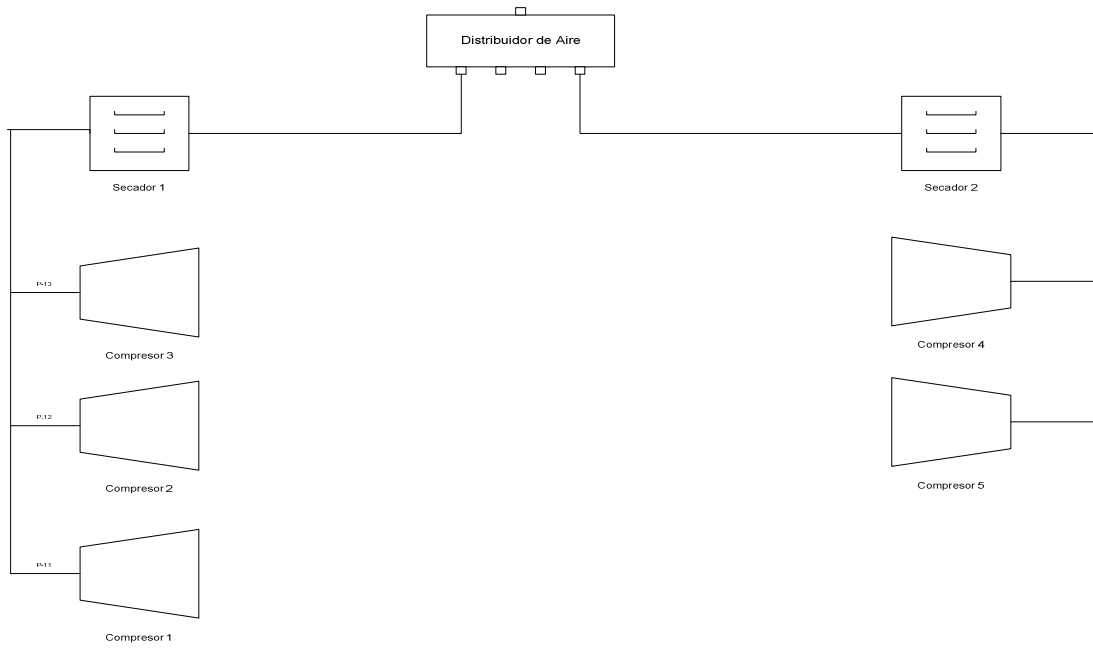


### **2.1.1.2 Descripción de los compresores**

Como se mencionó anteriormente las cinco unidades de compresores son compresores de tornillo rotativo de una sola etapa, para poder hacer la descripción de cada uno de los compresores así como de las dos unidades de secadores, se presenta un esquema de la distribución e identificación de los equipos que se describirán a continuación.



**Figura 7. Distribución de los compresores y secadores**



Las hojas de datos que se presentan a continuación, contienen la información y especificaciones técnicas de los compresores utilizados actualmente, posteriormente se describirán los principios de operación del sistema en conjunto.

## Compresor 1

Fabricante: Sullair

Tipo: Compresor de tornillo rotativo de etapa sencilla

Modelo: LS10A – 40H/A

Número de Serie: 003-127499

Relación/Máximo: 125/135 psi.

Potencia: 40 HP ó 30 KW

Capacidad: 152 CFM ó 4.3 m<sup>3</sup>/min

Largo: 1448 mm.

Ancho: 846 mm.

Alto: 991

Peso: 1140 lbs.

Presión estándar de operación: 115 psig. (7.9 bar)

Rodamientos: anti-fricción

Temperatura ambiente máxima de operación: 41 °C (105 °F)

Enfriamiento: Fluido refrigerante a presión

Aceite: Sullair Sullube

Lubricación: Sullube (Cada 8000 horas de trabajo)

Filtro de Aceite: Cambio cada 1000 Horas

## Motor Eléctrico

Fabricante: Premium Efficiency Toshiba International Corporation

Modelo: 02250103-460R00

Número de serie: 020100672

Encapsulado: DP

Tipo: TKKH

Voltaje: 230/460 VAC trifásico a 60 Hertz

Potencia: 40 HP

Amperaje: 96/48 Amperios (en instalaciones a 208 VAC, 105 Amperios)

Factor de Potencia: 0.83

Frecuencia de sincronismo: 1775 RPM

Polos: 4

Forma: VCKL1

INS: Clase F

Frame: 324TSC

Diseño Nema: B

Código Nema: G

Factor de Servicio: 1.2

Máxima temperatura ambiente: 40 °C

Eficiencia nominal (NEMA) a plena carga: 94.5

## Compresor 2

Fabricante: Sullair

Tipo: Compresor de tornillo rotativo de etapa sencilla

Modelo: 110-30 AC/AC

Número de Serie: 003-67893

Relación/Máximo: 115/125 psi.

Potencia: 30 HP

Capacidad: 113 CFM ó 3.2 m<sup>3</sup>/min

Largo: 1448 mm.

Ancho: 846 mm.

Alto: 991

Peso: 1015 lbs.

Presión estándar de operación: 115 psig. (7.9 bar)

Rodamientos: anti-fricción

Temperatura ambiente máxima de operación: 40 °C (105 °F)

Enfriamiento: Aire

Aceite: Sullair Sullube

Lubricación: Sullube (Cada 8000 horas de trabajo)

Filtro de Aceite: Cambio cada 1000 Horas

## Motor Eléctrico

Fabricante: Lincoln

Modelo: TVSM961

Número de serie: 3110843

Encapsulado: No hay dato

Tipo: TKKH

Voltaje: 230/460 VAC trifásico a 60 Hertz

Potencia: 30 HP

Amperaje: 76/37 Amperios (en instalaciones a 208 VAC, 85 Amperios)

Factor de potencia: No hay dato

Frecuencia de sincronismo: 1755 RPM

Polos: 4

Forma: No hay dato

INS: Clase F

Frame: 286TSC

Diseño Nema: B

Código Nema: G

Factor de Servicio: 1.15

Máxima temperatura ambiente: 40 °C

Eficiencia Nema nominal a plena carga: 87.5

Eficiencia Nema mínima a plena carga: 85.5  
Compresor 3

Fabricante: Sullair

Tipo: Compresor de tornillo rotativo de etapa sencilla

Modelo: 10-40 AC/AC

Número de Serie: 003-91382

Relación/Máximo: 115/125 psi.

Potencia: 40 HP

Capacidad: 152 CFM ó 4.3 m<sup>3</sup>/min

Largo: 1448 mm.

Ancho: 846 mm.

Alto: 991

Peso: 1140 lbs.

Presión estándar de operación: 115 psig. (7.9 bar)

Rodamientos: anti-fricción

Temperatura ambiente máxima de operación: 40 °C (105 °F)

Enfriamiento: Aire

Aceite: Sullair Sullube

Lubricación: Sullube (Cada 8000 horas de trabajo)

Filtro de Aceite: Cambio cada 1000 Horas

Motor Eléctrico

Fabricante: Teco

Modelo: No hay dato

Número de serie: 72B0170098

Encapsulado: No hay dato

Tipo: ASFA XX

Voltaje: 230/460 VAC trifásico a 60 Hertz

Potencia: 40 HP

Amperaje: 94/47 Amperios (en instalaciones a 208 VAC, 105 Amperios)

Factor de potencia: No hay dato

Frecuencia de sincronismo: 1760 RPM

Polos: 4

Forma: No hay dato

INS: Clase F

Frame: DT 324T

Diseño Nema: B

Código Nema: G

Factor de Servicio: 1.15

Máxima temperatura ambiente: 40 °C

Eficiencia Nema nominal a plena carga: 93.0

Eficiencia Nema mínima a plena carga: 91.7  
Compresor 4

Fabricante: Sullair  
Tipo: Compresor de tornillo rotativo de etapa sencilla  
Modelo: 10B-30 AC  
Número de Serie: 003-70261  
Relación/Máximo: 115/125 psi.  
Potencia: 30 HP  
Capacidad: 113 CFM ó 3.2 m<sup>3</sup>/min  
Largo: 1028 mm.  
Ancho: 796 mm.  
Alto: 991  
Peso: 1074 lbs.  
Presión estándar de operación: 115 psig. (7.9 bar)  
Rodamientos: anti-fricción  
Temperatura ambiente máxima de operación: 40 °C (105 °F)  
Enfriamiento: Aire  
Aceite: Sullair Sullube  
Lubricación: Sullube (Cada 8000 horas de trabajo)  
Filtro de Aceite: Cambio cada 1000 Horas

#### Motor Eléctrico

Fabricante: Lincoln  
Modelo: No hay dato  
Número de serie: U3975421545  
Encapsulado: No hay dato  
Tipo: No hay dato  
Voltaje: 230/460 VAC trifásico a 60 Hertz  
Potencia: 30 HP  
Amperaje: 74/37 Amperios (en instalaciones a 208 VAC, 85 Amperios)  
Factor de potencia: No hay dato  
Frecuencia de sincronismo: 1755 RPM  
Polos: 4  
Forma: No hay dato  
INS: Clase F  
Frame: 286TSC  
Diseño Nema: B  
Código Nema: G  
Factor de Servicio: 1.15  
Máxima temperatura ambiente: 40 °C  
Eficiencia Nema nominal a plena carga: 87.5

Eficiencia Nema mínima a plena carga: 85.5  
Compresor 5

Fabricante: Sullair

Tipo: Compresor de tornillo rotativo encapsulado

Modelo: ES8 – 15H ACAC

Número de Serie: 003-111558

Relación/Máximo: 125/135 psi.

Potencia: 15 HP

Capacidad: 65 CFM o 1.84 m<sup>3</sup>/min

Largo: 1020 mm.

Ancho: 787 mm.

Alto: 995

Peso: 1105 lbs.

Presión estándar de operación: 125 psig.

Rodamientos: anti-fricción

Temperatura ambiente máxima de operación: 40 °C (105 °F)

Enfriamiento: Aire

Aceite: Sullair Sullube

Lubricación: Sullube (Cada 8000 horas de trabajo)

Filtro de Aceite: Cambio cada 1000 Horas

Motor Eléctrico

Fabricante: Lincoln

Modelo: No hay dato

Número de serie: U3970306603

Encapsulado: No hay dato

Tipo: No hay dato

Voltaje: 208 VAC trifásico a 60 Hertz

Potencia: 15 HP

Amperaje: 41.9 Amperios

Factor de potencia: No hay dato

Frecuencia de sincronismo: 1760 RPM

Polos: 4

Forma: No hay dato

INS: Clase F

Frame: 254TC

Diseño Nema: B

Código Nema: B

Factor de Servicio: 1.15

Máxima temperatura ambiente: 40 °C

Eficiencia Nema nominal a plena carga: 87.5

Eficiencia Nema mínima a plena carga: 85.5

### **2.1.2 Descripción de las unidades de secadores**

La humedad en el aire comprimido usado en una planta causa problemas en la operación de los equipos neumáticos, en las herramientas, motores y cilindros neumáticos la presencia de humedad provoca corrosión, que puede resultar en daños permanentes a nuestros equipos. Cuando la presencia de humedad en el aire comprimido es muy alta, puede darse el fenómeno que en climas muy fríos, el agua se congele y tape las tuberías provocando daños en la tubería misma, y caídas de presión fluido abajo después del tapón provocado por el congelamiento.

La corrosión en los instrumentos utilizados en control neumático puede causar lecturas falsas o erróneas que puedan interrumpir o apagar procesos dentro de la planta.

La humedad siempre está presente, el aire atmosférico contiene vapor de agua, el cual comienza a condensarse cuando el aire cede suficiente calor hasta enfriarse al punto de saturación la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener el aire sin condensarse depende principalmente de la temperatura y en mucho menor proporción depende de la presión.

La temperatura a la cual ocurre la condensación a cualquier presión dada, es conocida como punto de rocío, y está definido como la temperatura a la cual el vapor de agua empieza a condensarse, es por eso que el punto de rocío es tan importante cuando se dimensiona la etapa de secado.

### **2.1.2.1 Secadores Refrigerados**

Los secadores refrigerados remueven la humedad que hay en el aire comprimido enfriando el aire en un evaporador, así disminuye la capacidad propia del aire a contener la humedad y lo obliga a liberar el agua condensada. El efecto de enfriamiento es derivado de la evaporación de un líquido refrigerante. El agua condensada que resulta después de sufrir este enfriamiento es removida por un separador y una trampa para condensados la cual es drenada al exterior del sistema.

Los secadores refrigerados son diseñados generalmente para operar en rangos de punto de rocío de 33 a 39 °F (0.56 a 3.9 °C), bajo las siguientes condiciones: presión 100 psig, temperatura del aire de entrada (al secador) 100 °F (37.8 °C) caída de presión no mayor a 5 psig. Los fabricantes especifican que a lo largo del sistema de distribución de aire comprimido, el aire comprimido al salir del secador no será expuesto a temperaturas mas bajas de 35 °F (1.67 °C) o más bajas de la temperatura de rocío a la presión de operación, por lo que no debe existir condensación fluido abajo.

### **2.1.2.2 El principio de refrigeración**

El principio usado en un secador refrigerado es esencialmente el mismo que en un sistema de refrigeración o en un aire acondicionado conocido como: “Ciclo de refrigeración por compresión de vapor”.



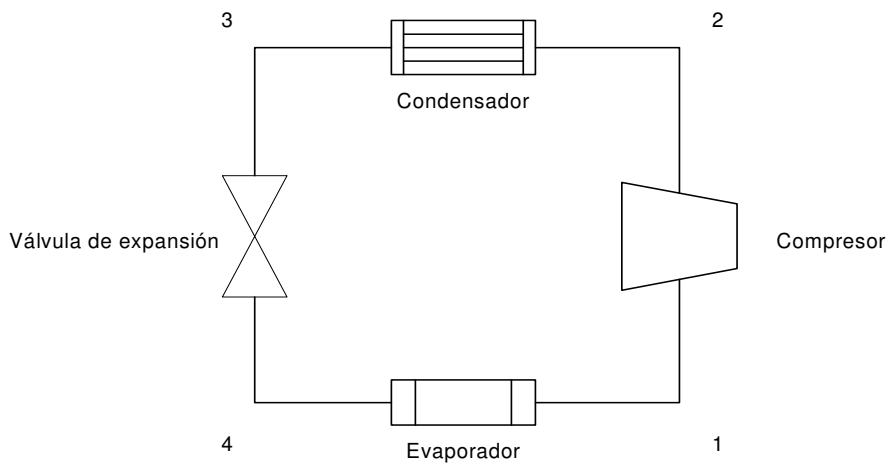
En un secador de expansión directa como los que son evaluados en este proyecto, el refrigerante líquido a alta presión, pasa por un condensador para concluir el paso de estado gaseoso a líquido (después de absorber el calor del aire que está enfriando), luego este líquido condensado pasa por el compresor para llevarlo a alta presión para ser entregado al evaporador por medio de una válvula de expansión, y entonces el evaporador liberará el refrigerante en estado gaseoso para iniciar nuevamente el ciclo.

La función de la válvula de expansión, es controlar el paso de líquido refrigerante hacia el evaporador y disminuir la presión del líquido para que el líquido hierva hasta que el refrigerante alcance la temperatura de saturación correspondiente a la presión que se encuentra en ese momento.

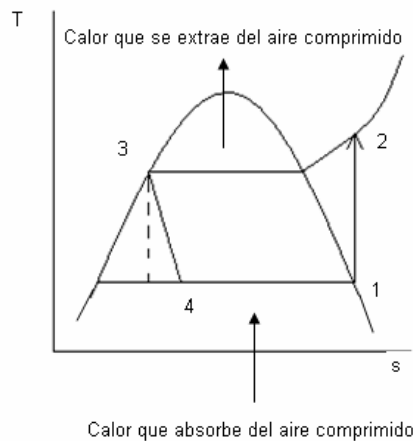
Como el refrigerante ahora a baja presión pasa a través del evaporador, el flujo de calor del aire comprimido hacia el refrigerante, provoca que el refrigerante continúe hirviendo hasta que el refrigerante es completamente evaporado, cuando ocurre esto el aire comprimido pierde suficiente calor que hace que pierda su capacidad para retener la humedad y esta se condensa y libera entonces el agua condensada en el equipo separador y trampas de condensados.

El refrigerante (ahora en estado gaseoso) abandona el evaporador y viaja hacia el compresor, el cual comprime el refrigerante y lo deja como un gas comprimido a alta temperatura (por el calor que ha absorbido del aire comprimido), el cual es forzado hacia un condensador donde es enfriado, cuando el refrigerante (gaseoso) alcanza su temperatura de saturación, se condensa en un líquido comprimido, este líquido es enviado nuevamente al evaporador y el ciclo se repite.

**Figura 8. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor a.**  
**Fuente: Wark, Termodinámica pág. 735**



**Figura 9. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor b.**  
**Fuente: Wark, Termodinámica, pág. 735**



Los secadores de expansión directa, usan un sistema de tubo capilar o una válvula de expansión termostática en conjunto con una válvula de bypass para regular el flujo del refrigerante hacia el evaporador para compensar las fluctuaciones de carga y para prevenir el congelamiento en condiciones de no carga o condiciones de carga baja.

**Figura 10. Vista interna de un secador refrigerado**  
**Fuente: Sullair, Manual Secadores Refrigerados Serie SR, pág. 5**



### **2.1.2.3 Descripción de los secadores**

A continuación se presenta la información y características de los dos secadores que se usan en el cuarto de compresores que estamos evaluando en el presente proyecto.

Secador 1

Fabricante: Sullair

Modelo: SR 325

Número de serie: 2149770002

Capacidad: 325 pies cúbicos por minuto (CFM)

Peso: 309 libras o 140 kg.

Largo: 673 mm. o 26.5 pulgadas

Ancho: 922 mm. o 36.3 pulgadas

Alto: 1212 mm. o 47.7 pulgadas  
Tubería de entrada y salida: 1 ¼" NPT  
Presión de circuito (mínima / máxima): 14.5 / 174 psi  
Temperatura máxima de aire de entrada: 60°C o 140°F  
Temperatura mínima ambiente: 5°C o 41°F  
Voltaje: 230 VAC Trifásico a 60 Hz.  
Corriente: 9 Amperios  
Potencia: 2.9 Kilovatios  
Refrigerante: R407C  
Cantidad de Refrigerante: 77.6 Onzas.  
Aceite: Oil (C) Emkarate RL32CF para el compresor

## Secador 2

Fabricante: Sullair  
Modelo: SR 125  
Número de serie: 2364700003  
Capacidad: 130 pies cúbicos por minuto (CFM)  
Peso: 143libras o 65 kg.  
Largo: 551 mm. o 21.7 pulgadas  
Ancho: 615 mm. o 24.2 pulgadas  
Alto: 790mm. o 31.1 pulgadas  
Tubería de entrada y salida: 1 ¼" NPT  
Presión de circuito (mínima / máxima): 14.5 / 174 psi  
Temperatura máxima de aire de entrada: 60°C o 140°F  
Temperatura mínima ambiente: 5°C o 41°F  
Voltaje: 230 VAC Trifásico a 60 Hz.  
Corriente: 5 Amperios

Potencia: 1.2 Kilovatios

Refrigerante: R407C

Cantidad de Refrigerante: 29 Onzas.

Aceite: Oil (C) Emkarate RL22HB para el compresor

### **2.1.3 Descripción de tubería y unidades de distribución**

La salida del aire comprimido que entrega cada uno de los cinco compresores, está conectada a una tubería de 2 pulgadas de material galvanizado que conduce el aire comprimido a uno de los dos secadores que tratan el aire de cada uno de los dos grupos de compresores (ver figura 7), cada secador entrega el aire tratado a una tubería de 2 pulgadas que llega a la entrada de un distribuidor que tiene disponible una entrada extra libre para poder colocar compresores portátiles cuando alguno de los compresores esté en mantenimiento o fuera de servicio, el distribuidor tiene una salida por medio de una tubería de 2 pulgadas que es la tubería central de distribución la cual recorre las dos plantas de producción y de ella se toman derivaciones secundarias en tubería de 2 pulgadas y finalmente de estas derivaciones secundarias se hacen las tomas para los puntos de servicio en máquinas y estaciones de limpieza en tuberías de 1,  $\frac{3}{4}$  y  $\frac{1}{2}$  pulgada.

Las tuberías de distribución principal, las derivaciones secundarias y las tomas de servicio de maquinaria y de limpieza es tubería galvanizada de hierro, que cumple con las siguientes características:

**Tabla I. Dimensiones de tuberías cédula 40**

**Fuente: Dimensiones y características de la tubería para conducción de agua, gas y aire en hierro negro galvanizado según ASTM A-53-A**

Tamaño Nominal	Diámetro Externo mm.	Espesor de Pared	Presión en PSI	Peso en Kg.	Diámetro Interno mm.
2"	60.30	3.91	2300.00	34.77	52.48
1"	33.40	3.38	700.00	16.00	26.64
¾"	26.70	2.87	700.00	10.76	20.96
½"	21.30	2.77	700.00	8.12	15.76

La configuración de la red de distribución de aire es un anillo cerrado en la planta de producción principal en tubería de hierro galvanizado de 2" y otro anillo cerrado para la planta de especialidades también en tubería de hierro galvanizado de 2" y de cada uno de estos anillos se derivan ramificaciones para alimentar cada uno de los equipos y puntos de consumo de aire comprimido en tuberías de hierro galvanizado de 1", ¾" y ½" cuyas especificaciones se encuentran en la tabla I.

#### **2.1.4 Medición en línea usada actualmente**

Actualmente en todos los puntos donde se hace medición en línea del sistema de producción, distribución y consumo, se mide únicamente la presión relativa del aire comprimido, esta variable se mide por medio de manómetros de tipo de bourdon el cual se describe a continuación.

#### 2.1.4.1 Manómetro de Bourdon

Los tubos de Bourdon son tubos curvados en forma circular de sección oval donde la presión a medir actúa sobre la cara interior del tubo, con lo que la sección oval se aproxima a la forma circular. Mediante el acodamiento del tubo de Bourdon se producen tensiones en el borde que flexionan el tubo. El extremo del tubo sin tensar ejecuta un movimiento que representa una medida de la presión el cual se traslada a una aguja indicadora.

Para presiones hasta 40 bar se utilizan en general tubos curvados de forma circular con un ángulo de torsión de 270°, para presiones superiores, tubos con varias vueltas en forma de tornillo.

Los tubos de Bourdon tienen una fuerza de retorno relativamente baja. Por ello, debe tenerse en cuenta su influencia en la indicación. Los órganos de medición de tubo de Bourdon solamente pueden protegerse contra sobrecarga de manera limitada mediante el apoyo del órgano medidor con un valor límite de presión.

Para cualquier tipo de carga, la relación entre la carga y la deformación es una constante del material, conocida como el módulo de Young. Por ende, si la constante de deformación es conocida, se puede obtener la carga según:

$$\text{Carga} = E \cdot e$$

Donde  $E$  es el módulo de Young y  $e$  la deformación.

De modo que frente a deformaciones pequeñas de materiales elásticos, será posible obtener una cuantificación reproducible de las cargas (fuerzas) solicitantes.

El manómetro de Bourdon depende, precisamente, de la elasticidad de los materiales utilizados en su construcción. Este manómetro, tal vez el más común en plantas de procesos que requieran medición de presiones.

La presión aumentada en el interior del tubo en ocasiones hace que este se endurezca un poco, o que a cambios súbitos de presión tienda a la oscilación es por ello que es común encontrar que la aguja indicadora está inmersa en glicerina para amortiguar los cambios bruscos en la medición.

La escala del medidor, normalmente indica cero cuando el medidor está expuesto a la presión atmosférica, y por arriba de cero, está calibrado en PSI para el sistema de medición utilizado en nuestro proceso indicando presión relativa o manométrica encima del valor de presión atmosférica.

**Figura 11. Manómetros de tubo Bourdon**

**Fuente:** [http://www.ashcroft.com/products.cfm?doc\\_id=165](http://www.ashcroft.com/products.cfm?doc_id=165)





## **2.2 Operación**

La operación de un sistema de aire comprimido generalmente está designada a los miembros del departamento de mantenimiento o de producción y estas personas de acuerdo a su experiencia y conocimiento de los procesos y las capacidades de sus compresores, pueden trabajar con el sistema por medio de controles manuales o medios de control automático, cuando la operación es manual, el operador toma de referencia el valor de la presión o del caudal dependiendo de la medición disponible para tomar decisiones y acciones sobre el proceso, cuando los controles son automáticos normalmente las variables son medidas en línea y existe un sistema de control que toma las decisiones y acciones sobre el sistema. De ahí se define que el flujo del control está definido por 3 pasos: medir, decidir y actuar.

### **2.2.1 Descripción de los principios de operación actual**

De la observación realizada y por lo descrito por los mecánicos de turno, en el sistema de producción de aire comprimido estudiado, se encontró que el personal del departamento de mantenimiento es el responsable de operar el sistema de producción de aire comprimido y son los operadores de producción quienes consumen el aire comprimido en tareas de operación de maquinaria con equipo neumático así como para tareas de limpieza.

Como se describió en este capítulo, actualmente se utiliza únicamente la presión como variable de control, ya que los medidores instalados en línea son solo medidores de presión del aire en diferentes puntos a lo largo de la línea de distribución.

El sistema de aire comprimido que estamos observando se trabaja a una presión nominal de 100 PSI, y los técnicos de mantenimiento usan el manómetro ubicado en la salida del distribuidor de aire que se encuentra en el cuarto de compresores para determinar el encendido y apagado de compresores, no existe una secuencia establecida y los compresores se apegan a los turnos de producción los cuales son normalmente turnos de 24 horas de lunes a sábado con actividad irregular los sábados por la tarde y noche y los días domingos.

En el momento de arranque los días lunes todos los compresores son arrancados para elevar la presión en el manómetro de salida del distribuidor hasta aproximadamente 115 PSI, y se mantienen encendidos a criterio del mecánico de turno, ya que cuando algunas líneas de producción se apagan se procede a apagar algunos compresores, y el día sábado o domingo cuando algunas líneas de producción dejan de trabajar, el sistema se mantiene trabajando con uno o dos compresores.

El día domingo generalmente se deja encendido alguno de los compresores para mantener la presión en la línea de distribución durante la tarde y noche ya que en ese período la demanda es muy baja, hasta que el día lunes empieza otra vez el ciclo.

Actualmente aún cuando la presión ha alcanzado el nivel deseado los compresores siguen funcionando, esto implica que continúan consumiendo energía eléctrica, además que las horas de uso siguen corriendo lo que acelera el cumplimiento de los ciclos de mantenimiento, aumentando así también los costos por mantenimiento.

### **2.2.2 Tiempos de operación de cada compresor**

Durante cinco semanas de observación se anotó las horas de operación que tuvo cada compresor durante turnos de 24 horas, para determinar cuantas horas de trabajo tienen actualmente cada uno de los compresores

**Tabla II. Horas de uso para cada compresor**

Horas de trabajo para cada compresor							
Semana 1	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Compresor	Horas encendido						
1	24	24	24	24	24	24	6
2	24	24	24	24	24	24	24
3	24	24	24	24	24	24	6
4	24	24	24	24	24	24	0
5	24	0	0	24	24	0	0
Semana 2	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Compresor	Horas encendido						
1	24	24	24	24	24	24	0
2	24	24	24	24	24	24	0
3	24	24	24	24	24	24	24
4	24	24	24	24	24	24	0
5	24	0	0	0	24	0	0
Semana 3	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Compresor	Horas encendido						
1	24	24	24	24	24	24	6
2	24	24	24	24	24	24	24
3	24	24	24	24	24	24	4
4	24	24	24	24	24	0	0
5	24	24	0	24	0	0	0
Semana 4	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Compresor	Horas encendido						
1	24	24	24	24	24	24	6
2	24	24	24	24	24	24	24
3	24	24	24	24	24	24	4
4	24	24	24	24	24	0	0
5	24	0	0	0	0	0	0
Semana 5	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Compresor	Horas encendido						
1	24	24	24	24	24	24	6
2	24	24	24	24	24	24	24
3	24	24	24	24	24	24	4
4	24	24	24	24	24	0	0
5	24	0	0	0	0	0	0

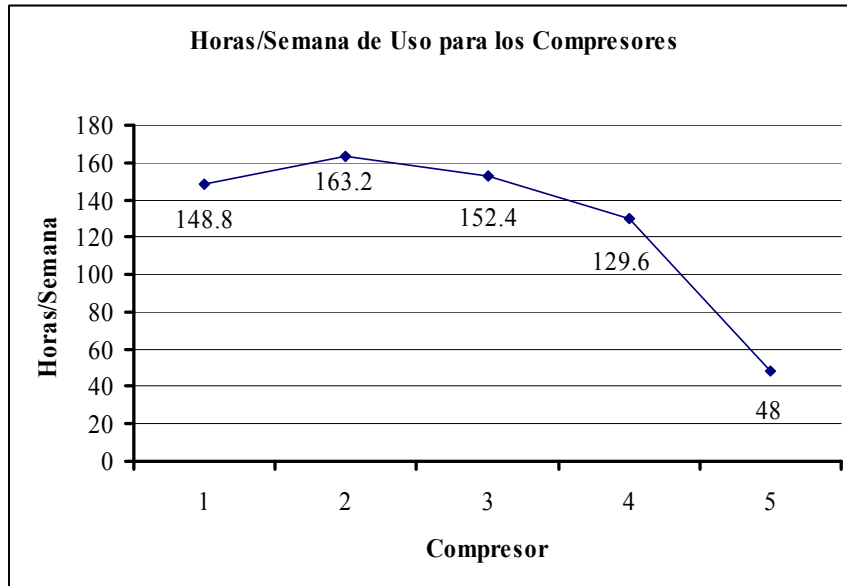
**Tabla III. Horas de uso durante 5 semanas**

Horas de uso durante 5 semanas		
Compresor	Horas	Horas/Semana
1	744	148.8
2	816	163.2
3	762	152.4
4	648	129.6
5	240	48

**2.2.3 Gráficos de operación del sistema y de cada compresor.**

De los datos de horas que se tuvo encendido cada compresor durante 5 semanas de observación se estableció la tendencia de uso de horas por semana de cada uno de los compresores y los resultados se resumen en el siguiente gráfico.

**Figura 12. Horas/Semana de uso para los compresores**



### 2.3 Capacidad y eficiencia

La capacidad de un proceso es una variable que indica que cantidad de una necesidad puede ser satisfecha, desde otro punto de vista la capacidad de un proceso refleja en que cantidad puede satisfacer las necesidades que dieron origen a su implementación, y la eficiencia indica una relación entre la potencia de salida y potencia de entrada utilizada en el proceso.

La eficiencia también está relacionada a las características de operación real comparadas con las características de operación teórica máxima esperada del proceso.

#### 2.3.1 Cálculo de capacidades

La capacidad de un proceso se define cuando conocemos que cantidad de una determinada variable podemos entregar, para el caso de el proceso que estamos evaluando, la capacidad que debe tener el proceso debe ser suficiente para suministrar el aire comprimido que va a demandar el sistema de producción, limpieza y operaciones dentro de una planta de producción de galleta.

### 2.3.1.1 Capacidad de compresores

Anteriormente se describieron las características teóricas de los compresores, cuando los compresores salen de la fábrica de manufactura el fabricante define la capacidad de cada uno de ellos a razón de flujo de aire comprimido de entrega a una determinada presión.

El volumen de aire comprimido que sale en el punto de descarga de cada compresor será proporcional a la frecuencia mecánica de giro de la pareja de rotores del compresor, esto implica que si no hay ninguna deformación mecánica severa en los rotores y sus componentes mecánicos y la frecuencia eléctrica son aceptablemente constantes, la capacidad teórica de compresión no varía.

La presión nominal para los cinco compresores usados en esta instalación es de 115 PSI, y las capacidades nominales de los compresores son:

**Tabla IV. Capacidades de compresores**

Capacidad nominal de compresores	
Compresor	Pies cúbicos por

	minuto
1	152
2	113
3	152
4	113
5	65
Total	595

De la tabla anterior podemos observar que la capacidad máxima total del proceso de producción de aire comprimido es de 595 pies cúbicos por minuto de aire a una presión nominal de 115 PSI., y este será la demanda máxima que dentro del sistema de distribución y consumo puede satisfacerse al nivel de presión nominal.

Si este límite de demanda es sobrepasado, la presión del sistema empieza a decaer lo que puede causar que algunos equipos funcionen incorrectamente y algunas protecciones se disparen por falta de presión de aire y esto produzca paros en las líneas de producción causando pérdidas o daños por el tiempo improductivo causado.

### **2.3.1.2 Capacidad de secadores**

En el sistema de producción de aire comprimido que estamos evaluando tenemos dos unidades de secadores refrigerados, cada uno de ellos está asociado a un grupo de compresores, por lo que es necesario evaluar si los secadores tienen la capacidad necesaria para tratar el aire comprimido que entregan los compresores que están asociados a cada uno.



La capacidad de los secadores refrigerados está dada por la cantidad de flujo de aire que al pasar por el puede ser liberado del contenido de vapor de agua, por lo que es necesario que la cantidad de aire que entregan todos los compresores asociados a cada secador sea menor a la capacidad máxima que tiene el secador.

**Tabla V. Capacidad de Secadores**

Secador	Capacidad CFM	Compresor	Capacidad CFM
1	325	1	152
		2	113
		3	152
			417
2	130	4	113
		5	65
			178
Total	455		595

De la tabla anterior podemos observar que la capacidad instalada de los secadores no tiene la capacidad de tratar el aire en el momento que el sistema esté produciendo aire comprimido a su máxima capacidad.

Cuando los cinco compresores están comprimiendo aire y entregándolo al distribuidor de aire, hay una cantidad de aire que proviene de los compresores 4 y 5 que no es posible tratarla por lo que el secador 2 al no tener la capacidad de tratar el aire de los dos compresores que tiene asociados representa la necesidad de remplazarse por un secador que tenga la capacidad de tratar el aire producido por sus 2 compresores asociados.

### **2.3.2 Cálculo de eficiencia de cada compresor**

La eficiencia de un proceso es la relación de la cantidad potencia de salida respecto a la cantidad de potencia de entrada.

Dentro de los recursos necesarios para hacer funcionar un sistema de producción de aire comprimido, el factor más impactante es el gasto por potencia eléctrica que demandan los motores eléctricos para realizar el trabajo de compresión.

De ahí que una forma concreta de estimar la eficiencia de un compresor es conocer cuanto estamos consumiendo en potencia eléctrica para producir una determinada cantidad de aire comprimido.

En la actualidad los fabricantes de motores eléctricos tratan de desarrollar diseños de motores que sean cada vez más eficientes, enfocando esta eficiencia eléctrica a medir la cantidad de energía eléctrica que logra un motor transformar en energía mecánica.

Para hacer más eficientes los motores, existen varias técnicas que mejoran el desempeño de los motores entre ellas encontramos, usar más cobre en los devanados del estator para reducir las pérdidas en el cobre, hacer más grandes las longitudes de los núcleos del rotor y del estator para reducir la densidad de flujo magnético en el entrehierro de la máquina, para reducir la saturación magnética de misma y así disminuir las pérdidas en el núcleo.

Además se utiliza más acero en el estator, lo que permite que una mayor cantidad de calor se disipe hacia fuera del motor y así reducir las temperaturas de operación, se diseñan adecuadamente las formas de los ventiladores para que el aire no produzca mucha resistencia mecánica a la rotación del motor por rozamiento.

Se usan aceros de alto grado eléctrico para el estator para reducir las pérdidas por histéresis.

Se usa también aceros de alta resistividad interna, se lamina en calibres especialmente delgados para reducir las corrientes parásitas en el motor y el rotor es maquinado con mucha precisión para producir un entrehierro uniforme para reducir las pérdidas por dispersión en el motor.

La Asociación Nacional de Fabricantes de Equipos Eléctricos NEMA, por sus siglas en inglés, ha adoptado una técnica estándar basada en el método B de la norma del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE, para medir la eficiencia de los motores.

### **2.3.2.1 Método B IEEE 112**

Para demostrar la eficiencia del uso de la energía para los motores eléctricos se requiere de un método de prueba debidamente documentado e implementado.

Para poder comparar un motor con otro se requiere que éste método de prueba sea estandarizado de preferencia que el método sea reconocido por algún ente nacional o extranjero.

En el caso del instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos de Estados Unidos IEEE por sus siglas en inglés, en su estándar número 112B y la asociación canadiense de estandarización en su estándar C390 han determinado que estos dos estándares son equivalentes y que pueden ser aplicados por los usuarios comunes de motores eléctricos.

Para entender todo esto, debemos mencionar que hay muchas formas diferentes de estimar la eficiencia de un motor eléctrico, la forma más evidente es conectar al motor una carga conocida, y medir la potencia eléctrica consumida por el motor para alimentar dicha carga.

Asumiendo que ambos elementos son conocidos, la potencia de entrada y el trabajo de salida, la relación matemática de estos dos términos es lo que vamos a llamar eficiencia.

$$\eta = \text{Eficiencia} = \frac{\text{Trabajo de Salida}}{\text{Energía de Entrada}} = \frac{\text{Trabajo de Salida}}{\text{Trabajo de Salida} + \text{Pérdidas}}$$

La mayor parte de estas pérdidas se manifiesta en el calor que genera el motor, y por lo tanto esta energía no está disponible para realizar trabajo.

Las pérdidas en los motores de inducción normalmente son divididas en las siguientes clases:

- Pérdidas en el hierro o en el acero, energía perdida por la magnetización de los núcleos y para mantenerlos magnetizados.
- Pérdidas en el cobre del estator, calor producido debido a la resistencia del conductor de cobre del estator cuando las corrientes circulan a través de él.
- Pérdidas en el cobre del rotor, calor producido debido a la resistencia de los conductores y barras del rotor, cuando las corrientes del rotor circulan a través de él.

- Fricción por rozamiento, energía que se pierde por la fricción en los rodamientos, la energía necesaria para mantener girando los ventiladores, y la inercia del eje del rotor.
- Pérdidas por dispersión, es otro tipo de energía que se pierde que no puede clasificarse dentro de ninguna de las categorías anteriores, y están relacionadas con las características de construcción del motor, partes que no producen potencia de salida cerca o dentro de los campos magnéticos del motor y no interactúan con ninguno de estos campos.

No es tan sencilla la medición de la eficiencia de un motor eléctrico, ya que la eficiencia no es la misma a diferentes temperaturas de operación, no es la misma con cargas variables debido a que la relación trabajo versus energía no se comporta linealmente cuando aumenta el trabajo.

Por eso debe establecerse un procedimiento que defina cual medida de eficiencia será tomada como real, además debe considerarse la precisión que consideraremos aceptables en dichas mediciones.

La potencia de salida y entrada son cantidades normalmente estables, y que raramente presentan una diferencia entre ellas de más de 15%, además tampoco es común encontrar diferencias menores de 4% entre ellas.

De esto se puede concluir que para motores pequeños muchas veces los valores de potencia de entrada y salida son tan pequeños que la diferencia entre ambos podría llegar a ser tan pequeña que no nos indicaría un valor exacto que refleje una eficiencia real.

También de lo anterior podemos deducir que para motores grandes, donde los costos de operación pueden ser significativamente mayores cuando hay una pequeña disminución en la relación de eficiencia, veremos por qué es muchas veces muy importante tener mediciones precisas, por lo tanto la precisión de las mediciones también está contemplada en los estándares para normalizar las pruebas.

Para contemplar todos estos factores el IEEE publicó en su estándar 112 varios métodos que incluyen los estándares para definir la eficiencia de un motor.

El método B IEEE 112, contempla varios tipos de pruebas, que son pruebas sin carga, pruebas de temperatura y pruebas con carga aplicada.

Durante la prueba sin carga el motor es conectado a voltaje y frecuencia regulada y se deja correr libre de carga hasta que la lectura de un vatímetro en la entrada muestra una lectura estable, lo que puede durar desde un instante hasta algunas horas.

Cuando la lectura está estable, se procede a hacer lecturas de voltaje y corriente variando el voltaje desde el valor un valor de 125% del valor del voltaje nominal, hasta un valor de voltaje mínimo donde la corriente motriz también caiga junto con el voltaje.

Usando estas lecturas combinadas con la temperatura del aire del ambiente, el aire que circula el ventilador de enfriamiento y la resistencia por rozamiento del aire, podemos obtener dos tipos de pérdidas del motor, las pérdidas en el hierro y las pérdidas por fricción.

Las pérdidas en el hierro variarán con el voltaje mientras que las pérdidas por fricción permanecerán relativamente constantes, ya que la velocidad de giro también se mantendrá constante.

También se definen las pérdidas en el cobre del estator midiendo la corriente que circula en el estator y midiendo la resistencia del mismo cuando el motor no está energizado.

Cuando se observa el comportamiento en bajo voltaje, se puede sacar una constante de pérdida por fricción, si restamos esta constante de las medidas tomadas en alto voltaje a 125% del voltaje nominal determinaremos la constante de pérdida en el hierro.

Las mediciones de temperatura involucran pruebas en el motor bajo condiciones de carga controlada, a voltaje y frecuencia nominales, estas mediciones indican que tan estable se puede mantener el voltaje de entrada para una carga estable, este procedimiento se mantiene hasta que el motor alcanza una temperatura estable, la prueba



será satisfactoria cuando la temperatura del motor no varíe más de un grado centígrado en un período de treinta minutos.

Las pruebas bajo carga son realizadas con valores de frecuencia y voltaje nominales, aplicando seis diferentes cargas al motor empezando desde valores de 25 % de la carga nominal del motor, con incrementos del 25 % del valor de la carga nominal hasta llegar a un valor de 1.5 veces el valor de carga nominal. El comportamiento de variables como el torque, corriente, velocidad de giro del motor, temperatura nos darán información que nos indican como se comporta el motor en diferentes niveles de carga.

Hasta este punto las mediciones al motor están completas y se comienza el análisis.

Las pérdidas conocidas o calculadas directamente provienen de la tabulación de las lecturas, teniendo la consideración de que las temperaturas de operación se han mantenido sin variaciones severas, se definen las pérdidas para los seis diferentes niveles de carga que se mencionaron anteriormente.

Las pérdidas en el hierro y las pérdidas por fricción se determinan en el análisis de no carga o prueba de vacío, y son consideradas constantes en todos los análisis.

La resistencia por rozamiento mecánico, por el aire y rodamientos, serán susceptibles a correcciones por temperatura, y la medición de corriente y el voltaje aplicado nos darán el resultado de las pérdidas por el cobre en el estator.

Como la velocidad de giro del motor es conocida, el valor del deslizamiento del motor también será conocido, ya que el deslizamiento es la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad de giro del rotor.

Conociendo el deslizamiento, la potencia de entrada, y las otras pérdidas en los diferentes niveles de carga, se determinan las pérdidas en el rotor, aparte nos queda un grupo de pérdidas por definir que son las pérdidas por dispersión, típicamente los valores de este tipo de pérdida son del rango del 1% por lo que su determinación queda fuera del alcance práctico del método.

Debido a que las pruebas descritas anteriormente dependen mucho de la precisión de los instrumentos de medición que se utilizan y que la variación en los cálculos realizados son afectados muchas veces por el error humano, los fabricantes de motores eléctricos recurren a entidades debidamente autorizada por los institutos de normalización internacional para que certifiquen o avalen la eficiencia de los motores que ponen a disposición del consumidor, por lo que no es común que los usuarios promedio o comunes realicen estas pruebas sino en vez de esto, piden al fabricante los certificados de prueba de eficiencia que están publicados en las placas de identificación de los motores.

En la mayoría de los casos en la placa de identificación de los motores no aparecen los resultados de todas las pruebas, sino en ellas hacen referencia a una clasificación de eficiencia basada en los estándares de NEMA.

### **2.3.2.2 Eficiencia Nema**

NEMA también ha establecido una clasificación llamada eficiencia nominal NEMA, la cual se basa en el método B descrito anteriormente, esta clasificación aparece como dato en las placas de los motores eléctricos de diseño NEMA A, B y C, este código de diseño, clasifica los motores de inducción de acuerdo a la forma de su rotor, y no debe confundirse con la clasificación de eficiencia.

La eficiencia nominal indica o refleja la eficiencia media de un gran número de motores de un modelo determinado y garantiza ciertos rangos de eficiencia para este tipo de motores, así el usuario puede conocer cual es la eficiencia mínima a la que puede trabajar un motor, se concluye que cuando un fabricante de un motor publica su rango de eficiencia NEMA es porque ha realizado todas las pruebas descritas en el método B IEEE 112 para respaldar sus resultados. El usuario está en su derecho de solicitar al fabricante las hojas de certificado de las pruebas realizadas cuando así lo desee.

#### **Tabla VI. NEMA, eficiencias nominales normalizadas**

**Fuente: Chapman, Máquinas Eléctricas**

Eficiencia Nominal	Eficiencia Mínima Garantizada
95.0	94.1
94.5	93.6
94.1	93.0
93.6	92.4
93.0	91.7
92.4	91.0
91.7	90.2
91.0	89.5
90.2	88.5
89.5	87.5
88.5	86.5
87.5	85.5
86.5	84.0
85.5	82.5
84.0	81.5
82.5	80.0
81.5	78.5

De acá podemos partir para comparar la eficiencia de los motores que tenemos actualmente en nuestro sistema de producción de aire, ya que todos cuentan dentro de sus características con una clasificación bajo norma NEMA, lo que nos permite definir una clasificación de nuestros compresores según su eficiencia NEMA.

**Tabla VII. Eficiencia NEMA de los motores de los cinco compresores evaluados.**

Eficiencias Nominales de Compresores		
Compresor	Eficiencia Nema Nominal	Eficiencia Mínima Garantizada
1	94.5	93.6
2	87.5	85.5
3	93.0	91.7
4	87.5	85.5
5	87.5	85.5

### 2.3.2.3 Eficiencia real

La necesidad de conocer los valores de eficiencia de los compresores que tenemos disponibles en nuestro proceso de producción de aire comprimido es para determinar cual es el orden de preferencia para tener encendido un compresor u otro, basando nuestra decisión en que su eficiencia nominal sea más alta, es decir darle más preferencia de uso al compresor que puede transformar más energía eléctrica en trabajo de compresión, conocer que tan cerca de sus valores nominales o de diseño está operando cada uno enfocando todo esto a usar preferiblemente los compresores que nos entreguen más pies cúbicos de aire comprimido por kilovatio hora de consumo.

Para realizar este análisis ya conocemos la eficiencia nominal de cada compresor, conocemos la capacidad de cada uno de ellos y para complementar el estudio se hicieron mediciones de consumo de corriente en cada una de las fases de los mismos para determinar el consumo real para cada uno de los compresores, los datos se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla VIII. Consumo de Corriente de cada uno de los compresores**

Compresor	Corriente nominal o de diseño (Amp)	Corriente de Fase 1 (Amp)	Corriente de Fase 2 (Amp)	Corriente de Fase 3 (Amp)	Promedio
1	105	107.1	108.4	104.5	106.67
2	85	78.3	77.8	73.2	76.43
3	105	101.2	102.5	103	102.23
4	85	83	84.5	82.6	83.37
5	41.9	36.2	34.6	34.6	35.13

Otra relación que nos interesa conocer es cuantos pies cúbicos de aire comprimido nos entrega cada compresor y cuantos kilovatios está consumiendo para ello, conocemos el valor del voltaje promedio medido, el factor de potencia, la corriente en líneas, por lo que de la definición de potencia

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times FP$$

Conocemos la cantidad de vatios consumidos por cada compresor, sabemos que un kilovatio equivale a mil vatios, y conociendo la capacidad de pies cúbicos por minuto que entrega cada compresor finalmente construimos la siguiente tabla.

**Tabla IX. Datos para determinar relación aire comprimido y potencia eléctrica**

Compresor	Corriente promedio medida (Amp)	Voltaje promedio medida (Voltios)	Factor De Potencia	Kilovatios	HP	Pies Cúbicos por minuto (CFM)	CFM/KW
1	106.67	210.5	0.83	32.28	43.27	152	4.71
2	76.43	207.9	0.8	22.02	29.52	113	5.13
3	102.23	206.4	0.85	31.07	41.64	152	4.89
4	83.37	208	0.8	24.03	32.21	113	4.70
5	35.13	212.25	0.8	10.33	13.85	65	6.29

Con estos datos conocemos el valor real de la relación de producto obtenido que para nuestro caso es aire comprimido y el recurso de energía eléctrica consumida en kilovatios, lo cual podemos definir como eficiencia real medida en el proceso.

### **3. COSTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA**

La razón de ser de cualquier proyecto de ingeniería, aparte de resolver un problema o facilitar la operación de un proceso, es buscar que esta solución sea conveniente desde el punto de vista económico, esto quiere decir que vamos a buscar que nuestras soluciones se enfoquen a reducir los costos o gastos de recursos que actualmente utilizamos para realizar cualquier tarea o proceso.

Dentro del presente estudio uno de los enfoques que se da, es conocer cuanto gastamos por concepto de energía eléctrica utilizada para mantener operando un sistema de producción de aire comprimido en una planta de galletas para proyectar los beneficios que podemos obtener depuse de implementar este diseño.

En el título IV de la Ley General de La Electricidad, se establece el régimen de precios para la electricidad, en sus disposiciones generales este título establece la regulación de la participación de los diferentes sectores que intervienen en la prestación del servicio de suministro de energía eléctrica, generadores, distribuidores, comercializadores, transportistas, entes propietarios de subestaciones de transformación y distribución, importadores y exportadores que resulten involucrados en la operación del sistema eléctrico nacional.



El costo que pagamos mensualmente por el consumo de energía eléctrica contempla el pago de varios servicios asociados a la prestación del mismo, en el precio facturado mensualmente según lo establecido en el título IV capítulos II y III se contempla el pago por concepto de peajes por el uso de de los sistemas de transmisión y distribución, el uso de estaciones de transformación, se contempla el pago de la generación de la energía, además de la potencia consumida, penalizaciones, y otros cargos contemplados en la ley general de la electricidad y el reglamento del mercado mayorista.

### **3.1 Definiciones**

En el cálculo de los costos pagados por concepto de energía eléctrica tomaremos de base la interpretación de una factura por servicio de suministro de energía eléctrica y definiremos cada uno de los conceptos contemplados como cargos dentro de esta facturación y expondremos la definición de cada uno de estos conceptos.

#### **3.1.1 Demanda**

La demanda eléctrica se define como la cantidad de potencia eléctrica que requieren los equipos dentro de una instalación en un período de tiempo determinado.

La demanda se mide en kilovatios y es la potencia que debe estar disponible para que una instalación opere normalmente, el valor máximo de demanda se da cuando el cien por ciento de los equipos están encendidos y están conectados al suministro de energía eléctrica.

El comportamiento de la demanda depende de la operación de la instalación y varía de usuario a usuario según las cargas que tenga instaladas y el tiempo de servicio o de operación de cada una de ellas.

Cuando un usuario contrata un servicio, debe estimar su demanda máxima ya que el proveedor de energía eléctrica está comprometido a satisfacer completamente la demanda máxima contratada estimada por el usuario, si un usuario presenta una demanda mayor a su demanda máxima estimada, será castigado con penalizaciones económicas establecidas por las leyes y normas de la electricidad.

Los cargos por demanda es la forma económica en que un proveedor de energía absorbe el costo de tener la disponibilidad de entregar en cualquier momento la cantidad de energía eléctrica requerida por el usuario, es por esta razón que se mide el nivel más alto de demanda durante el período de facturación para usar este el valor que facturará al final del período.

### **3.1.1.1 Medición de la demanda**

La demanda eléctrica se mide en intervalos de quince minutos durante el período de facturación que nominalmente es de un mes, los valores medidos son registrados por aparatos llamados demandómetros, los cuales almacenan el valor más alto registrado durante todo el período de medición, que es el valor que se cobrará en la factura del servicio, la Empresa Eléctrica de Guatemala, instala demandómetros en las instalaciones que tengan un valor de potencia máxima mayor a los 11 kilovatios.

Durante estos períodos de quince minutos, aún cargas instantáneas quedan registradas aunque su permanencia haya sido muy corta por ejemplo los picos de corriente por arranque de motores, o los picos que se dan cuando varias cargas actúan simultáneamente, por eso un demandómetro basa su medición en la cantidad de corriente que está demandando la instalación en cada instante registrando el valor más alto en cada período, de ahí concluimos que nuestro proveedor de energía en realidad nos cobrará por la disponibilidad más que por el consumo de energía eléctrica.

### **3.1.1.2 Demandómetros**

El demandómetro es un dispositivo que indica o registra la demanda, es decir mide la razón potencia eléctrica con el tiempo, la demanda como ya dijimos, es la carga en kilovatios promediada en un intervalo de tiempo determinado, mientras que la demanda máxima es la mayor demanda de una instalación durante un período de medición determinado, existen varios tipos de demandómetros:

#### **3.1.1.2.1 Demandómetro Integrador**

Es un contador normal equipado con los accesorios necesarios para medir demanda, es decir posee algún medio de almacenar el valor de demanda, tiene un motor con un mecanismo de medición de tiempo y un sistema de engranajes para mantener la medición del valor de demanda.

El registro se realiza sumando el número de revoluciones o vueltas que da el disco del contador durante el período que se está midiendo la demanda, el cual despliega en la carátula de lectura. La aguja indicadora es del tipo de empuje, lo que quiere decir que no reinicia su valor a cero, de manera que automáticamente queda registrada la demanda máxima durante el período de lectura hasta que se reinicia a cero manualmente, lo que pone fin al período de medición y en teoría también de facturación.

#### **3.1.1.2.2 Demandómetro Térmico**

Este tipo de demandómetro es independiente del contador, y se basa en el efecto térmico de la corriente que fluye a través del medidor, la ventaja de este tipo de medidor es que se puede colocar en cualquier punto de la instalación.

Los demandómetros térmicos son esencialmente amperímetros o vatímetros, ya sea de tipo indicador o registrador, la diferencia con los medidores convencionales es que los demandómetros responden muy lentamente a los cambios de la carga, y por lo tanto su indicación es proporcional al promedio durante un período determinado y no al valor instantáneo, al igual que los demandómetros integradores, la aguja es del tipo de empuje por lo que su valor solo se reinicia a cero manualmente, quedando registrado en todo momento el valor de demanda máxima.

#### **3.1.1.2.3 Demandómetro de corriente**

El principio de funcionamiento de este tipo de demandómetros se basa en registrar la corriente máxima, pero se calibra en una escala que despliega la lectura en kilovatios, el principio de funcionamiento se basa en la suposición de un nivel de voltaje constante.

Consiste en dos bobinas bimetálicas, colocadas en oposición sobre un mismo eje, con el objeto de compensar cambios en la temperatura del ambiente, una de las bobinas se calienta por la energía disipada en una pequeña resistencia colocada en serie con la corriente de carga que circula, como el incremento en la temperatura es muy lento, el valor desplegado es proporcional a la demanda media.

#### **3.1.1.2.4 Demandómetro de Potencia**

La construcción de este tipo de demandómetros es similar al anterior, pero su lectura está afectada no solamente por la corriente sino también por el voltaje, el cual afecta la medición por medio de un transformador de potencial.

Al actuar sobre las bobinas bimetálicas solamente el voltaje o solamente la corriente, su reacción es nula, al aplicarse voltaje y corriente, el calor desarrollado en las resistencias será proporcional tanto a la variación de potencial como corriente, por lo que desplegará un valor debidamente calibrado de potencia media.

#### **3.1.1.2.5 Demandómetro Electrónico**

En la actualidad las mediciones utilizadas tienen que tener capacidad de almacenar datos y de transferirlos a larga distancia, por lo que se hace necesario tener instrumentos de medición electrónicos.

Este tipo de medidores utilizan para su funcionamiento microprocesadores y circuitos integrados y bancos de memoria de lectura, de acceso aleatorio, y memoria no volátil para el registro de datos.

Los medidores electrónicos utilizan también dispositivos de disco móvil, pero incorporan el uso de codificadores para leer velocidad de rotación, y contadores electrónicos para registrar el número de vueltas, estos valores se leen en sensores de rotación y se pasan por un emisor de pulsos que da entrada a microprocesadores que almacenarán las lecturas, y por medio de un circuito temporizador va registrando la información en intervalos de quince minutos y va guardando la tendencia del comportamiento de estas lecturas para calcular la demanda en los diferentes intervalos.

El valor de medición desplegada se basa en el mismo principio que es medir la cantidad de corriente que circula y durante el intervalo establecido determinar el valor más alto.

### **3.1.2 Energía**

Para fines de facturación el concepto de energía es representado por la integración de la potencia en el tiempo, esto quiere decir que es la suma de los kilovatios hora que han sido requeridos por el usuario al finalizar el período de tiempo de facturación.

Difiere del valor o concepto de demanda en que este valor no se reinicia cada quince minutos sino va sumando los kilovatios hora consumidos a lo largo del mes facturado.

Este valor está relacionado con el valor de energía que nos publica el proveedor de energía eléctrica y es el que se multiplica en la factura por el precio en dinero por KWH consumido bajo el concepto de energía.

### **3.1.3 Normas de facturación aplicadas por el proveedor de energía**

Los comercializadores de energía eléctrica aplican diferentes normas para la facturación y costeo de la energía eléctrica, todos estos principios, regulaciones y normas están definidos y regulados en la ley general de la electricidad, en las normas técnicas del servicio de distribución y en el reglamento del mercado mayorista.

Para el efecto del estudio que estamos realizando, queremos conocer cual es el costo de operación por concepto de pago por consumo de energía eléctrica únicamente de la sala de producción de aire comprimido, además debemos considerar que la instalación de esta sala está asociada a una instalación que está incluida como consumidor mayorista, por lo que la facturación y costeo de energía eléctrica está normado dentro del reglamento del mercado mayorista.

#### **3.1.3.1 Potencia Contratada**

Cuando un usuario establece un contrato con un proveedor de energía eléctrica, define en este contrato la potencia que el proveedor está obligado a tener disponible en cualquier momento que el usuario la requiera.



La potencia contratada da derecho a tener una demanda máxima de potencia igual a dicho valor suscrito, la unidad de medida para este valor será en kilovatios, para nuestro caso de estudio la potencia contratada para la instalación general es de 500 kilovatios.

Si el distribuidor detecta que la potencia utilizada por el usuario es mayor que la potencia contratada, según el artículo 75 de las normas técnicas de sistemas de distribución, el proveedor podrá cobrar la potencia utilizada en exceso a un precio máximo de dos veces el valor unitario por potencia contratada de la tarifa correspondiente, por cada kilovatio utilizado en exceso.

### **3.1.3.2 Demanda máxima**

Es el valor máximo registrado por los demandómetros y es el valor que se aplicará para objeto de facturación, su unidad de medida es en kilovatios, y para nuestro caso de estudio en dos meses de observación, el valor promedio ha sido de 432.8 Kilovatios, datos de la demanda de toda la planta, lo que nos da un factor de holgura actual entre la potencia contratada y la demanda máxima de:

$$\text{Factor de holgura} = 1 - \text{Demanda máxima/Potencia contratada} = 432.8 \text{ KW} / 500 \text{ KW}$$

$$\text{Factor de holgura} = 1 - 0.8656 = 0.1344 \text{ o } 13.44\%$$

Si el valor de demanda máxima es menor a la potencia contratada, el valor de demanda máxima se multiplica por el valor en dinero por KW mes que dentro del contrato se ha establecido y es el valor que en la factura eléctrica aparece bajo el concepto de potencia.

### **3.1.3.3 Factor de carga**

Es un valor constante que corresponde aplicarse a aquellos usuarios o consumidores a quienes no se les mide su consumo de potencia.

Este valor se puede obtener de estudios de caracterización de cargas de acuerdo a las características del consumidor que se describen en el artículo 89 del reglamento de la ley general de electricidad. Además la comisión nacional de energía eléctrica puede fijar estos valores en base a valores obtenidos por empresas distribuidoras que realicen programas de eficiencia energética.

Para nuestro caso de estudio en particular este valor aplicado es de 0.200.

### **3.1.3.4 Banda horaria**

Según el artículo 87 del reglamento del administrador del mercado mayorista, se definen tres bandas horarias, correspondientes a los períodos de máxima, media y mínima demanda definidos por:

**Tabla X. Bandas horarias según niveles de demanda. Referencia: Reglamento del administrador del mercado mayorista.**

Banda A: banda de punta o período de máxima demanda.	De 18:00 a 22:00 Horas.
Banda B: banda intermedia o período de demanda media.	De 06:00 a 18:00 Horas.
Banda C: banda de valle o período de banda mínima	De 22:00 a 06:00 Horas.

Para nuestro caso de estudio se presenta el comportamiento medio del consumo de energía en las diferentes bandas en dos meses de observación, aunque para efectos de facturación el precio por kilovatio hora para las tres bandas es el mismo.

**Tabla XI. Consumo de kilovatios hora en las diferentes bandas horarias.**

Kilovatios hora consumidos en las diferentes bandas horarias con muestra en cuatro meses					
	30/junio/05	31/julio/05	30/dic/05	31/enero/06	Participación
Banda A	6868.7	7051.45	7944.93	8132.85	29.48%
Banda B	12300.64	12628.97	14239.43	14592.05	52.83%
Banda C	4116.29	4224.82	4769.01	4887.84	17.69%
Totales	23285.63	23905.24	26953.37	27612.74	100.00%

Debido a que por la lógica de operación actual los compresores trabajan en horarios sin control, asumiremos que la participación de la instalación general en cada banda horaria será la misma participación para los casos de evaluación de participación para nuestra sala de producción de aire comprimido.

### **3.1.3.5 Factor de potencia**

Otro punto que es muy importante y tiene mucha influencia en el monto pagado mensualmente en una factura de consumo de energía eléctrica es el factor de potencia, que es la relación entre la potencia aparente total medida en KVA y la potencia real medida en KW, debemos recordar que dentro de los compromisos que el usuario adquiere al contratar un servicio de suministro de energía eléctrica, se compromete a tener en toda su instalación un factor de potencia igual o mayor a 0.90 para los usuarios cuya potencia contratada exceda los 11KW, según el artículo 49 de las normas técnicas del servicio de distribución, teniendo claro que el incumplimiento a este punto generará penalizaciones.

Para efecto del presente estudio de la observación de la información disponible para cuatro meses se puede estimar que la instalación trabaja a un valor promedio de factor de potencia de 0.8885.

Según el Artículo 51 de las normas técnicas del servicio de distribución todo lo relativo a la penalización por bajo valor de factor de potencia debe estar incluido en el contrato entre el distribuidor y el usuario, y además debe regirse por los pliegos tarifarios fijados por la comisión nacional de energía.

### 3.1.3.6 Otros cargos

A parte de los factores que hemos mencionado anteriormente, la comisión nacional de energía y el administrador del mercado mayorista han emitido algunas regulaciones que contemplan otros cargos que afectan al usuario final del servicio de energía eléctrica.

En la factura de energía eléctrica aparecen estos cargos bajo los siguientes conceptos:

**Tabla XII. Justificación de los otros cargos que encontramos en una factura de servicio de suministro de energía eléctrica.**

Resolución que ampara el cargo	Concepto que justifica el cargo	Porcentaje aproximado en una factura de servicio
CNEE 127-2005	Costo de transmisión en el sistema primario.  Valor nuevo de reemplazo para la infraestructura de distribución en el sistema primario.  Costos de peaje por las subestaciones de	0.27 %

	transformación y distribución.	
CNEE 128-2005	Costo anual de transmisión en redes secundario propiedad del INDE.	2.67 %
CNEE 77-2004	Ajuste por el valor agregado de distribución y cargos fijos por generación, transporte y distribución por usuario para consumidores que se sirven de la EEGSA o sus comercializadoras	25.31 %
NCC 5 del AMM	Según la norma de coordinación comercial del administrador del mercado mayorista, este cargo corresponde a los sobrecargos de generación forzada	5.10 %
NCC 8 del AMM	Cargos por servicios complementarios, que contempla las reservas de operación de los entes generadores destinados a satisfacer las variaciones en la frecuencia, energía, y potencia reactiva requeridos y suministrados en el sistema nacional de energía eléctrica	4.1 %
CNEE 180-2005	Es un cargo que se hace por los	7.5 %

	costos causados por la diferencia entre la potencia contratada y la potencia consumida establecida en el contrato de servicio entre consumidor y proveedor	
--	--	--

### 3.1.4 Costo actual de la energía eléctrica

Después de revisar los conceptos anteriores podemos darnos cuenta que para efectos del presente estudio vamos a tener que definir un valor aproximado lo suficientemente aceptable para definir el costo de la energía que utilizamos para mantener activa la operación actual de la sala de producción de aire comprimido.

Podemos tomar un valor por kilovatio hora individual respecto a los valores promedio totales de facturación de energía eléctrica, y este valor proyectado está afectado por todos los recargos anteriormente definidos y con los porcentajes de participación de cada cargo definidos en la tabla XII, podemos saber cuantitativamente cuanto afecta cada cargo a cada kilovatio hora consumido.

Para el valor de energía usaremos un valor de 0.12196 dólares estadounidenses por kilovatio hora (acumulado) valor que ya contempla todos los cargos anteriormente mencionados.

La información de datos de facturación utilizada para este cálculo no será publicada en este documento por ser considerada confidencial de la empresa donde se realizó el estudio de campo.

### 3.2 Gráficos de demanda y energía

De acuerdo a los conceptos de demanda y energía definidos anteriormente procederemos a construir las tablas y gráficas para reflejar el comportamiento de la demanda y la energía eléctrica utilizadas para la operación de la sala de compresores, tomando como base el estudio de horas de operación individual expuesto en la tabla II, y las mediciones realizadas y presentadas en la tabla IX.

**Tabla XIII. Horas de uso de cada compresor en una semana promedio**

Horas de uso de cada compresor en una semana promedio					
	Compresor 1	Compresor 2	Compresor 3	Compresor 4	Compresor 5
Lunes	24	24	24	24	24
Martes	6	24	24	24	4.8
Miércoles	0	24	24	24	0
Jueves	0	24	24	24	9.6
Viernes	24	24	24	24	9.6
Sábado	24	24	24	9.6	0
Domingo	4.8	16.66	3.6	0	0

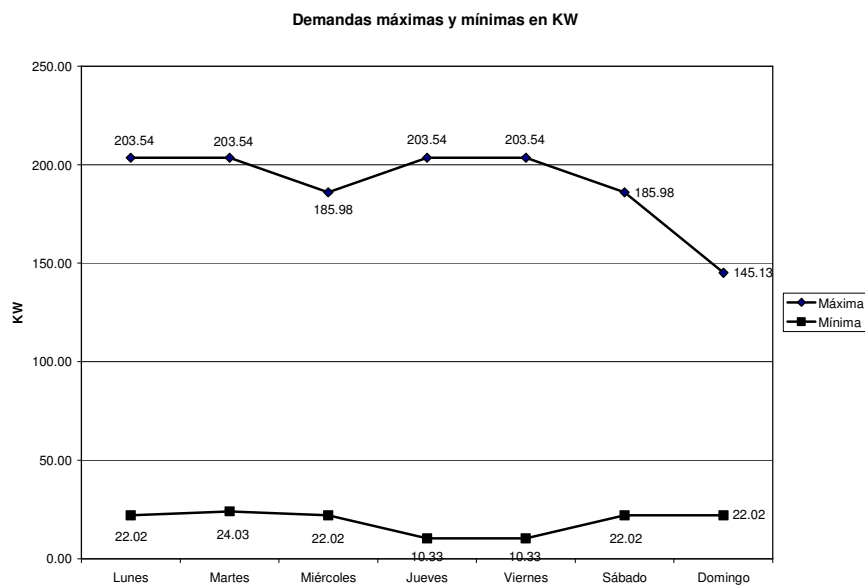


**Tabla XIV. Demandas máximas y mínimas en kilovatios en la sala de compresores.**

Demandas máximas y mínimas en KW		
	Máxima	Mínima
Lunes	203.541	22.02
Martes	203.541	24.03
Miércoles	185.98	22.02
Jueves	203.541	10.33
Viernes	203.541	10.33
Sábado	185.98	22.02
Domingo	145.129	22.02

Con la información que hemos recabado, se ha construido un gráfico que refleja el comportamiento de las demandas máximas y mínimas posibles que se presentan en la operación de la sala de compresores.

**Figura 13. Demanda máxima y mínimas en KW**



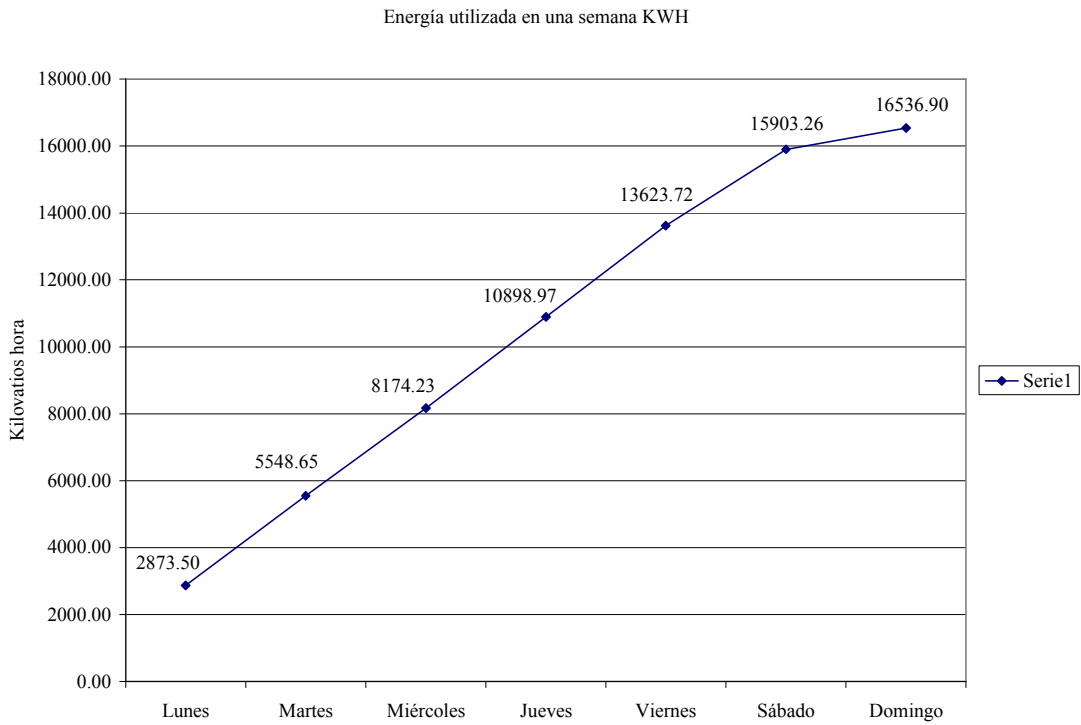
Para representar el comportamiento de la energía, analizaremos una semana promedio de operación de la sala de compresores y mostraremos la tendencia del comportamiento de la energía, información que nos servirá para calcular posteriormente el costo de operación actual del sistema de producción de aire comprimido.

**Tabla XV. Tendencia de la energía en una semana promedio**

Tendencia de la Energía KWH		
	KWH	ENERGÍA
Lunes	2873.50	2873.50
Martes	2675.16	5548.65
Miércoles	2625.58	8174.23
Jueves	2724.74	10898.97
Viernes	2724.74	13623.72
Sábado	2279.54	15903.26
Domingo	633.64	16536.90

La tendencia de la energía que es uno de los factores que determina el costo de la energía utilizada para la operación del sistema es:

**Figura 14. Gráfica de energía utilizada en KWH**



### **3.3 Cálculo del costo de operación actual del sistema de producción de aire comprimido**

Para el cálculo del costo de operación actual por concepto de pago de energía eléctrica usaremos el valor definido para el kilovatio hora de energía acumulada que ya está corregido para contemplar los gastos por potencia contratada, demanda y demás cargos antes descritos, el valor a utilizar será US\$ 0.12196.

Del valor de energía obtenido para una semana normal de 7 días de 16,536.90 kilovatios hora por semana podemos obtener que el valor de energía acumulada diaria es de 2362.41 kilovatios hora por día, por lo que podemos concluir que nuestro consumo de energía mensual será de 70872.42 kilovatios hora durante un mes de 30 días de servicio.

Aplicando el valor por kilovatio hora individual tenemos que la operación mensual de nuestro sistema de producción de aire comprimido es de US\$ 8643.60, lo que implica un gasto anual de US\$ 103,723.21.

## **4. DEMANDA DE AIRE COMPRIMIDO INSTALADA**

El aire comprimido utilizado en la planta de producción de galleta donde hemos realizado nuestro trabajo de campo, se utiliza para procesos de producción con aplicación de control neumático, para suministrar aire de atomización en los hornos de recirculación y para limpieza seca o soplada en muchos puntos de operación para evitar el uso de utensilios manuales de limpieza.

Las aplicaciones y usos más comunes para el aire comprimido es en cilindros neumáticos usados en los sistemas de alineación de bandas de transportadores y hornos, en sistemas de apertura y cierre de discos de sellos longitudinales y mordazas de sello transversal en máquinas empacadoras, electroválvulas de control, válvulas de diafragma para el transporte de harina, en boquillas de atomización en quemadores de hornos de recirculación, y en pistolas de limpieza.

### **4.1 Medición y tabulación de cargas de aire comprimido consideradas fijas**

En el cálculo de las cargas de aire comprimido vamos encontrar dos tipos de carga bien definidas, las cargas que se consideran fijas y las cargas consideradas súbitas.

Esta clasificación se hace de acuerdo a la estabilidad de la presencia de las cargas, esto quiere decir, si las cargas se repiten en períodos estables de tiempo.

Consideraremos para este estudio cargas fijas aquellas que al operar un proceso existe la operación de un equipo neumático cuando este proceso está activo, dentro de estas cargas colocaremos, la carga representada por la operación de los cilindros neumáticos que se usan en los sistemas de alineación de bandas en los transportadores de banda y en los alineadores de las bandas metálicas de los hornos de recirculación y fuego directo, consideraremos también como fijas las cargas que representan la operación de válvulas de apertura y cierre de paso de fluido en el sistema de transporte de harinas, consideraremos también dentro de estas cargas aquellas que representan los cilindros utilizados en sistemas de apertura y cierre en bandas, discos y mordazas de sello en máquinas empacadoras y las cargas de aire comprimido usados en atomización de diesel para los hornos de recirculación y los sistemas de atomización de agua para el cuarto de fermentación de galleta soda.

El método que usaremos para cuantificar las cargas de aire comprimido será elaborando un inventario de equipos neumáticos tomando como referencia el valor descrito según sus fabricantes para el consumo de aire comprimido, cuando esta información no esté disponible utilizaremos las tablas de consumo descritas en el manual del aire comprimido del instituto del aire y gases comprimidos

#### **4.2 Medición y tabulación de cargas de aire comprimido consideradas súbitas**

Dentro de las cargas consideradas súbitas encontraremos aquellas cargas que su recurrencia o repetición no es periódica, es decir que su aplicación no es repetitiva y queda a criterio de los operadores de producción y mantenimiento.

Entre este tipo de cargas la más común es la carga de aire comprimido utilizado en la limpieza de maquinaria y equipos.

Para cuantificar estas cargas se uso de referencia la tabla 13.34 del manual del aire y gases comprimidos del CAGI, en la cual se indica que para la descarga de aire comprimido en boquillas libres de ¼ de pulgada, el flujo de aire es de 104 pies cúbicos por minuto, por lo que en aplicaciones de limpieza de quince segundos con las boquillas actuales, tenemos una descarga de 25.95 pies cúbicos por aplicación de 15 segundos.

### **4.3 Gráficos del comportamiento de la demanda de aire comprimido en el tiempo**

La necesidad de tabular las cargas existentes y su comportamiento en los tiempos de operación se debe a que conociendo el comportamiento de nuestras cargas de aire comprimido podremos definir la operación más eficiente de nuestros compresores, se toman los principales procesos y puntos de uso de aire comprimido para realizar un inventario de cargas, las cuales se presentan en las siguientes tablas, en ellas se considera la carga debida a la operación de cilindros neumáticos con la carga expuesta en el manual y catálogo de Festo, fabricante de equipo neumático. Para los equipos como las válvulas de estrangulación del transporte de harina se recabó la información del fabricante de sistemas de transporte, Talleres DAM, de igual forma se estimó la carga de aire que representa la atomización de quemadores diesel de los hornos de recirculación y las boquillas de atomización del cuarto de fermentación.

**Tabla XVI. Cargas de aire comprimido en el área de preparación**

Todos los datos en pies cúbicos por minuto	Gasto por aplicación de limpieza de 15 segundos	Cantidad de elementos similares	Gasto unitario en pies cúbicos por minuto	Totales
<b>Preparación</b>				
Transporte de Harina				
válvulas de estrangulación		50		7.5

**Tabla XVII. Cargas de aire comprimido línea de producción No. 1**

Todos los datos en pies cúbicos por minuto	Gasto por aplicación de limpieza de 15 segundos	Cantidad de elementos similares	Gasto unitario en pies cúbicos por minuto	Totales
<b>Línea 1</b>				
Básculas		3	0.0216	0.0648
Mezcladora		3	0.0324	0.0972
Horno (alineadores)		6	3.24	19.44
Horno (quemadores)		3	1.62	4.86
Transportadores		6	0.2916	1.1664
Aplicadores		4	0.0216	0.0864
Empacadoras		12	0.0729	0.5832
Total Cargas Fijas				26.298
Limpieza	25.59			25.95
(Gasto por hora)				103.8
Total Cargas fijas + súbitas				52.248



**Tabla XVIII. Cargas de aire comprimido línea de producción No. 2**

Todos los datos en pies cúbicos por minuto	Gasto por aplicación de limpieza de 15 segundos	Cantidad de elementos similares	Gasto unitario en pies cúbicos por minuto	Totales
<b>Línea 2</b>				
Básculas		3	0.0216	0.0648
Laminado		26	0.8748	22.7448
Horno		6	3.24	3.888
Transportadores		6	1.62	1.1664
Empacadoras		12	0.0729	0.5832
Total de Cargas Fijas				28.4472
Limpieza	25.95			25.95
(Gasto por hora)				103.8
Total Cargas fijas + súbitas				54.3972

**Tabla XIX. Cargas de aire comprimido línea de producción No. 3**

Todos los datos en pies cúbicos por minuto	Gasto por aplicación de limpieza de 15 segundos	Cantidad de elementos similares	Gasto unitario en pies cúbicos por minuto	Totales
<b>Línea 3</b>				
Cuarto de fermentación		6		7.62
Básculas		3	0.0216	0.0648
Laminado		15	0.8748	13.122
Horno		4	3.24	2.592
Transportadores		6	1.62	1.1664
Empacadoras		12	0.0729	0.5832
Total de Cargas Fijas				25.1484
Limpieza	25.95			25.95
(Gasto por hora)				103.8
Total Cargas fijas + súbitas				51.0984

**Tabla XX. Cargas de aire comprimido línea de producción No. 4**

Todos los datos en pies cúbicos por minuto	Gasto por aplicación de limpieza de 15 segundos	Cantidad de elementos similares	Gasto unitario en pies cúbicos por minuto	Totales
<b>Línea 4</b>				
Básculas		6	0.0216	0.1296
Horno (alineadores)		6	3.24	3.888
Horno (quemadores)		4	1.62	6.48
Transportadores		6	0.2916	1.1664
Aplicadores		4	0.0216	0.0864
Empacadoras		16	0.0729	0.7776
Total de Cargas Fijas				12.3984
Limpieza	25.95			25.95
(Gasto por hora)				103.8
Total Cargas fijas + súbitas				38.3484

**Tabla XXI. Cargas de aire comprimido línea de producción No. 5**

Todos los datos en pies cúbicos por minuto	Gasto por aplicación de limpieza de 15 segundos	Cantidad de elementos similares	Gasto unitario en pies cúbicos por minuto	Totales
<b>Línea 5</b>				
Básculas		6	0.0216	0.1296
Horno (alineadores)		6	3.24	3.888
Horno (quemadores)		2	1.62	3.24
Transportadores		6	0.2916	1.1664
Aplicadores		4	0.0216	0.0864
Empacadoras		16	0.0729	0.7776
Total de Cargas Fijas				9.1584
Limpieza	25.95			25.95
(Gasto por hora)				103.8
Total Cargas fijas + súbitas				35.1084

**Tabla XXII. Cargas de aire comprimido líneas de producción No. 6 y 7**

Todos los datos en pies cúbicos por minuto	Gasto por aplicación de limpieza de 15 segundos	Cantidad de elementos similares	Gasto unitario en pies cúbicos por minuto	Totales
<b>Líneas 6 y 7</b>				
Preparación		2	0.0432	0.0864
Horno		6	3.24	3.888
Transportadores		8	0.0432	0.3456
Aplicadores		4	0.0216	0.0864
Empacadoras		12	0.0729	0.5832
Total de Cargas Fijas				4.9896
Limpieza	25.95			25.95
(Gasto por hora)				103.8
Total Cargas fijas + súbitas				30.9396

**Tabla XXIII. Cargas de aire comprimido línea de producción No. 8**

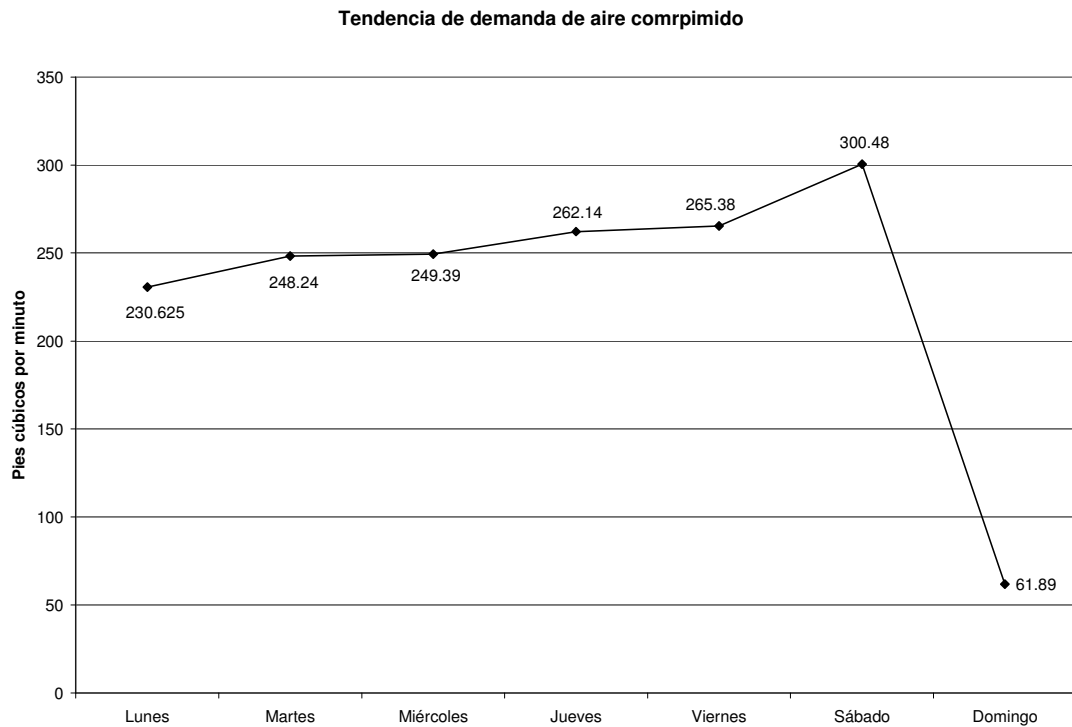
Todos los datos en pies cúbicos por minuto	Gasto por aplicación de limpieza de 15 segundos	Cantidad de elementos similares	Gasto unitario en pies cúbicos por minuto	Totales
<b>Línea 8</b>				
Horno (alineadores)		4	3.24	2.592
Horno (quemadores)		1	1.62	1.62
Transportadores		3	0.2916	0.5832
Empacadoras		3	0.0729	0.1458
Total de Cargas Fijas				4.941
Limpieza	25.95			25.95
(Gasto por hora)				103.8

Después de presentar las tablas que contienen las cargas de cada una de las diferentes áreas y puntos de consumo de aire comprimido se presentará el gráfico de comportamiento de la demanda de aire comprimido basada en estas tablas en una semana de operación normal.

**Tabla XXIV. Cargas de aire comprimido por líneas de producción y puntos de consumo**

Cargas de aire comprimido en pies cúbicos por minuto	
Preparación	7.5
Línea 1	52.24
Línea 2	54.39
Línea 3	51.09
Línea 4	38.34
Línea 5	35.1
Líneas 6 y7	30.93
Línea 8	30.89

**Figura 15. Gráfica de tendencia de demanda de aire comprimido**



Según la información que se presenta en la gráfica y en las tablas anteriores podemos concluir que nuestra demanda está debajo de la capacidad de producción de aire comprimido que tenemos instalada, teniendo un factor real de utilización de aire comprimido para procesos incluyendo cargas súbitas respecto a la capacidad de compresión de nuestros compresores en el día de máxima demanda de 51 %, este valor también refleja que gran parte del aire comprimido que producen los compresores se está perdiendo en las líneas de distribución por fugas en las uniones de tubería y accesorios.



## **5. LÓGICA DE CONTROL**

Cuando queremos diseñar un sistema de control automático para cualquier proceso, después de conocer como se comportan todos los factores que intervienen en el comportamiento y variación de dicho proceso, debemos definir que causas alteran la estabilidad de este, estas causas pueden ser de origen humano debido a la operación y medición, causas debidas al entorno o medio ambiente, en el caso de un sistema de producción de aire comprimido esto se ve afectado principalmente por la temperatura y la humedad relativa que haya en el ambiente y además los sistemas son afectados por los métodos de operación de los procesos asociados.

### **5.1 Transformación de cargas súbitas en cargas fijas**

La existencia de cargas súbitas en un sistema de distribución de aire comprimido, obliga a que dentro del comportamiento de las cargas existan picos de demanda de aire, dentro de estos sistemas las cargas súbitas que más afectan el sistema es el aire que se usa para la limpieza, ya que como se expresa en la ley de Boyle, cuando tenemos una descarga de aire comprimido en un punto determinado esta descarga de volumen de aire comprimido provoca una caída en la presión general del sistema, y son estos picos los que hacen que en algún determinado momento esta caída de presión afecte el correcto funcionamiento de otros procesos que están consumiendo en ese momento aire comprimido.

Es por eso que para mantener más estable el comportamiento de la demanda de aire comprimido debemos buscar algún método para transformar estos consumos súbitos en consumos estables.

### **5.1.1 Línea de limpieza**

Según la observación realizada en el estudio de campo, pudimos observar que la carga súbita más significativa es el alto nivel de uso de aire comprimido para limpieza, en la actualidad se usan boquillas de  $\frac{1}{4}$  de pulgada para soplar aire comprimido en varios puntos de limpieza seca a una presión nominal de 100 PSI, por lo que el primer paso que haremos será modificar la forma en que suministramos el aire que se tiene disponible para limpieza, con esto lograremos que nuestras cargas de aire usado para la limpieza que actualmente es una carga súbita, se comportará como una carga estable.

#### **5.1.1.1 Reducción de la presión**

Actualmente el suministro de aire destinado a la limpieza se distribuye en la misma línea de distribución principal, lo que además de provocar problemas por los picos de demanda, hace más vulnerable el sistema a los cambios de presión.



Además de esto debido a que la limpieza se hace con aire a 100 PSI de presión, en una boquilla de ¼ de pulgada de área libre para la descarga, en la aplicación de quince segundos de soplado se liberan 26 pies cúbicos de aire a razón de 1.73 pies cúbicos por segundo, realizando pruebas de limpieza a 50 PSI, se observa que la capacidad de remover suciedad es aceptable, y el consumo para la misma boquilla de soplado durante una aplicación de limpieza de quince segundos será de 14.65 pies cúbicos de aire a razón de 0.97 pies cúbicos por segundo.

Esto nos indica que con solo reducir la presión de la línea de limpieza a 50 PSI la demanda de aire será de 14.65 pies cúbicos de aire comprimido, lo que significa disminuir el gasto de volumen de aire comprimido para limpieza en un 46.15 %.

Si tomamos en cuenta que la carga promedio de aire comprimido es de 231.16 pies cúbicos por minuto podemos observar que solo al disminuir la presión en la línea de limpieza usaremos en promedio 35% menos aire del que empleamos actualmente.

Para lograr todo esto, colocaremos una tubería central que recorrerá toda la planta de producción principal para la distribución de aire comprimido destinado a la limpieza con reguladores de presión a 50 PSI al principio y al final de la línea. Se dejará fuera de este proyecto la línea para aire de limpieza en la planta de especialidades ya que según los métodos de limpieza realizan menos de 5 aplicaciones por día y nunca de manera simultánea.

### **5.1.1.2 Estaciones de limpieza**

Para que la utilización de una línea de limpieza sea bien aprovechada debemos implementar la colocación de estaciones o puntos donde los operadores puedan tomar las mangueras y pistolas destinadas a la limpieza y eliminar las tomas de aire de limpieza que actualmente se encuentran instaladas en la línea principal.

Se colocarán 9 estaciones con tomas para mangueras distribuidas en los pasillos compartidos por cada dos líneas de producción una en el área de preparación, mezclas, laminados y formados, otro grupo de estaciones para las áreas de aplicación de crema y otro para el área de empaque, las mangueras deberán de ser de 50 pies de largo para poder compartirse adecuadamente.

### **5.1.1.3 Pistolas economizadoras para limpieza**

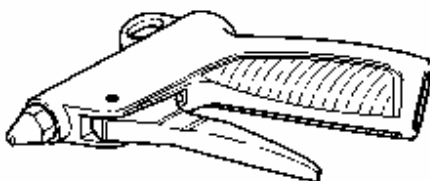
Además de la distribución a baja presión, también implementaremos el uso de pistolas economizadoras para la limpieza, estas pistolas tienen un accionador que regula la descarga de aire según el criterio o necesidad del operador, además cuando no se está presionando el accionador la descarga de aire es nula.

Estas pistolas de soplado con dosificación regulable, pueden operar en rangos de 0 a 145 PSI, con un consumo máximo de 4.23 pies cúbicos por minuto, producen un nivel de ruido de 90 decibeles, tienen un peso de 125 gramos lo que la hace bastante liviana, la conexión neumática es de rosca interior G1/4 y la figura se muestra abajo.

**Figura 16. Pistolas economizadoras para limpieza con aire comprimido**

**Fuente: Festo fabricante**

<http://catalog.festo.com/esp/asp/DefaultPSresult.asp?ID=184318&L=034>



El consumo de volumen de aire de estas pistolas es de 4.23 pies cúbicos por minuto, lo que quiere decir que para aplicaciones de limpieza de 15 segundos, necesitaremos la disponibilidad de 1.06 pies cúbicos de aire comprimido a 30 PSI. Por lo que el volumen de aire necesario para la operación de las 9 estaciones aplicando limpieza simultáneamente en aplicaciones de 15 segundos será de 9.51 pies cúbicos de aire.

### **5.1.2 Tanques pulmón**

El concepto de un tanque pulmón es tener disponibilidad de volumen de aire para absorber las caídas de presión que existirían al usar simultáneamente varias cargas de aplicación de limpieza, es por eso que al principio de la línea de suministro de aire de limpieza antes de los reguladores de baja presión, colocaremos un tanque que tendrá la capacidad de suministrar aire para las 9 estaciones de limpieza operando simultáneamente.

Como ya se definió anteriormente el volumen de aire comprimido necesario para absorber la caída de presión provocada por la operación simultánea de las nueve estaciones de limpieza será de 9.51 pies cúbicos por lo que las dimensiones del tanque serán: 2 pies de diámetro y 3 pies de alto para tener un volumen disponible de 10 pies cúbicos, debemos señalar que la alimentación del tanque se hará a alta presión ya que es en la línea de distribución principal donde queremos atenuar el efecto de la carga de la línea de limpieza.

## 5.2 Demanda estimada con cargas súbitas eliminadas

Luego de establecer las acciones a tomar para transformar el efecto de las cargas súbitas en cargas estables se procede a calcular la carga estimada con las cargas súbitas eliminadas tomando como referencia los datos tabulados en la tabla XXIV, pero en este cálculo en vez de usar el valor de la carga de limpieza en la línea de alta presión, se usará el dato usando el suministro a baja presión, con el tanque pulmón para absorber el efecto de la caída de presión y además contemplando el uso de las pistolas economizadoras.

**Tabla XXV. Cargas de aire comprimido con cargas súbitas eliminadas.**

Cargas de aire comprimido en pies cúbicos por minuto sin cargas súbitas	
Preparación	7.5
Línea 1	29.47
Línea 2	31.62
Línea 3	28.32
Línea 4	15.57
Línea 5	12.33
Líneas 6 y7	8.16
Línea 8	8.11

### 5.3 Definición de compresores base, seguidores y de punta

Se define según su capacidad y eficiencia los compresores como base, seguidor o punta. Esto enfocado a que los compresores trabajen en el orden de preferencia que se estableció de la capacidad y eficiencia calculadas en el capítulo 2.

Por principio un compresor base es aquel que goza de mayor criterio de preferencia de uso por que tiene más capacidad de suministrar volumen de aire a mayor eficiencia, estos compresores serán los que se mantendrán operando durante más tiempo.

Los compresores seguidores son aquellos que tienen un nivel de criterio de preferencia medio, son los que ayudarán a los compresores base a satisfacer la demanda de aire que los compresores primarios no puedan suministrar.

Los compresores de punta serán aquellos que se encenderán en los casos que alguno de los compresores base o seguidores se pongan en falla, o cuando ocurra un pico de demanda que provoque caídas de presión que hagan que algunos equipos o procesos se apaguen o funcionen incorrectamente.

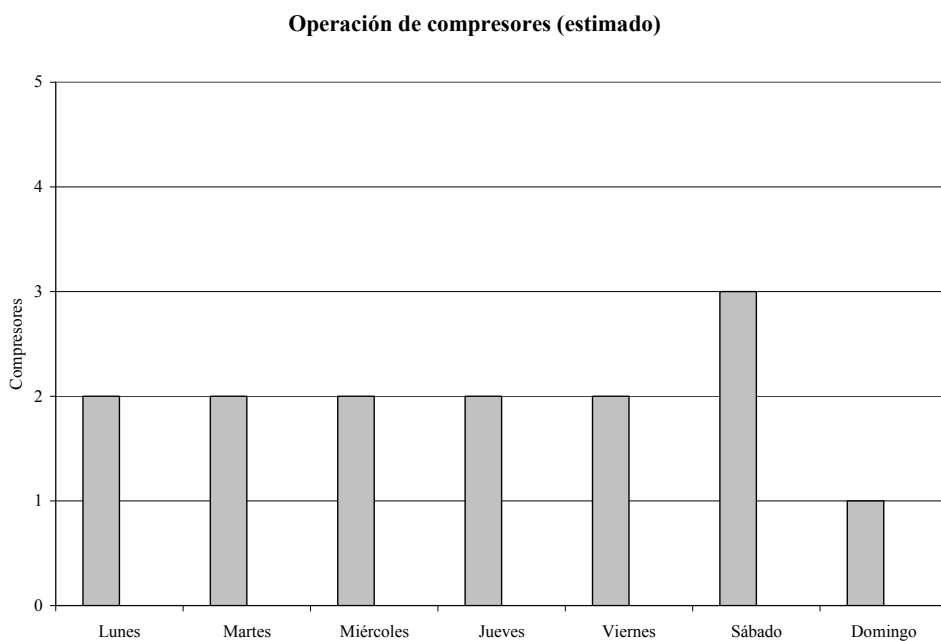
**Tabla XXVI. Definición de compresores bases, seguidores y punta**

Función de los compresores				
Compresor	Pies cúbicos por minuto	Eficiencia Mínima Garantizada	Nivel de preferencia de operación	Función
1	152	93.6	1	Base
3	152	91.7	2	Base
4	113	85.5	3	Seguidor
2	113	85.5	4	Seguidor
5	65	85.5	5	Punta

Según la capacidad y la eficiencia de cada uno de los compresores, se ha determinado según la tabla XXVI cuales son los compresores que se usarán como bases, seguidores y puntas.

De acuerdo a la demanda de aire instalada, los días lunes, martes, miércoles, jueves y viernes, la operación normal debería de realizarse únicamente operando los compresores base, únicamente el día sábado, o bien los días que todas las líneas de producción estén trabajando simultáneamente se operará con los dos compresores base y uno de los compresores seguidores encendidos siempre, los días domingos cuando únicamente esté trabajando una línea de producción operará un compresor base y si no hay ninguna línea trabajando se dejará encendido únicamente un compresor de los seguidores para mantener la línea presurizada.

**Figura 17. Operación de compresores (estimado)**



#### **5.4 Secuencia y rotación de funciones base, seguidor y punta**

La secuencia y la rotación de las funciones de los compresores como base seguidor y punta en los días de operación normal (de lunes a sábado) de los puntos de consumo no podrán ser cambiadas. En casos especiales que uno de los compresores base se encuentre en mantenimiento se podrá cambiar un compresor base (uno de los compresores número 1 o 2) con los compresores 3 o 4, pero no se podrá usar el compresor de punta como compresor base en los días de operación normal.

Los días domingo se podrá utilizar alternadamente el compresor número 2 o el número 3 como compresor base, se dejará descansar estos días a los dos compresores base nominales y el compresor de punta número 5.

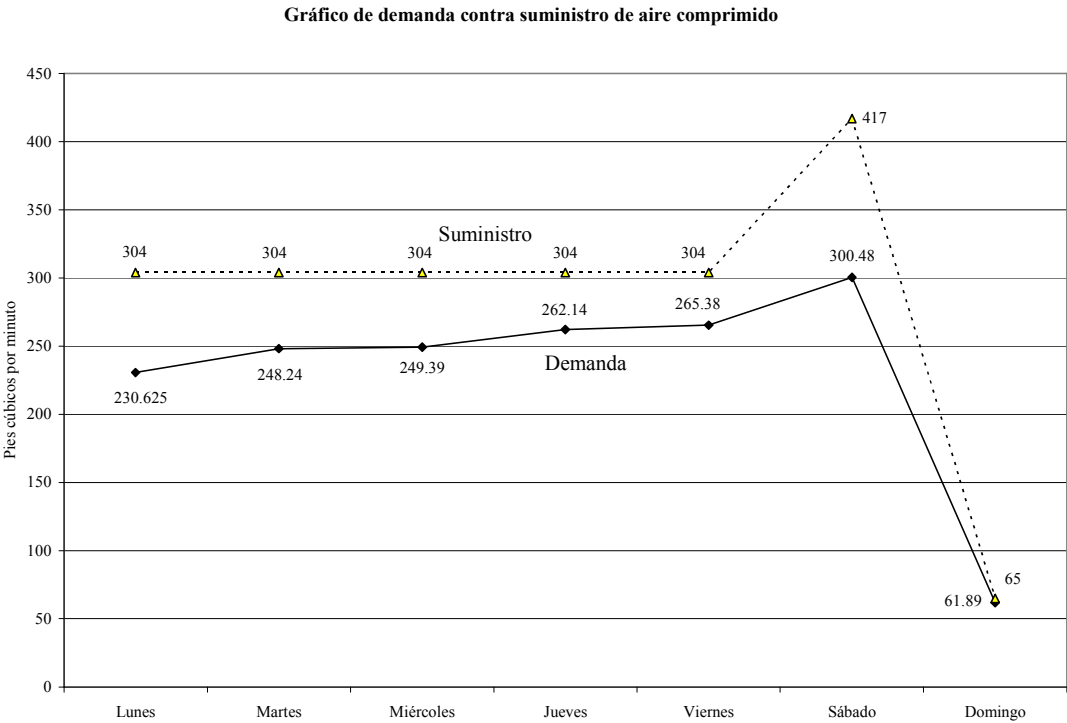
De preferencia se debe planificar los días de mantenimiento para los días domingo, cuando esto no sea posible se podrá realizar cualquier día de operación normal pero no se podrá realizar mantenimiento a dos compresores base simultáneamente.

#### **5.5 Gráficos de demanda contra suministro de aire comprimido**

La demanda de aire comprimido está íntimamente relacionada con la operación de la planta de producción por lo que se ha tomado el comportamiento de la demanda de aire comprimido respecto a las semanas típicas de operación en las cuales un día a la semana hay una línea de producción que no se trabaja para dejar 12 horas libres para limpieza y mantenimiento.

Hay que mencionar que es posible que algunas semanas esta operación puede ser diferente, pero para efectos de semanas de operación normal se construye el siguiente gráfico para reflejar la relación de demanda contra suministro según la operación actual y la operación propuesta.

**Figura 18. Demanda contra suministro de aire comprimido**





## 6. VARIABLES DE CONTROL

La razón de ser de un sistema de control automático, es mantener una variable de proceso en un valor o un estado deseado, este valor deseado es conocido también como *set point*.

Hay algunas actividades que son estrictamente necesarias para poder implementar un control automático, la primera de ellas es establecer el valor deseado de las variables que afectan o influyen el estado final del sistema o proceso que queremos controlar, luego medimos el valor de estas variables y las comparamos respecto al valor deseado y es allí donde se fundamenta un concepto muy importante en sistemas de control: el error.

Este valor de error, lo utilizamos como referencia para la toma de decisiones y acciones para proceder a reducir la diferencia entre el valor de la variable medido y el valor deseado.

En consecuencia la implementación de un sistema de control automático exige que exista un círculo o lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin la intervención de un operador humano.

Esto quiere decir que lo primero que debemos definir es cuales son las variables que realmente influyen en los cambios del estado deseado de nuestro sistema que deseamos controlar.

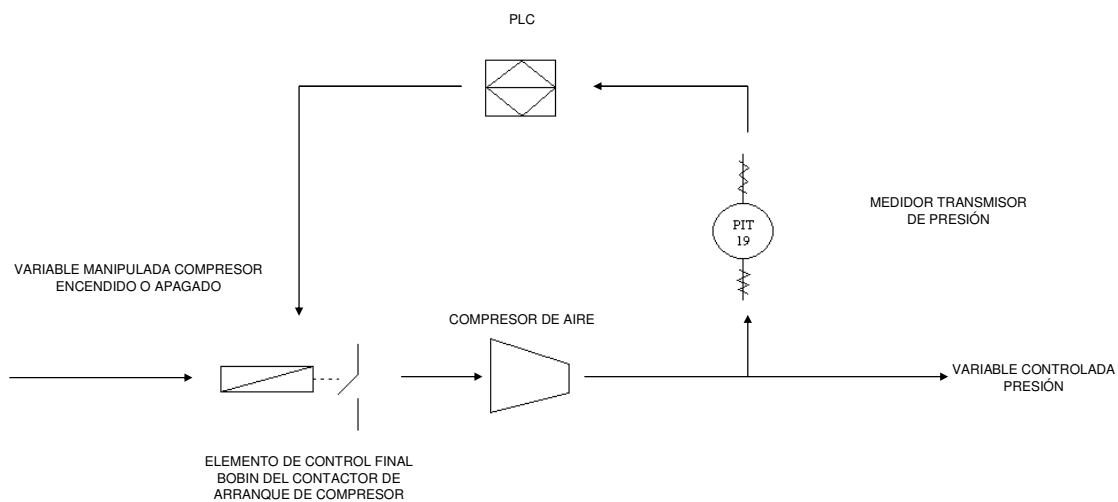
## 6.1 El lazo de control retroalimentado

En un lazo cerrado de control con realimentación simple podemos observar cuatro elementos que son básicos en cualquier sistema de control: medición, control, suministro y variable controlada.

**Figura 19. Lazo de control con retroalimentación (en modo encendido y apagado)**

**Fuente: Instrument Society of America, American National Standard**

### Intrumentation Symbols and Identification



Las variables que normalmente se miden en un sistema de aire comprimido son: la presión y el caudal o flujo volumétrico del aire comprimido.

### **6.1.1 Medición**

En esta etapa se toma la muestra del valor de la variable que estamos controlando, nos sirve para comparar este valor con el valor deseado de la variable, es necesario saber que variables vamos a medir, ya que cuando queremos controlar automáticamente un proceso, muchas veces caemos en el error de medir muchas variables que no influyen en el estado final del sistema, lo que hace que la implementación de los procesos se vuelva innecesariamente más cara.

### **6.1.2 Control**

En la parte del control, tenemos elementos que son capaces de realizar las siguientes tareas: interpretar la medición, compararla con el valor deseado de las variables medidas y tener establecidas las acciones a tomar dependiendo de la magnitud del error detectado, entendiéndose el error como la diferencia entre el valor medido y el valor deseado de la variable.

### **6.1.3 Suministro**

El suministro se refiere a las acciones que son tomadas para disminuir la magnitud del error, en la parte del suministro se incluyen los elementos que ejecutarán las órdenes emitidas por el controlador.

Para el caso de un sistema de producción de aire comprimido el suministro lo proveen los compresores de aire y son los que se encargarán de entregar la cantidad de aire comprimido que sea necesaria para satisfacer las cargas de aire comprimido instaladas en toda la planta.

#### **6.1.4 Variable controlada**

La variable controlada, es aquella que refleja la estabilidad del sistema que estamos controlando, esta variable será medida periódicamente para dar la realimentación al controlador para que este vuelva a comparar, y decidir las acciones a tomar para mantener el proceso controlado e iniciar así el lazo de realimentación.

#### **6.1.5 Variable manipulada**

La variable manipulada, es aquella sobre la cual estaremos actuando, es decir es la variable que nosotros cambiaremos de estado para tener como consecuencia un cambio en la variable controlada, para el caso de los sistemas de control de modo encendido y apagado, que es nuestro caso, la variable manipulada será el estado de los contactores de arranque de los compresores, esto quiere decir que lo que estaremos manipulando será el encendido y apagado de los compresores.

## **6.2 La presión como variable de control del proceso de aire comprimido**

Las dos variables que considerablemente influyen en la estabilidad de un sistema de producción, distribución y consumo de aire comprimido son la presión y el caudal o flujo volumétrico, esto debido a que todos los equipos neumáticos están diseñados para trabajar adecuadamente en rangos definidos para estas dos variables.

Para la medición de estas dos variables existen diferentes métodos y variados instrumentos, algunos más comunes que otros, la diferencia principal la definen los precios, debido a que en el mercado de instrumentos y dispositivos de medición se encuentran a precios mucho más bajos los medidores de presión que de caudal.

Haciendo una analogía con sistemas eléctricos, la presión se mide en paralelo al punto que deseamos medir al igual que el voltaje, y el caudal o flujo volumétrico se mide en serie al igual que la corriente eléctrica.

Al igual que el voltaje, en configuraciones en paralelo, la presión es constante en todas las ramificaciones, y el caudal o flujo volumétrico análogo a la corriente se distribuye por las ramificaciones proporcionalmente a la oposición que encuentra en cada rama.

### **6.3 Relación entre la presión y la demanda de aire**

En la operación actual del sistema de producción de aire comprimido la medición que usan los operadores como referencia para encender y apagar compresores ya que cuando el suministro de volumen de aire comprimido no es suficiente, por la ley de Boyle de gases ideales que expresa que la presión es inversamente proporcional, podemos ver que cuando el volumen ocupado por el aire comprimido aumenta, la presión disminuye por lo que se puede concluir que las dos variables están directamente relacionadas por la ley de Boyle y con esto podemos establecer como variable de control cualquiera de las dos variables, el caudal y la presión. Para el caso de este estudio en particular usaremos la presión como variable de control para el proceso de producción de aire comprimido.

La presión se relaciona con la demanda de aire de igual forma que con el caudal por medio de la ley de Boyle de los gases ideales, por ejemplo, el principio de uso de aire comprimido para realizar un trabajo viene del concepto que un gas al expandirse realiza un trabajo por la energía que libera en dicha expansión, si imaginamos una única tubería de aire comprimido a 100 PSI con una carga única cerrada por un extremo, cuando una porción de aire de la tubería alimenta la carga, la cantidad de aire contenido por la tubería disminuye por lo que el volumen que ocupa esa porción de aire comparado con el volumen que ocupaba antes de alimentar la carga es mayor, la presión dentro de la tubería también disminuye.

Es por eso que la relación de la presión con la demanda de aire está dada de igual forma que con el caudal, cuando la demanda de aire se incrementa la presión del sistema disminuye.

Por lo tanto podemos utilizar la presión como variable de control, ya que si mantenemos controlada la presión, el caudal o flujo volumétrico de aire disponible estará también controlado, la meta será mantener estable la presión ante incrementos en la demanda de aire comprimido en todo el sistema de distribución y consumo.

#### **6.4 Puntos de medición de la presión**

La medición de la presión se puede realizar en cualquier punto del sistema, ya sea en la etapa de compresión, en la distribución o bien en los puntos de consumo, entre más diverso sea el campo de medición más precisa y exacta será la operación de un sistema, pero debemos tomar en cuenta que para efectos de un sistema de control automático, el hecho de poner un punto de medición en el punto más lejano de distribución nos daría un nivel de referencia muy completo, pero, tendríamos que tomar en cuenta el precio de cableados e instalaciones adecuadas para traer esa señal desde el punto de medición deseado hasta el controlador, y esto implicaría costos muy elevados ya que el punto de consumo más lejano se encuentra a más de 175 metros lineales de la etapa de compresión, por lo que tomaremos de referencia la medición de la presión en la salida del distribuidor de aire (hacer referencia a la figura 7).

Esta estrategia de medición y realimentación al sistema de control de lazo cerrado, se conoce como estrategia *feedback* que consiste en tomar mediciones continuamente, convertir estas mediciones en señales y enviarlas al controlador del proceso para que se accione sobre la variable manipulada, lo que resulta en una variación del estado de la variable controlada.

## 6.5 Transductores piezoresistivos

Los transductores son elementos que se usan en la medición de variables basados en el concepto de transformar o convertir fuerzas de desplazamiento, transformar o interpretar cambios en las propiedades eléctricas de algunos elementos al ser sometidos al cambio en alguna variable como la temperatura, la humedad, la corriente eléctrica, etc.

Para la medición de la presión existen varios medios de medición, entre los cuales existen medios mecánicos como los elementos de resorte y diafragma conocidos como presostatos, existen también los transductores piezoeléctricos que debido a los materiales cristalinos que los forman, tales como el cuarzo o el titanato de bario, producen una fuerza electromotriz cuando se colocan bajo condiciones de presión o tensión mecánica.

Los fabricantes de dispositivos de medición en la actualidad buscan ofrecer medidores que sean precisos, que tengan la capacidad de transformar el valor de la variable que están midiendo en señales analógicas que puedan servir de entrada a los controladores empleados en sistemas de control.

Para la medición de la presión existen dos familias de instrumentos de medición según su capacidad de operación: instrumentos de señal discreta que dan señales de encendido y apagado para indicar cuando se ha llegado a un nivel determinado de presión, y los instrumentos de señal analógica, que son los que se utilizan cuando es necesario conocer el valor exacto de la presión que se está midiendo en un sistema.



Los sensores piezoresistivos, se usan en tuberías o depósitos cerrados, tanques o distribuidores de aire, gas o vapores. Tienen la capacidad de entregar mediciones muy precisas, son de tamaño compacto.

Su funcionamiento se basa en el principio de exposición directa, el elemento de medición es fabricado con una base de silicón en combinación con elementos de alta pureza de alambre de platino, cobre o níquel, que al combinarse definen un valor de resistencia para el elemento final, al combinar la flexibilidad mecánica del silicón al ser sometido a la presión hace que la tensión mecánica sobre los elementos de platino, níquel y cobre varíen su resistencia y así combinado con elementos electrónicos modula una señal de 4 a 20 miliamperios que es proporcional a la presión del aire a la que está sometido.

El modelo que usaremos en el presente diseño es el modelo SD1 de Festo, el cual cuenta con cinco márgenes de medición para aplicación de umbrales de presión para las señales discretas, se pueden realizar mediciones de presiones relativas o diferenciales así como también pueden hacerse mediciones de presión absoluta.

Cuenta también de señales de salida discreta PNP, la diferencia entre las señales PNP y NPN radica en que estos sensores tienen normalmente tres hilos para la conexión de la señal, de los cuales dos son conductores de alimentación un tercer conductor para la señal, los sensores PNP tienen un voltaje positivo en la señal y los NPN llevan una señal de cero voltios en el conductor de señal.

Además estos sensores tienen una pantalla donde despliegan el valor de presión medida, y cuentan con accesorios de conexión neumática G1/8.

## **6.5 Válvulas reguladoras de presión**

Para realizar la regulación de la presión en la línea de limpieza a 50 PSI, se utilizarán dos válvulas reguladoras Festo, modelo MS2, las cuales son capaces de manejar hasta 776.92 CFM de aire comprimido, con una amplia aplicación de filtración de hasta 0.01  $\mu\text{m}$ . ( $1 \times 10^{-6}$  metros).

La función de regulación de estas válvulas se basa en el cambio de sección libre para el paso de aire, el cual está limitado por una manecilla de rosca con el cual se controla la sección de paso, al cerrarse el espacio se deja pasar el aire a mayor velocidad, lo que incrementa la presión del aire, caso contrario si se abre la sección, la velocidad disminuye y por consiguiente también la presión, esta apertura y cierre está amortiguada por un resorte interno, el cual debe ser capaz de resistir la presión máxima de entrada que para nuestro caso no excederá de 150 PSI, y siempre deberá ser mayor a la presión de trabajo de la línea de limpieza 50 PSI.

## **7. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL**

El sistema de control automático debe cumplir con los cuatro elementos de un sistema de control de lazo cerrado, la medición se realizará con un medidor de presión piezoresistivo, la etapa de control se realizará por medio de un controlador lógico programable, la etapa de suministro será realizada por los compresores de aire, y la variable que mantendremos controlada será la presión.

El diseño que se presenta es una propuesta que puede ser una de muchas para solucionar los problemas de operación en un sistema de producción de aire comprimido, el presente diseño tiene como fin tener un sistema de operación independiente de la operación humana.

### **7.1 Fundamentos del sistema de control**

El funcionamiento del presente sistema de control se basa en la medición y monitoreo de la presión como variable de control, se establecerán rangos de variación para el valor de la presión medida en el tiempo para determinar los umbrales de presión de encendido y apagado de los compresores, estos principios de operación estarán concentrados en un controlador lógico programable que tenga la capacidad de procesar las señales de medición de la presión, que sea capaz de interpretarlas, compararlas y tomar acción sobre la operación del sistema en tiempos aceptables.

La operación de los compresores será en modo encendido y apagado, y uno de los objetivos será mantener encendidos únicamente los compresores que sean necesarios para satisfacer la demanda de aire presente en cada momento a lo largo de la operación normal de toda la planta de producción de galleta.

### **7.1.1 Controlador lógico programable**

Un controlador lógico programable es un dispositivo electrónico que recibe señales de entrada provenientes de la medición de diferentes variables en un proceso, y es capaz de interpretar estas señales y por medio de un procesador, puede transformar estas señales en información, almacenarla, realizar operaciones lógicas y matemáticas con esta, para luego actualizar señales de salida que son dependientes de la operación interna de toda la información contenida en un programa interno y tener así influencia en el estado final de el sistema que está controlando, por la traducción en inglés del termino controlador lógico programable, es muy común que estos controladores sean conocidos como PLC.

Su uso en la industria empezó en la década de los 60 como una alternativa para solucionar los problemas más complejos en el control de procesos industriales en donde la aplicación de la relevación utilizada en la época a base de relés y circuitos eléctricos se hacían incompetentes y engorrosos, además de no tener muchas veces la capacidad de responder ante cambios en períodos de tiempo muy cortos.

En la actualidad los controladores lógicos programables no solo se usan para controlar maquinaria, además se pueden configurar en redes industriales para controlar procesos integrados y plantas completas, además de tener la capacidad de realizar operaciones matemáticas y estadísticas que les permiten realizar estrategias de control con la gran cantidad de información que pueden procesar.

Los controladores actuales pueden comunicarse con otros controladores, con redes de computadoras ya existentes, y por medio de Internet pueden ser conectados a distancia para tener posibilidades de control distribuido.

#### **7.1.1.1 Descripción y requerimientos**

Todos los PLC sin importar el fabricante tienen algunos elementos básicos que no difieren de fabricante a fabricante, estos elementos básicos son:

- Fuente de alimentación de energía
- Unidad central de proceso de datos e información
- Módulo de entradas (que pueden ser entradas analógicas o entradas digitales)
- Módulo de salidas (que pueden ser salidas digitales o salidas analógicas)
- Terminales de programación
- Periféricos

#### **7.1.1.1.1 Fuente de alimentación**

La fuente de alimentación está destinada a suministrar la energía eléctrica del PLC, estas pueden, según la instalación general tener una entrada en rangos de 100 a 130, o de 200 a 240 en señal alterna, y entregan voltajes de salida comúnmente de 24 o 48 voltios en señal directa.

La capacidad en amperios para la fuente de alimentación dependerá de la complejidad del sistema que se desea controlar ya que los sistemas más complejos necesitan más módulos de entradas y salidas por lo que mientras mayor es el controlador necesitará una fuente más grande.

#### **7.1.1.1.2 Unidad central de proceso**

En la unidad central de procesos se encuentra un microprocesador electrónico que tiene la capacidad de realizar las operaciones entre datos que son dictadas por la ejecución de un programa, en esta unidad se realizan los procesos de conversión de señales tanto analógicas como digitales para poder ser procesadas por los programas, en esta unidad se almacenan los programas así como la información necesaria para su operación.

La complejidad del proceso determinará el tamaño y capacidad de la unidad central de proceso, ya que en sistemas de control un factor muy importante es el tiempo de reacción que tenga el procesador para ser eficaz en el control de las diferentes variables que estamos controlando.

La unidad central de proceso también es conocida como CPU por sus siglas en inglés.

#### **7.1.1.1.3 Módulo de entradas**

El módulo de entradas es la parte del PLC donde se concentran todas las señales de entrada, existen módulos de entradas digitales o discretas, los cuales únicamente diferencian entre dos estados, encendido y apagado, estas señales generalmente tienen valores de cero o un valor de voltaje positivo de señal directa. Las entradas analógicas son aquellas que tienen un rango de valores que son proporcionales al rango de algún valor de una variable que deseamos medir, comúnmente estas señales pueden ser de 0 a 10 milivoltios en señal directa o bien de 4 a 20 miliamperios en señal también directa, estos son los valores más comunes aunque también existen señales de diferentes rangos, pero estos rangos deben estar definidos para cada módulo.

Las entradas son comúnmente utilizadas para la realimentación del sistema de control, a ellas llegan las señales de medición de variables, así como las señales de estado activo o inactivo de diferentes elementos del proceso, tales como válvulas, interruptores, botones de paros de emergencias, botones de arranque y paro normales, etcétera.

#### **7.1.1.1.4 Módulo de salidas**

Del módulo de salidas es de donde salen las señales que han sido procesadas después de la ejecución del programa, estas señales contienen las instrucciones para actuar sobre el proceso, al igual que para los módulos de entradas, existen módulos de salidas digitales o discretas, así como módulos de salidas analógicas.

#### **7.1.1.1.5 Terminales de programación**

Las terminales de programación se usan para poder establecer comunicación entre un PLC y una computadora, ya que los lenguajes de programación se trabajan en computadoras independientes y posteriormente los programas son descargados o actualizados hacia el PLC a través de estos terminales.

Las terminales de programación muchas veces son utilizadas también como puertos de comunicación, ya que debido al crecimiento en la complejidad de los sistemas de control actuales, existe la necesidad de comunicar controladores que no están operando en el mismo proceso, y también existe la necesidad de incorporar estos sistemas de control a redes de computadoras industriales que ya están instaladas o como proyectos futuros de crecimiento en los niveles de control.



#### **7.1.1.1.6 Periféricos**

Se consideran como elementos periféricos, aquellos que no intervienen directamente en la operación del controlador, por ejemplo el chasis donde se insertan las fuentes, los módulos y la CPU, los elementos de montaje, además de los convertidores de señales y adaptadores que se usan para modificar señales que no son reconocidas por el controlador, los módulos encargados de codificar y decodificar la comunicación.

#### **7.1.1.2 Entradas y salidas**

Para el diseño de nuestro sistema de control automático para el proceso de producción de aire comprimido, utilizaremos varias señales de entrada y salida que nos servirán para mantener controlada la presión del aire comprimido en el sistema.

Las señales se clasificarán primero como entradas y salidas, y dentro de cada uno de los diferentes tipos se clasifican las señales digitales o discretas y las señales analógicas

##### **7.1.1.2.1 Señales de entrada**

Estas señales son las que nos servirán para tener la referencia de las mediciones así como las señales que le servirán al controlador para determinar el estado encendido o apagado de los cinco compresores y secadores.

#### **7.1.1.2.1.1 Señales de entrada digital o discreta**

Las señales digitales o discretas que utilizaremos para el módulo de entradas serán señales de 110 VAC, tendremos señales de los botones de arranque y paro de cada compresor y cada secador para el arranque y paro manual de cada compresor y cada secador, una señal de un selector de mando habilitado para permitir el modo de control automático para cada compresor, señales de botones de paro de emergencia uno ubicado en cada compresor y uno general que se ubica en el panel de control y una señal que nos dice cuales compresores y secadores están trabajando.

La lista de las señales de entrada digitales o discretas que usaremos es la siguiente

- 1 Botón de arranque compresor 1
- 2 Botón de arranque compresor 2
- 3 Botón de arranque compresor 3
- 4 Botón de arranque compresor 4
- 5 Botón de arranque compresor 5
- 6 Botón de arranque secador 1
- 7 Botón de arranque secador 2
- 8 Botón de paro del compresor 1
- 9 Botón de paro del compresor 2
- 10 Botón de paro del compresor 3
- 11 Botón de paro del compresor 4
- 12 Botón de paro del compresor 5
- 13 Botón de paro del secador 1

- 14 Botón de paro del secador 2
- 15 Mando habilitado compresor 1
- 16 Mando habilitado compresor 2
- 17 Mando habilitado compresor 3
- 18 Mando habilitado compresor 4
- 19 Mando habilitado compresor 5
- 20 Botón de paro de emergencia compresor 1
- 21 Botón de paro de emergencia compresor 2
- 22 Botón de paro de emergencia compresor 3
- 23 Botón de paro de emergencia compresor 4
- 24 Botón de paro de emergencia compresor 5
- 25 Botón de paro de emergencia panel de control
- 26 Funcionando compresor 1
- 27 Funcionando compresor 2
- 28 Funcionando compresor 3
- 29 Funcionando compresor 4
- 30 Funcionando compresor 5
- 31 Funcionando secador 1
- 32 Funcionando secador 2

#### **7.1.1.2.1.2 Señales de entrada analógica**

El módulo de entradas que usaremos será un módulo de entradas para señales de 4 a 20 miliamperios y la única señal de este tipo será la señal del sensor de presión y será la única en nuestra lista de señales de entrada analógica.

33 Señal del medidor de presión

#### **7.1.1.2.2 Señales de salida**

Las señales de salida serán las que utilicemos para encender o apagar los compresores y secadores, nos servirá para tener luces piloto de los compresores y secadores que estén encendidos y usaremos también una señal de salida para desplegar el valor de la presión que está leyendo el medidor de presión en el panel de control.

##### **7.1.1.2.2.1 Señales de salida digital o discreta**

Las señales de salida digital o discreta que utilizaremos saldrán de un módulo de salidas con señales de 110 VAC, y serán las señales que utilizaremos para dar la señal de encendido o arranque a cada uno de los compresores y secadores que se encuentren con el mando habilitado para control automático, además usaremos señales digitales o discretas para alimentar las luces piloto del panel de control para indicar cuales compresores y secadores se encuentran trabajando, la lista de señales de salida digital o discreta que utilizaremos se presenta a continuación

34 Señal de arranque compresor 1

35 Señal de arranque compresor 2

36 Señal de arranque compresor 3

37 Señal de arranque compresor 4

- 38 Señal de arranque compresor 5
- 39 Señal de arranque secador 1
- 40 Señal de arranque secador 2
- 41 Funcionando compresor 1
- 42 Funcionando compresor 2
- 43 Funcionando compresor 3
- 44 Funcionando compresor 4
- 45 Funcionando compresor 5
- 46 Funcionando secador 1
- 47 Funcionando secador 2
- 48 Señal de paro compresor 1
- 49 Señal de paro compresor 2
- 50 Señal de paro compresor 3
- 51 Señal de paro compresor 4
- 52 Señal de paro compresor 5
- 53 Señal de paro secador 1
- 54 Señal de paro secador 2

#### **7.1.1.2.2.2 Señales de salida analógica**

La única señal de salida analógica que utilizaremos será utilizada para alimentar un dispositivo para desplegar el valor de la presión medida por el sensor de presión que será colocado en el panel de control para que pueda leerse el valor de la presión sin tener que ir al distribuidor de aire comprimido donde está colocado el medidor.

El dispositivo para desplegar esta medida es un indicador marca Red Lion modelo LD, que tiene la capacidad de recibir una señal de 4 a 20 miliamperios y mostrar el valor de la presión medida, tiene 2.5 pulgadas de altura y tiene la capacidad de desplegar hasta 6 dígitos y hasta 5 cifras decimales, utiliza alimentación de 85 a 250 VAC, y además de ser un indicador numérico también puede cumplir funciones de contador y como indicador de un medidor de frecuencia.

Esta aplicación quedará a discreción del usuario implementarla, ya que el módulo de salidas analógicas tiene un costo mayor a mil dólares estadounidenses y sólo se usará para dar la señal al indicador de presión, y el sistema funciona de igual manera con el indicador o sin él, en el caso que desee utilizarse la señal se asignará a la variable número 55 Señal para el indicador numérico de presión.

**Figura 20. Indicador numérico Red Lion Modelo LD**

**Fuente:**

**<http://www.redlion.net/Products/DigitalandAnalog/Counters/CounterRate/LD.html>**



### **7.1.2 Criterio de selección del controlador lógico programable**

Debido a que los factores que influyen para la decisión de la selección de un controlador lógico programable son principalmente las características de la red de alimentación de energía eléctrica, la disponibilidad de las herramientas de programación y comunicación, la cantidad de señales de entrada y salida que vamos a utilizar.

La red de alimentación de energía eléctrica existente en la sala de compresores es una instalación a 208 VAC, la mayoría de las aplicaciones de control automático de procesos en la planta donde se está realizando el presente estudio es con controladores lógicos programables marca Allen Bradley modelos SLC 500, por lo que el personal de mantenimiento está familiarizado con ellos, además al tener determinadas las entradas y salidas a utilizar, podemos definir también el número y tipo de módulos de entradas y salidas que vamos a utilizar que serían dos módulos de entradas digitales para señales de 110 VAC, dos módulos de salidas digitales para señales de 110 VAC, y un módulo combinado de 8 entradas y 8 salidas analógicas para señales de 4 a 20 miliamperios, y una fuente de alimentación de entrada de 200 a 240 VAC y 9 vatios de capacidad, y el procesador sería un SLC 5/03 debido a que debido a que una de los factores principales para decidir la aplicación es con que medios de comunicación disponemos ya para evitar incurrir en gastos para cables de comunicación y programación.

### **7.1.3 Valores umbrales de entrada y salida de compresores**

Según observaciones de 30 minutos realizadas en el estudio de campo se pudo observar que el valor mínimo de presión leída en el punto de salida del distribuidor de aire colocado en la sala de compresores fue de 90 PSI sin provocar ningún disparo o problema en los puntos de consumo, por debajo de este valor algunos equipos, principalmente los hornos de recirculación se disparaban por la baja presión de aire comprimido para atomización de diesel, la presión máxima que se pudo leer en esas observaciones fue de 118 PSI, por lo que se puede establecer que en un período de 30 minutos la presión nominal es de 105 PSI, el valor mínimo aceptado será de 90 PSI y el valor máximo aceptado será de 120 PSI.

Durante el arranque inicial de la semana que sería el día lunes a las 6:00 horas, el sistema de control realizará una rutina de arranque inicial que encenderá los compresores uno tras otro, dejando un espacio de 15 minutos entre el arranque de uno y otro compresor, esto para reducir el impacto en la demanda máxima de potencia debido a los arranques y ambos secadores para elevar la presión del sistema, al correr esta rutina se harán mediciones de la presión hasta que la presión sea de 110 PSI, en este límite se abandonará la rutina de arranque inicial por lo que a este umbral le llamaremos umbral de arranque inicial.

Al salir de la rutina de arranque inicial se procederá a realizar mediciones de la presión con intervalos de 15 segundos para construir promedios de comparación que serán comparados con los umbrales de encendido y apagado de compresores.



Existirá un umbral instantáneo que será de 90 PSI, si en cualquier momento en las mediciones tomadas cada 15 segundos se detecta una presión menor a 95 PSI, se ordenará el arranque del último compresor que se haya apagado, ya que esta caída le indicará al controlador la presencia de una carga súbita en alguno de los puntos de consumo que afectó al sistema con una caída mayor o igual a 10 PSI en 15 segundos por lo que a este umbral le llamaremos umbral instantáneo mínimo.

Además el promedio de la presión medida en los intervalos de 15 segundos al finalizar un período de 15 minutos será comparado con el valor nominal de la presión que es 105 PSI, si al finalizar el periodo de 15 minutos el controlador determina que la presión medida es 5 PSI mayor que la presión nominal, ordenará apagar un compresor, a este le llamaremos umbral diferencial positivo.

De manera similar si la diferencia entre el valor de la presión nominal del sistema y el valor promedio de la presión durante un intervalo de 15 minutos es mayor a 10 PSI siendo menor el valor medido, se ordenará encender el último compresor que se haya apagado, a este le llamaremos umbral diferencial negativo.

#### **7.1.4 Diagrama de flujo**

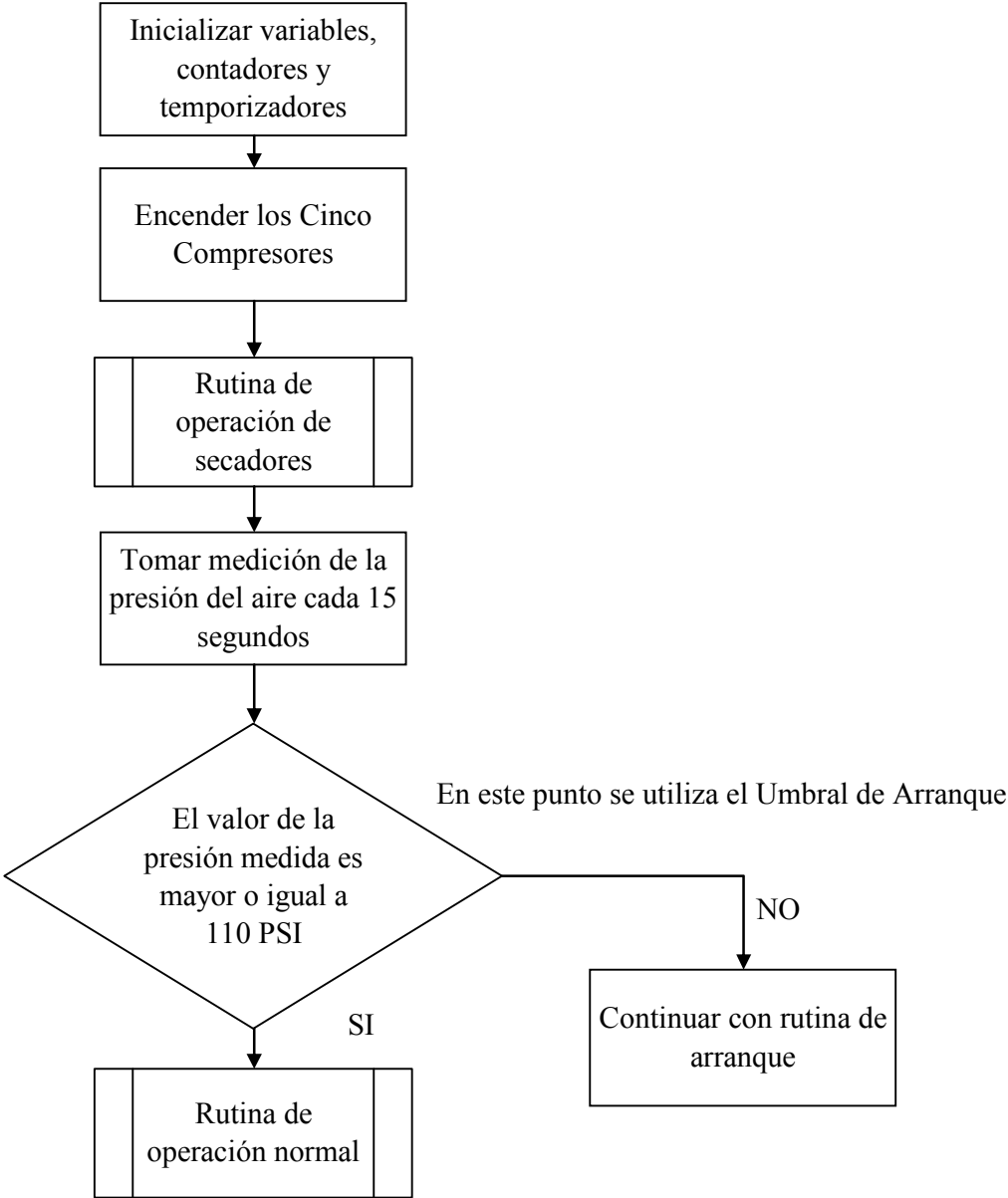
Para entender mejor como se complementan los umbrales de presión con la lógica de control se presenta el diagrama de flujo que usará el controlador para coordinar la operación de los compresores y secadores.

Están definidas dos rutinas de operación, la rutina de operación de arranque que durará desde que los compresores se arranquen hasta que la presión alcance el nivel nominal y una rutina de operación normal que será el modo de operación permanente del sistema.

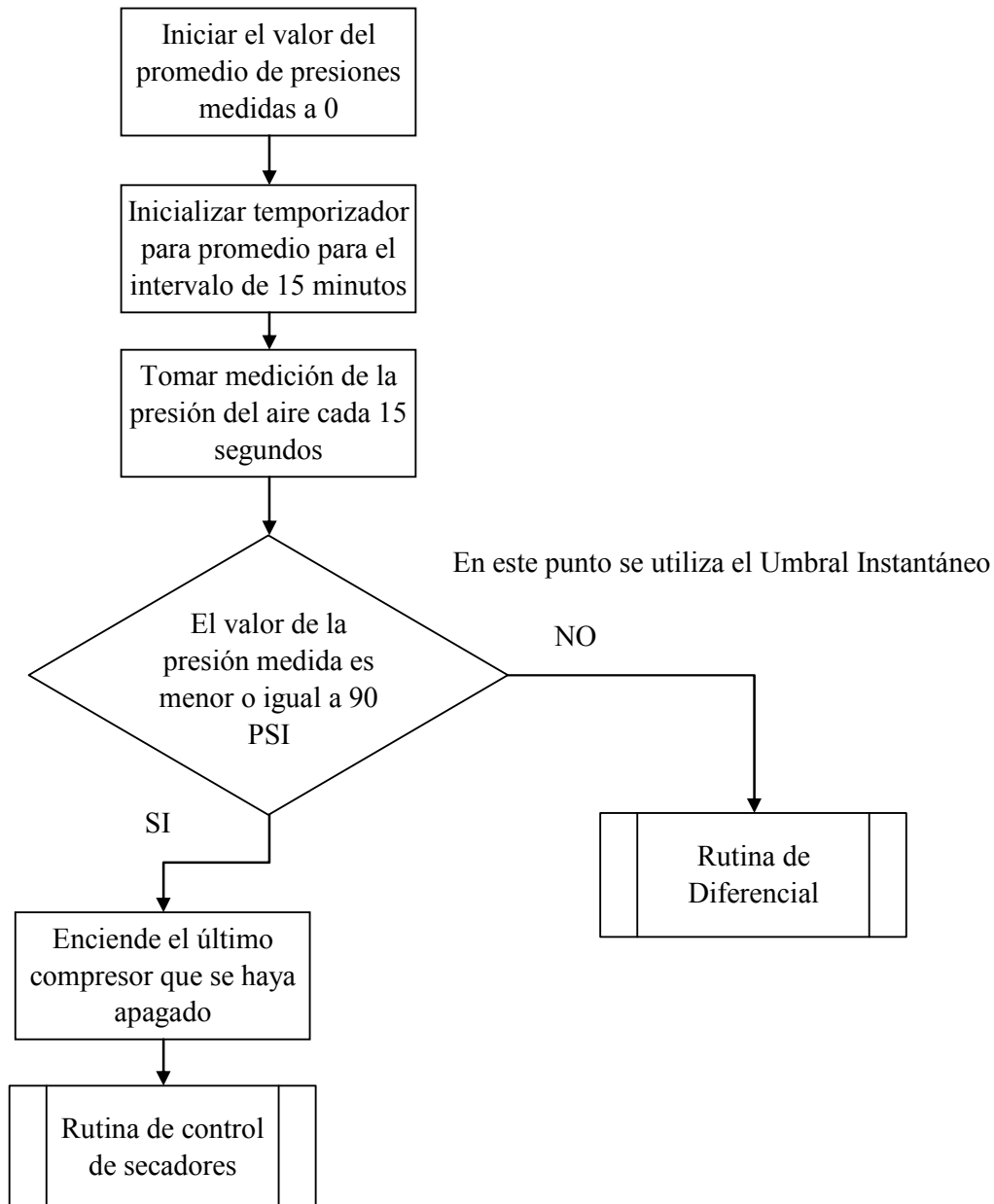
Se presentan los diagramas de flujo para las rutinas de operación que estarán definidas en el programa de control:

- Rutina de arranque inicial
- Rutina de operación normal
- Rutina de diferencial
- Rutina de apagado de compresores
- Rutina de encendido de compresores
- Rutina de operación de secadores

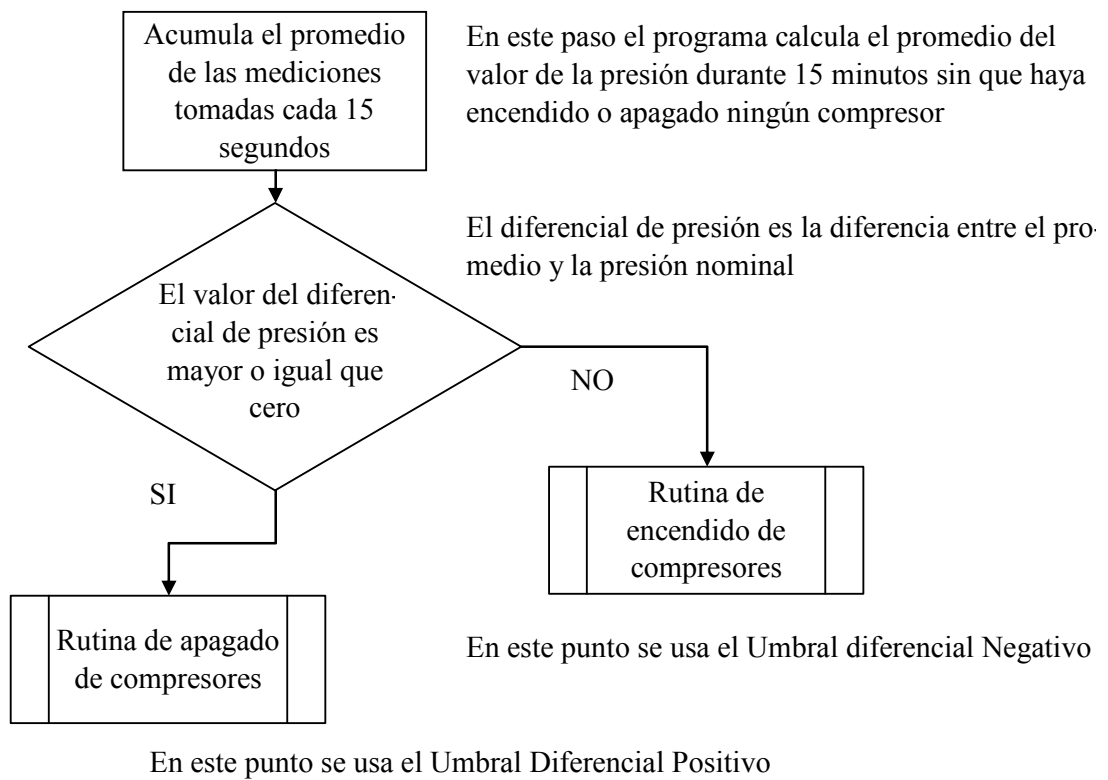
Figura 21. Rutina de Arranque Inicial



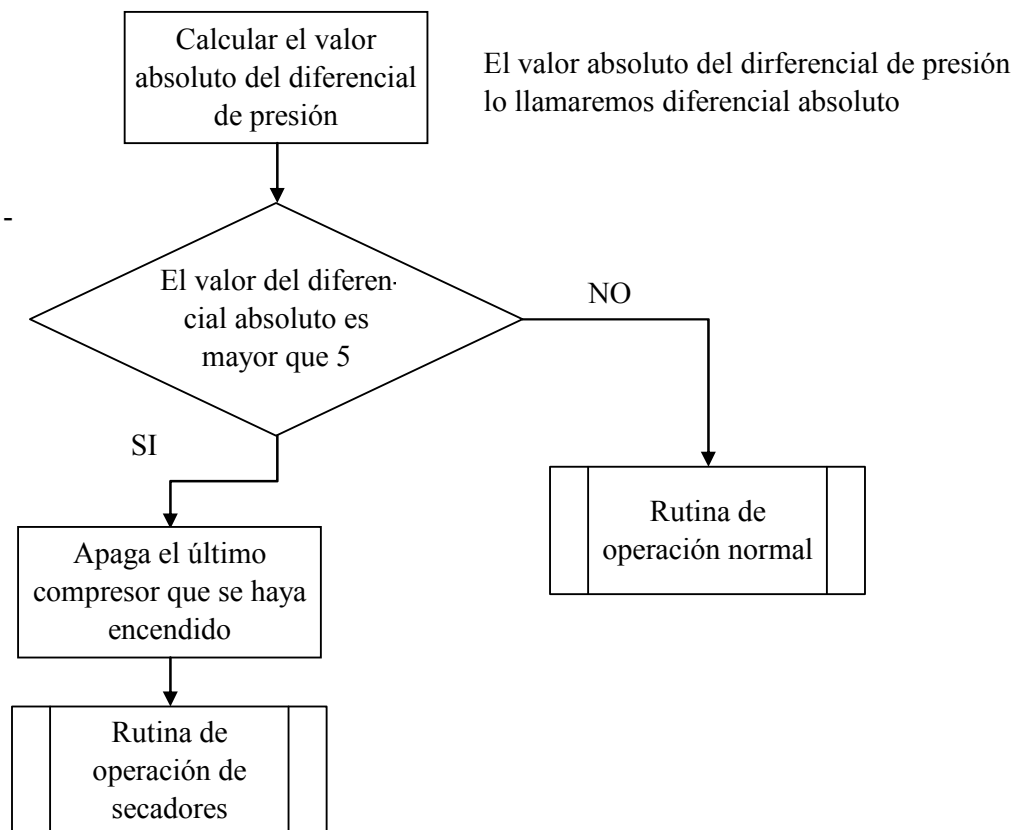
**Figura 22. Rutina de operación normal**



**Figura 23. Rutina de diferencial**



**Figura 24. Rutina de apagado de compresores**



**Figura 25. Rutina de encendido de compresores**

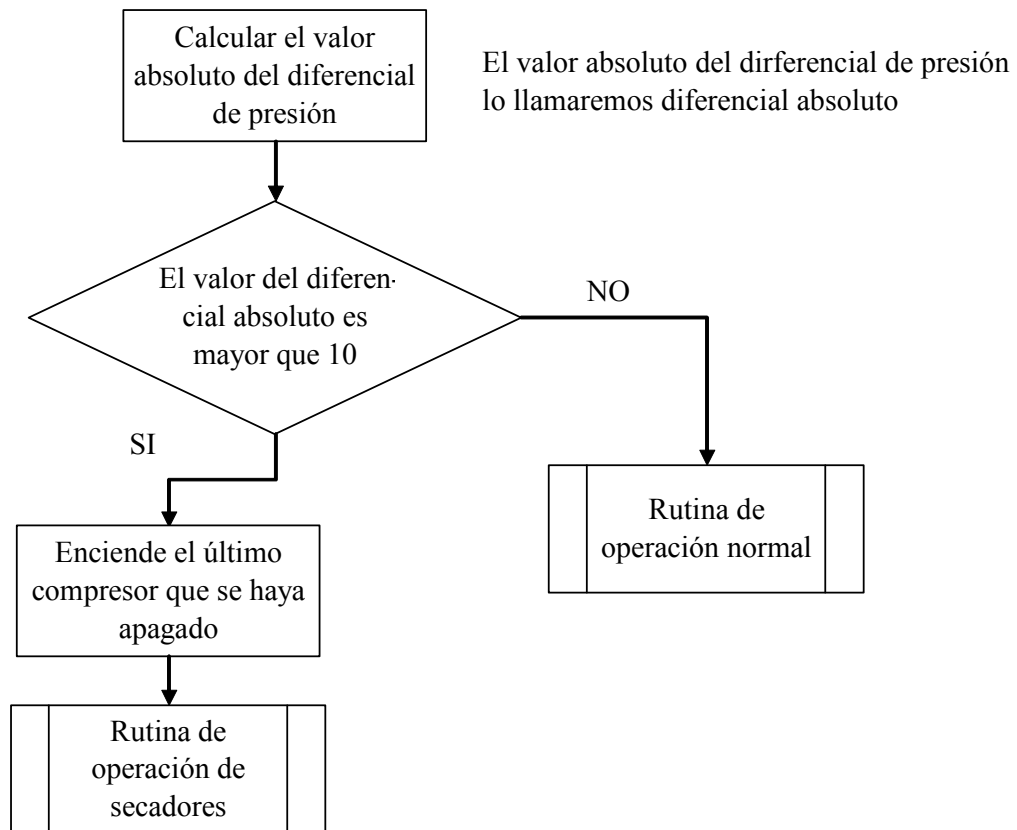
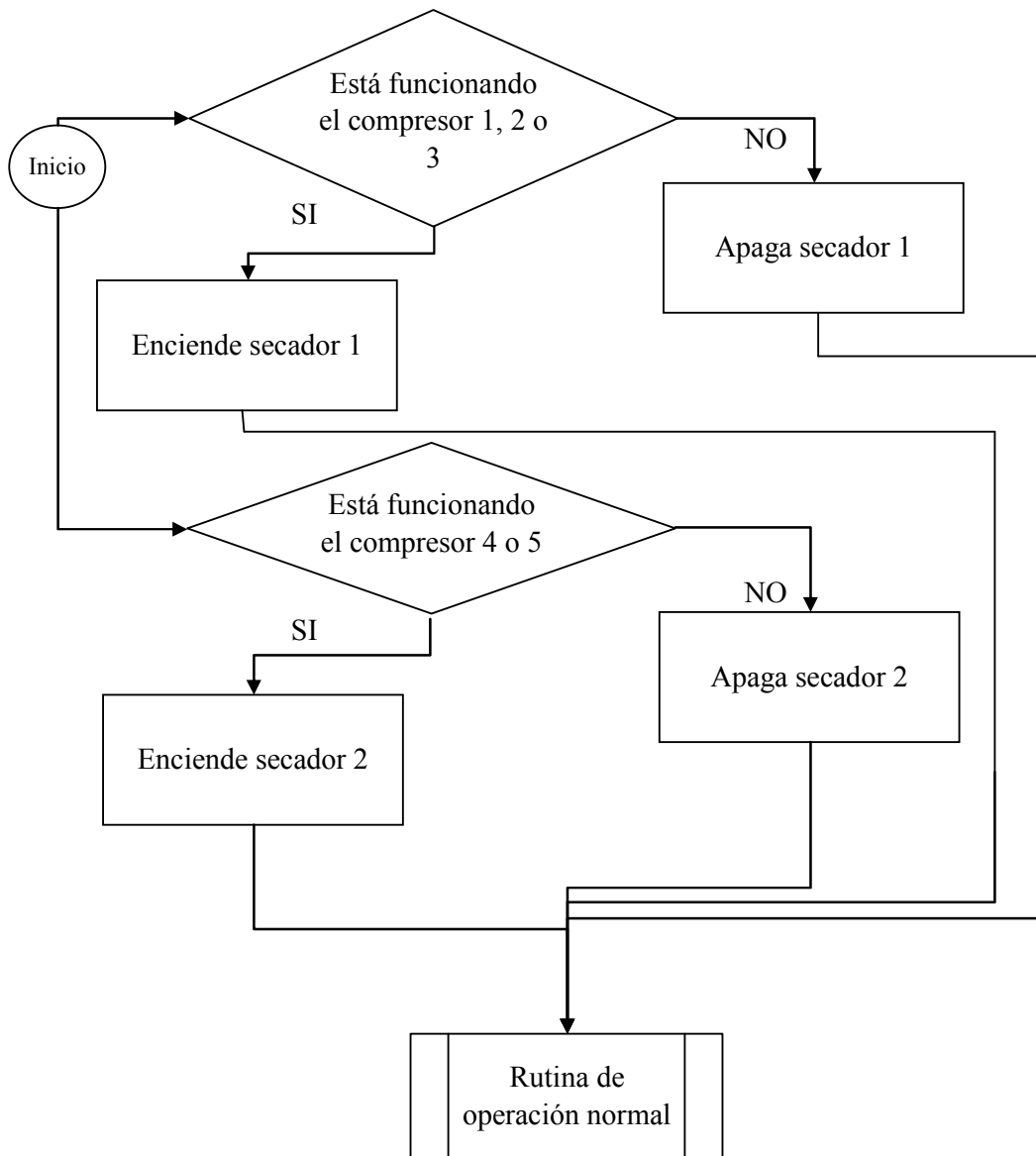


Figura 26. Rutina de operación de secadores





### **7.1.5 Reducción del impacto por arranques**

El presente diseño contempla dentro de su lógica de funcionamiento el encendido y apagado de compresores con intervalos de 15 minutos para la operación normal, haciendo excepción por los momentos en que se localicen cargas súbitas en los puntos de consumo de aire comprimido, no tendremos más de dos arranques por hora para los compresores seguidores y de punta.

Dentro de la lógica de control se estableció que los compresores base normalmente van a estar siempre encendidos por lo que no se harán arranques de estos compresores más que el día de arranque inicial.

El compresor número cinco que quedó asignado como compresor de punta únicamente actuara cuando se detecten caídas de presión de 10 PSI o más en períodos de quince segundos, por lo que su intervención en el sistema no será tan frecuente.

Los compresores seguidores, son los compresores que se espera que tengan más participación en arranques, por lo que se hará la recomendación de implementar algún método de reducción del impacto por arranques, que podría ser un dispositivo electrónico para arranques suaves, estos serían aplicables a los compresores número 3 y 4 que quedaron asignados como compresores seguidores, recordando que la operación encendido y apagado se espera que no se haga más de dos veces por hora.

## **7.2 Programación del Controlador Lógico Programable**

La programación de los controladores SLC 500 de Allen Bradley se programan con un lenguaje especialmente desarrollado por su fabricante llamado RS Logix 500, el tipo de lógica que usa este lenguaje es del tipo llamado escalera, debido a que todas las instrucciones se escriben línea por línea, y las instrucciones se leen y se ejecutan de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo en forma de escalera.

El programa exige que se definan las variables a utilizarse, se necesita que se identifiquen las señales de entrada y de salida que intervienen en el programa.

Este lenguaje tiene la ventaja que se pueden realizar rutinas, que son grupos de instrucciones asociadas para realizar una grupo de funciones específicas dentro del sistema de control.

Basados en el diagrama de flujo presentado en la sección 7.1.4 y en las 6 rutinas definidas para el sistema de control realizaremos ahora el programa de control para el sistema de control automático de nuestra sala de compresores.

### **7.2.1 Programa de control**

El programa de control para el controlador lógico programable se realizó utilizando el software RS Logix 500, se utilizaron las señales de entrada y salida, así como las rutinas de operación descritas en 7.1.1. el programa con todas sus instrucciones y secuencias se presentan como anexo a este trabajo.

## **7.3 Diagramas**

Un diagrama es una representación gráfica de una situación real, generalmente son usados para completar alguna instrucción verbal, o como guía para la instalación de equipos y accesorios. También hay diagramas especiales para instalaciones eléctricas y mecánicas, para fines de el presente trabajo presentaremos el diagrama de la conexión mecánica del sensor de presión que se colocará a la salida del distribuidor de aire, y presentaremos también el diagrama de conexiones eléctricas del controlador programable y el diagrama de control sobre los compresores.

### **7.3.1 Diagrama mecánico**

En este diagrama se especifica las dimensiones y el tipo de conexión que se usará para la instalación del sensor de presión en la tubería de salida del distribuidor de aire comprimido. Y estará contenido como anexo al presente trabajo, el número de referencia para este diagrama se encuentra en la tabla XXVII al final de este capítulo.

### **7.3.2 Diagramas eléctricos**

Los diagramas eléctricos que usaremos, se presentarán como anexos al presente trabajo, para realizar la instalación serán:

#### **7.3.2.1 Panel de control interno**

Este diagrama indica como quedará distribuido el panel eléctrico en su interior, únicamente se utilizará para contener el controlador lógico programable, así como los elementos del circuito de alimentación eléctrica, se presentan además los diagramas de conexiones de la fuente de alimentación y el diagrama de conexiones del procesador.

#### **7.3.2.2 Panel eléctrico exterior**

Este diagrama indica como quedará distribuido el panel de control externo, con los selectores de mandos habilitados para cada compresor, las luces piloto de encendido de cada compresor y secador, así como el botón de paro de emergencia.

### **7.3.2.3 Diagrama de conexión de sensor de presión**

Este diagrama indica como se realizará la conexión eléctrica del sensor de presión

### **7.3.3 Diagramas de control**

En esta sección se colocarán los diagramas de conexión de los módulos de entradas y salidas

La lista de todos los diagramas que se encuentran en la sección de anexos se presenta en la tabla XXVII.

**Tabla XXVII. Referencia para diagramas mecánico, eléctrico y de control.**

Número de Figura	Descripción del diagrama
29	Diagrama de conexión mecánica del sensor de presión
30	Panel eléctrico interior
31	Diagrama de conexión de la fuente de alimentación.
32	Panel eléctrico exterior
33	Diagrama de conexión del sensor de presión
34	Diagrama de conexión de módulo de entradas discretas 1
35	Diagrama de conexión de módulo de entradas discretas 2
36	Diagrama de conexión de módulo de salidas discretas 1
37	Diagrama de conexión de módulo de salidas discretas 2
38	Diagrama de conexión de módulo de entradas analógicas
39	Diagrama de conexión de módulo de salidas analógicas

## 8. INVERSIÓN PARA EL PROYECTO

Este capítulo presenta una estimación de la inversión que tendría que hacerse para implementar el presente diseño, los precios de los diferentes productos fueron consultados en línea directamente a los fabricantes de las marcas utilizadas, o contactando a los proveedores locales, los precios se presentan en dólares estadounidenses, y se espera que la vigencia de los precios no cambie en un período máximo de 90 días después de finalizar este informe.

### 8.1 Cálculo de materiales

En esta parte presentaremos una lista con los materiales y elementos que se tienen que adquirir para implementar el presente diseño, se contemplan precios en el mercado local de Guatemala, estos precios han sido consultados en línea y con los proveedores locales de los equipos y materiales.

Los equipos y materiales a usar son:

**Tabla XXVIII. Lista de materiales**

Equipo	Costo Estimado en US \$
1 Procesador para PLC SLC 500 5/03	1347.00
1 Chasis de 6 bloques para SLC 500	245.00
4 Módulos de entradas y salidas discretas	1812.00

a US\$ 453.00 cada uno	
1 Fuente de poder para el SLC 500	346.00
1 Módulo de entradas analógicas	1369.00
1 Módulo de salidas analógicas	1072.00
1 Interruptor de 2 polos 20 Amperios a 208 VAC	63.00
7 Luces piloto indicador color verde a US\$ 20.00 cada una.	140.00
5 Selectores sostenidos de 2 posiciones a US\$ 22.00 cada uno	110.00
1 Botón de paro de emergencia, tipo hongo, alimentación 208 VAC	23.00
1 Indicador numérico	272.00
75 metros de cable 14 AWG	38.00
Panel para montaje	265.00
Sensor de presión SDE 1 Festo, con accesorios de montaje	252.00
Total Materiales	7354.00

## 8.2 Cálculo de mano de obra

Para la implementación del presente proyecto se han dividido los trabajos de implementación en cuatro etapas:



- Instalación mecánica del sensor de presión
- Armar panel de control, con el cableado interno terminado.
- Cableado externo para el control de encendido y apagado de compresores y secadores
- Pruebas

Para la instalación mecánica del sensor de presión se necesita colocar los accesorios de montaje del sensor de presión en la tubería de salida del distribuidor de aire, este trabajo lo podrá realizar un mecánico del departamento de mantenimiento,

Para armar el panel donde se colocará el sistema de control se necesitará un electricista con un ayudante, el panel de la instalación actual de la sala de compresores continuará funcionando. En esta tarea se incluye toda la instalación del PLC incluyendo todo el cableado interno del panel.

Para realizar el cableado externo para el control de encendido y apagado de compresores se requerirá el trabajo de 3 electricistas, recordando que el tiempo que dure la realización de esta tarea no podrá estar funcionando el sistema.

Para la etapa de pruebas se requerirá la participación del jefe del departamento de mantenimiento para verificar el correcto funcionamiento del sistema, ya que en esta parte será necesario terminar de ajustar los umbrales del programa de control de los compresores.

El costo de la mano de obra se costea según la siguiente tabla con información de costos por hora hombre, cotizadas por empresas externas que pueden proveer el servicio subcontratado para la instalación:

**Tabla XXIX. Costos de mano de obra**

Tarea	US\$/ hora hombre	Horas Hombre Requeridas	Costo Total en US\$
Mecánico	10.00	4	40.00
Electricistas	15.00	128	1920.00
Programador	30.00	16	480.00
Total		148	2440.00

### **8.3 Tiempo de implementación**

Para determinar el tiempo e implementación del proyecto se presenta el diagrama de flujo de actividades, tomando en cuenta las restricciones por disponibilidad de aire comprimido en los puntos de consumo.

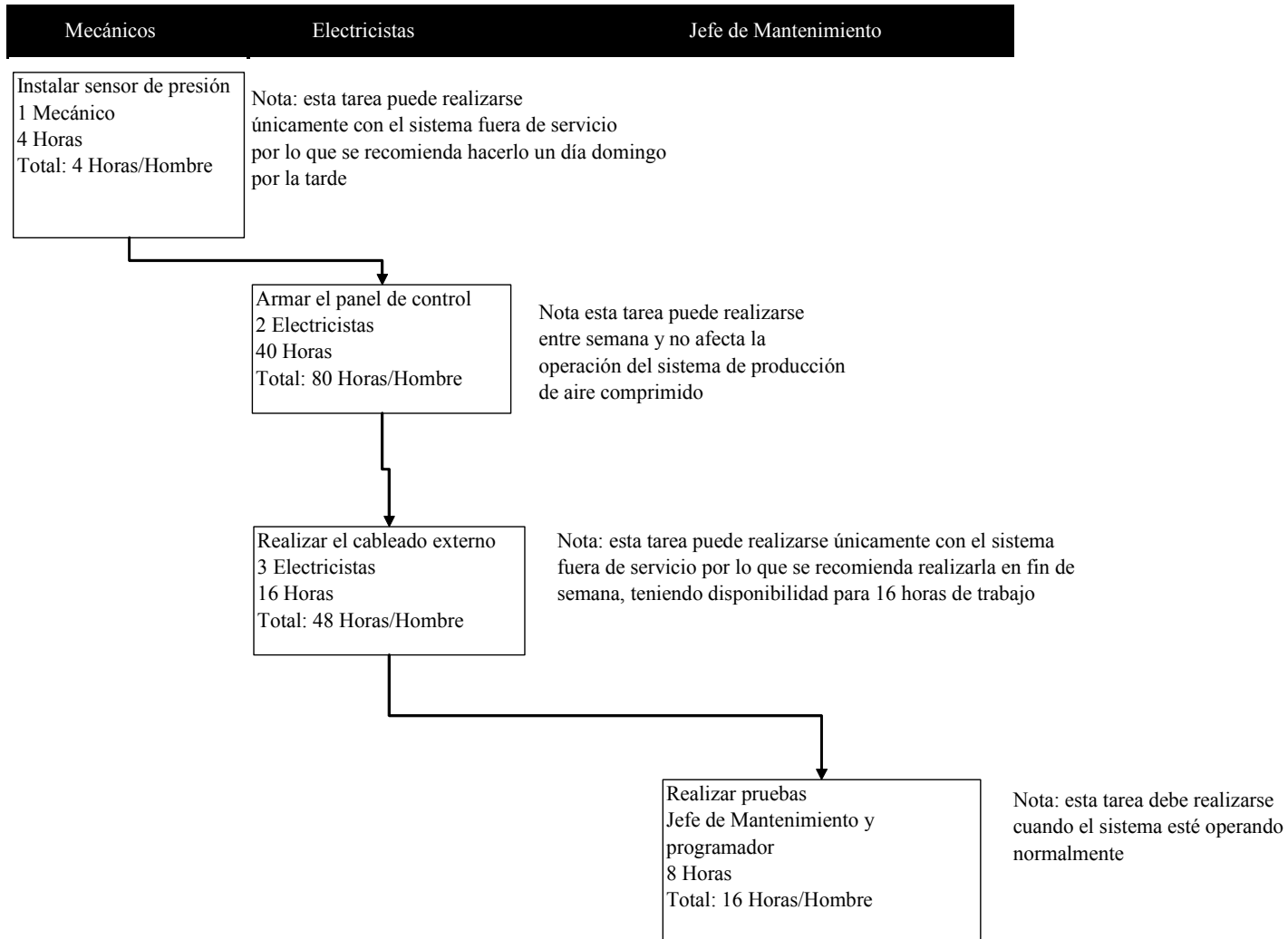
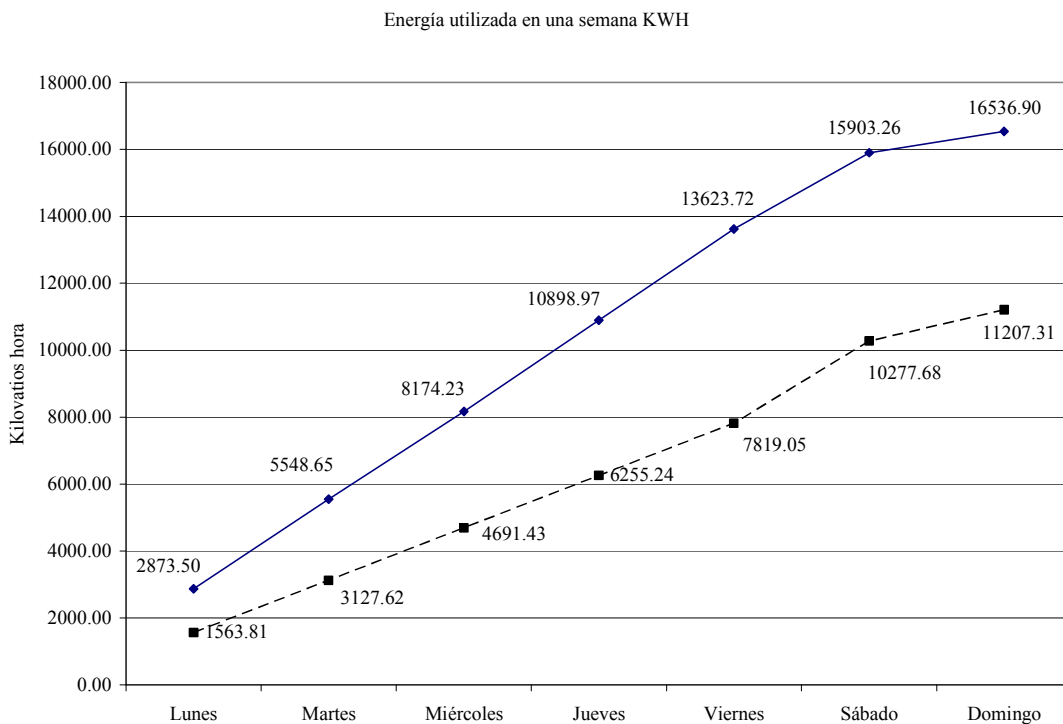


Figura 27. Diagrama de flujo para el tiempo de implementación del proyecto

## 8.4 Ahorro por energía eléctrica

Al implementar el presente diseño, se espera que de acuerdo al uso mejor aprovechado de los compresores, se tenga un consumo estimado según se presentó en la gráfica 17, gráfica en la cual se indica cuales son los compresores que se espera se mantengan encendidos en un período normal de operación, por lo que se llega a determinar el comportamiento de la tendencia de la energía en una semana sería la siguiente:

**Figura 28. Tendencia de la energía con el comportamiento esperado de los compresores.**



Se espera entonces que el costo de operación anual por concepto de energía eléctrica utilizada en la sala de compresores que actualmente es de 103,723.21 dólares estadounidenses, se reduzca a una tasa mensual de 2,785.70 dólares lo que al año representaría una disminución de 33,428.40 dólares que equivale a un 32.22% del costo actual.

Teniendo para este proyecto una tasa de retorno en tiempo, para esta inversión de

$$\text{Tasa de retorno} = \frac{\text{Costo de la implementación}}{\text{Ahorros obtenidos mensualmente}}$$

$$\text{Tasa de retorno} = (7,354.00 + 2,440.00) \text{ US\$} / (2,785.70) \text{ US\$}$$

$$\text{Tasa de retorno} = 3.52 \text{ meses}$$



## CONCLUSIONES

1. El aire para un amplio rango de temperaturas y presiones se comporta como un gas ideal, por lo que la relación presión y volumen es inversamente proporcional, de ahí que llamamos aire comprimido a un volumen de aire que se encuentra sometido a una presión mayor a la presión atmosférica, y que al expandirse liberará energía que puede ser aprovechada para realizar trabajo mecánico, por lo que las características que definen un sistema de aire comprimido son la presión y el caudal.
2. Cada compresor instalado tiene la capacidad de entregar a una presión nominal, un volumen de aire comprimido por unidad de tiempo, a esto le llamamos caudal, todo el aire comprimido que sale de los compresores debe tratarse con los secadores, ya que el aire comprimido que se pone en las tuberías de distribución debe estar libre de agua, para evitar daños por corrosión en las tuberías y equipos neumáticos, por lo que la suma de la capacidad individual de cada compresor equivale a la capacidad total del sistema de producción de aire comprimido.

3. Actualmente en el sistema de producción de aire comprimido no se utiliza ninguna herramienta de medición y control automático, los operadores de los departamentos de Producción y Mantenimiento se basan en lecturas de presión manométrica en la salida del distribuidor de aire para decidir cuántos compresores encender o apagar, aunque normalmente de lunes a sábado se encienden de cuatro a cinco compresores y el día domingo se trabaja con uno o dos compresores encendidos, la operación de los secadores también es manual y a criterio de los operadores.
  
4. El costo de la energía eléctrica que se paga por el funcionamiento de nuestro grupo de compresores, está definido por los tiempos de operación y por el número de compresores que mantenemos encendidos, además del valor que nos factura nuestro proveedor, el cual está afectado también por diferentes cargos contemplados por generación, transporte, distribución y comercialización de la energía.
  
5. Decimos que la demanda de aire comprimido aumenta cuando se incrementan las cargas en algún punto de consumo, cuando una carga consume una cantidad de aire comprimido, el volumen que ocupa una cantidad de aire dentro del sistema de distribución aumenta por lo que la presión disminuye. Es por esto que la presión puede establecerse como variable de control para un sistema de producción y distribución de aire comprimido, ya que cuando la demanda de aire comprimido aumenta la presión disminuye proporcionalmente y así controlando la presión podemos mantener controlado el caudal disponible para satisfacer la demanda.



6. Si transformamos el efecto que las cargas súbitas hacen sobre el sistema de distribución para que este sea más estable, medimos la presión en intervalos de tiempo constantes lograremos mantener encendidos únicamente los compresores y secadores que sean necesarios para satisfacer la demanda que en un momento determinado este presente en el sistema de aire comprimido.
  
7. Con un controlador lógico programable podemos definir la secuencia de instrucciones que deberá ejecutarse para mantener la demanda satisfecha, cumpliendo los pasos de un lazo de control realimentado, midiendo la presión con un sensor piezoresistivo, comparando la medición con los umbrales de entrada y salida para cada uno de los compresores, y midiendo nuevamente por períodos de tiempo constantes la presión en el sistema de distribución, eliminando así la necesidad de la intervención de los operadores de mantenimiento o producción.
  
8. La implementación de este proyecto requiere inversión económica principalmente para la compra del controlador lógico programable, que es el rubro que más incide dentro de los materiales y equipos necesarios para su implementación, la mano de obra puede ser proporcionada por el departamento de mantenimiento y es el tiempo de implementación necesario depende de la disponibilidad de la empresa para ceder dos fines de semana para los trabajos que requieran tener el sistema fuera de servicio, y cinco días de trabajo en taller.

9. Si logramos que la tendencia de la cantidad de aire comprimido que entregan los compresores siga el comportamiento de la demanda en un momento determinado, lograremos tener tiempos de operación más bajos y menos compresores trabajando simultáneamente, lo que incidirá en una reducción de la energía eléctrica que consumimos para nuestro sistema de producción de aire comprimido.

## RECOMENDACIONES

1. Es necesario evaluar la factibilidad de elevar la capacidad del secador número dos, ya que no tiene la capacidad suficiente para tratar el aire comprimido que producen sus compresores asociados cuatro y cinco, ya que si en algún momento existe la necesidad de encender los cinco compresores no habrá capacidad de tratar todo el aire que se está usando.
2. El valor total de cargas tabuladas en los puntos de consumo es menor al aire total que se está consumiendo actualmente por lo que se recomienda elaborar un programa para la detección y corrección de fugas de aire en tuberías, accesorios y equipos, ya que las fugas representan una carga muy significativa y que representa un alto costo de energía eléctrica para comprimir aire que no está siendo aprovechado en ningún trabajo.
3. Se sugiere hacer una evaluación de los métodos de limpieza para identificar puntos donde pueda implementarse métodos más económicos que el soplado con aire comprimido.
4. Es aconsejable hacer una evaluación en los puntos de consumo para identificar lugares donde pueda reducirse la presión de trabajo e identificar puntos de consumo innecesarios que sea posible eliminarse, además de elaborar un plan de sensibilización para el uso adecuado del aire comprimido.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Administrador del Mercado Mayorista. **Normas de coordinación comercial.** Guatemala, 2002.
2. American National Estándar. **Instrumentation Symbols and Identification.** Instrument Society of America, 1992.
3. Avallone, E.A, Baumiester Marks. **Manual del ingeniero mecánico.** 3a. ed. México: Mac-Graw Hill, 1995.
4. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. **Normas técnicas del servicio de distribución.** Guatemala: 1999.
5. Cooper, William David. **Instrumentación eléctrica y mediciones.** 1a. ed. Estados Unidos: Prentice Hall, 1982.
6. Chapman, Stephen. **Máquinas eléctricas.** 3a. ed. Colombia: Mac-Graw Hill, 2000.
7. Dorf, Richard y Svoboda. **Circuitos Eléctricos.** 5a. ed. México: Alfa y Omega, 2000.
8. Enríquez, Harper. **El control electrónico de las máquinas eléctricas.** México: Limusa, 2003.

9. Festo. **Catálogo de Productos.** Sensores de presión SDE 1, 2004.
10. Fink, Donald y Beaty Wayne. **Manual de ingeniería eléctrica.** 13a. ed. México: Mac-Graw Hill, 2001.
11. Gourishankar, Vembu. **Conversión de energía electromecánica.** 2a. ed. México: Alfa y Omega, 1992.
12. Instituto del aire y los gases comprimidos CAGI . **Manual del aire y los gases comprimidos.** 5a. ed. Estados Unidos: Prentice Hall, 1989.
13. Mott, Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada.** 4a. ed. México: Prentice Hall, 1994.
14. Red Lion. **Catálogo de Productos.** Estados Unidos, 2005.
15. Rockwell Automation. **Mantenimiento y solución de fallas en autómatas SLC 500.** Estados Unidos, 1998.
16. Rockwell Automation. **Technical training, SLC 500 systems.** Estados Unidos, 1998.
17. Rockwell Automation.. **Control the future today with Allen Bradley's SLC 500 Processors.** Estados Unidos, 1997.
18. Sullair. **Seminario de soluciones para el ahorro de energía.** Estados Unidos, 2004.

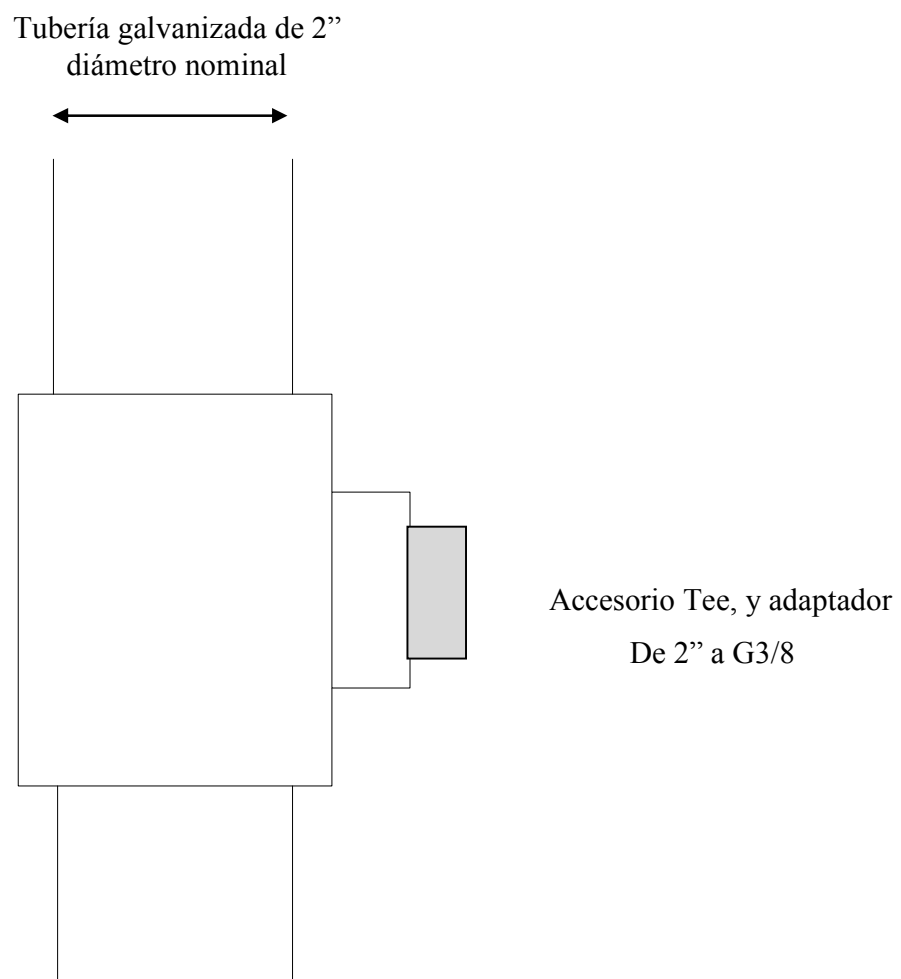
19. Wark, Kenneth. **Termodinámica**. 5a. ed. México: Mac-Graw Hill, 1999.



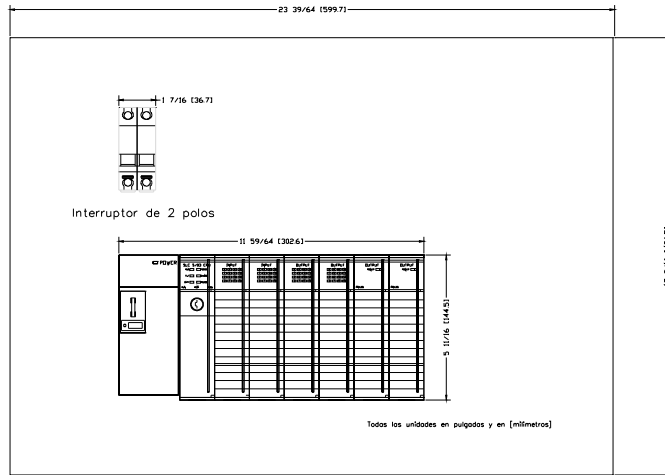


## ANEXOS

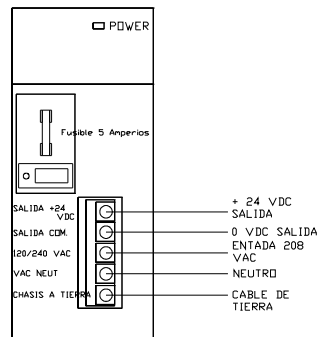
**Figura 29. Diagrama de conexión mecánica del sensor de presión**



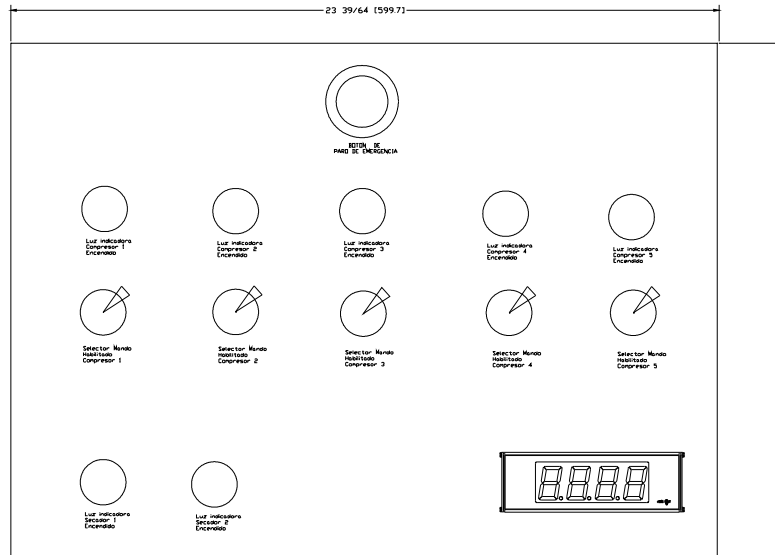
**Figura 30. Panel eléctrico interior**



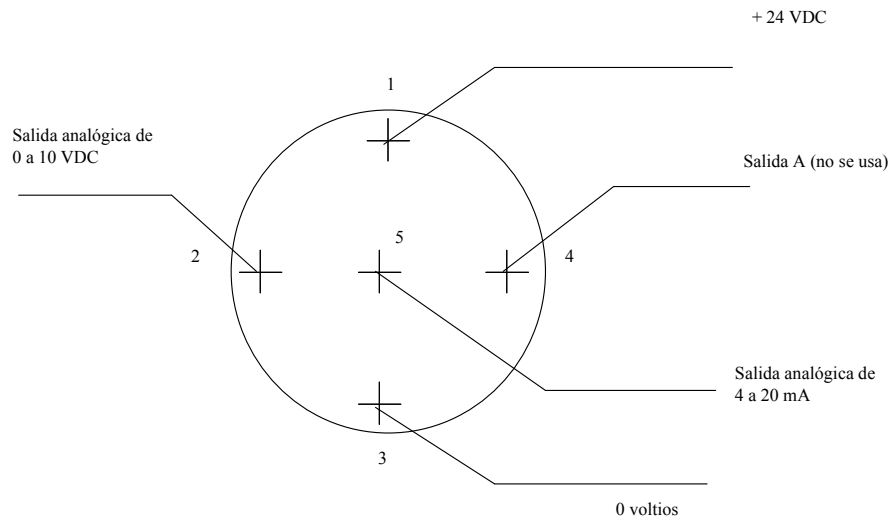
**Figura 31. Diagrama de conexión de la fuente de alimentación**



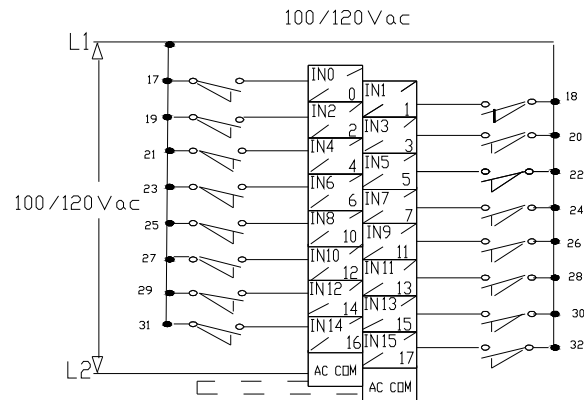
**Figura 32. Diagrama de panel eléctrico exterior**



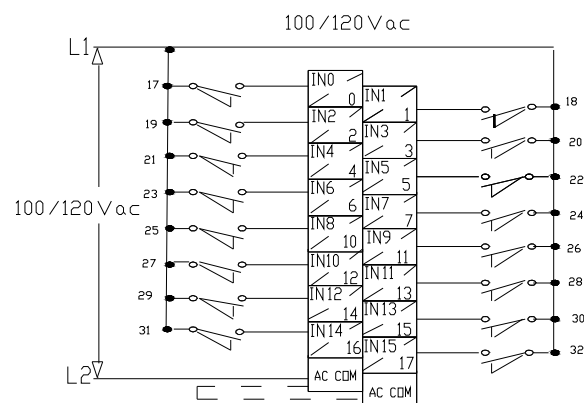
**Figura 33. Diagrama de conexión del sensor de presión**



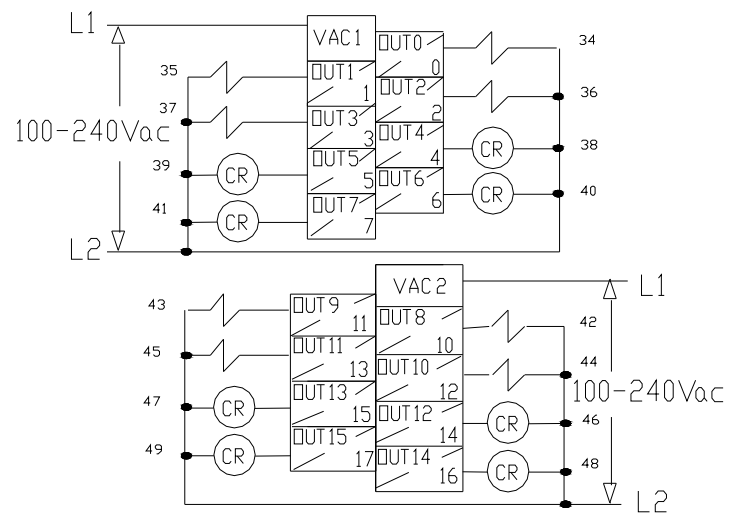
**Figura 34. Diagrama de conexión del módulo de entradas discretas 1**  
 La numeración del 1 al 16 corresponde a las variables definidas en 7.1.1.2



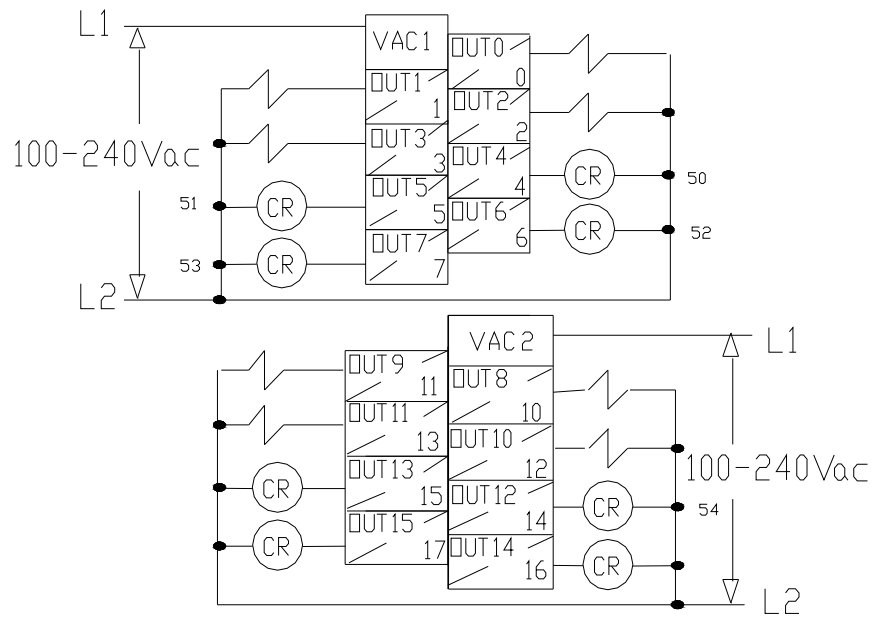
**Figura 35. Diagrama de conexión del módulo de entradas discretas 2**  
 La numeración del 17 al 32 corresponde a las variables definidas en 7.1.1.2



**Figura 36. Diagrama de conexión del módulo de salidas discretas 1**  
**La numeración del 34 al 49 corresponde a las variables definidas en 7.1.1.2**

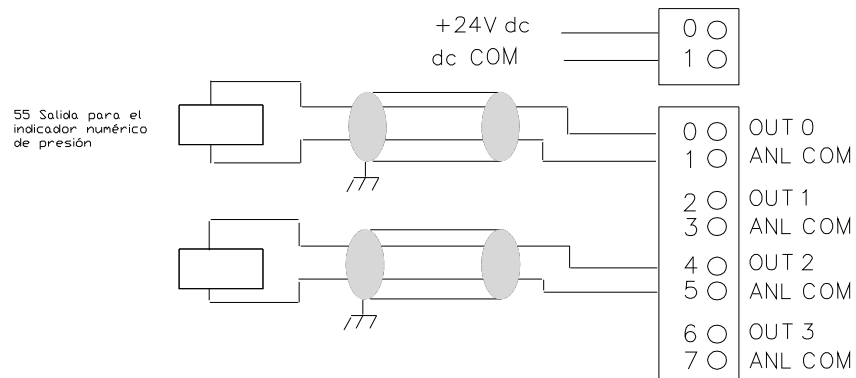


**Figura 37. Diagrama de conexión del módulo de salidas discretas 2**  
**La numeración del 50 al 54 corresponde a las variables definidas en 7.1.1.2**





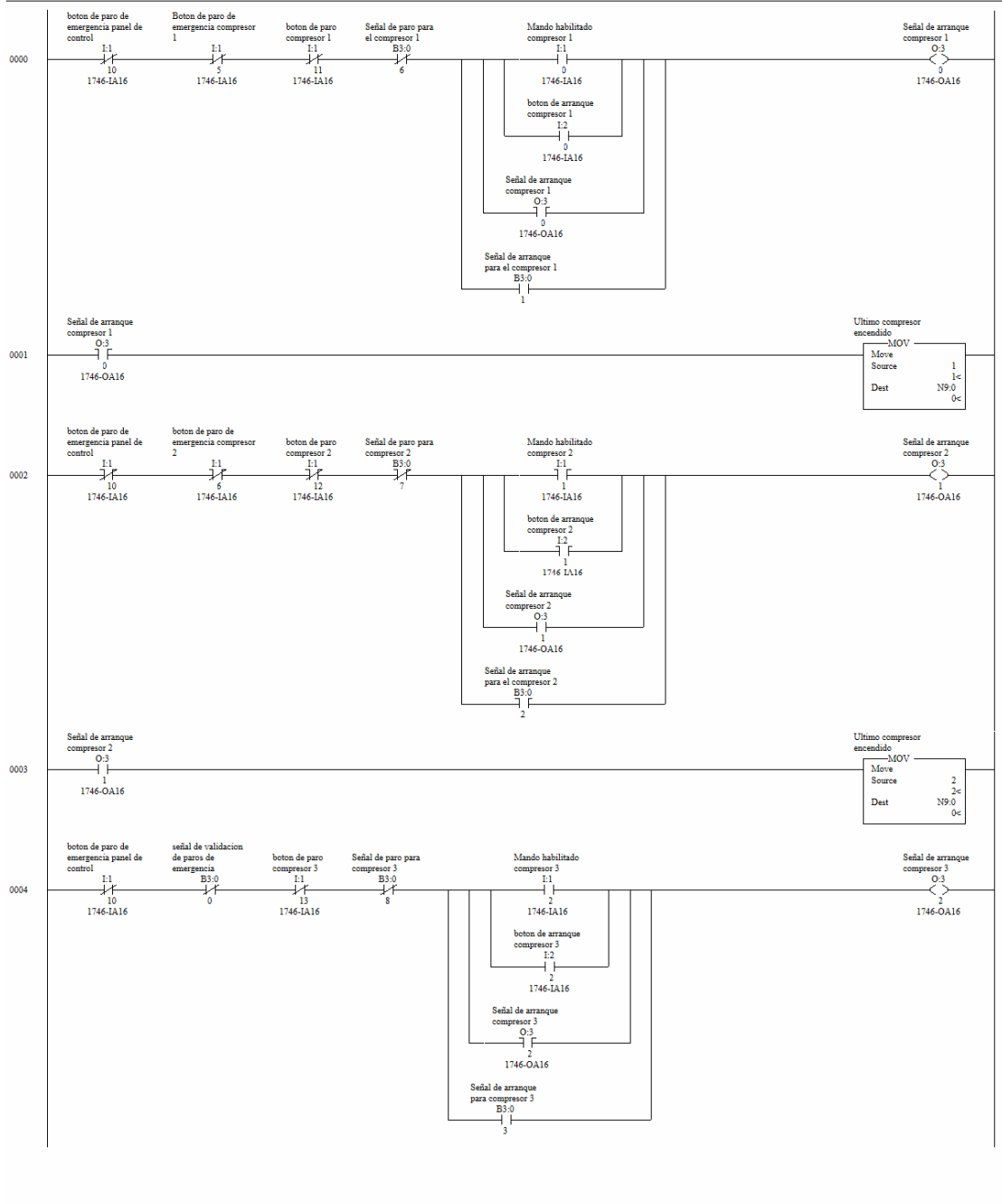
**Figura 39. Diagrama de conexión del módulo de salidas analógicas la señal 55 corresponde a la variable a la que será asignada el valor para el indicador numérico de presión, indicado en las variables definidas en 7.1.1.2**





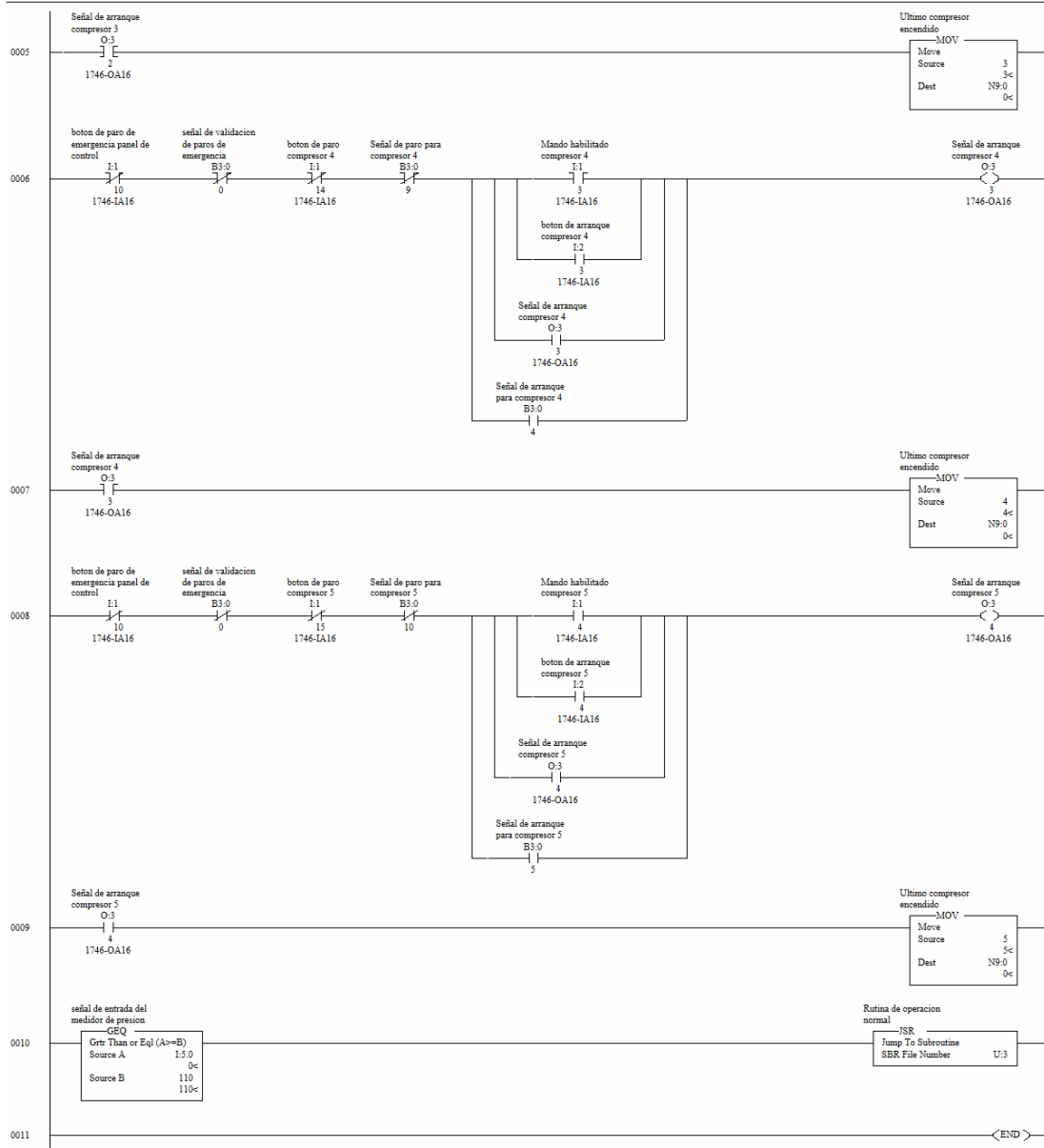
ANEXO 2 (PROGRAMA PLC)\_BAK003

LAD 2 - ARRANQUE --- Total Rungs in File = 12



ANEXO 2 (PROGRAMA PLC)\_BAK003

LAD 2 - ARRANQUE --- Total Rungs in File = 12



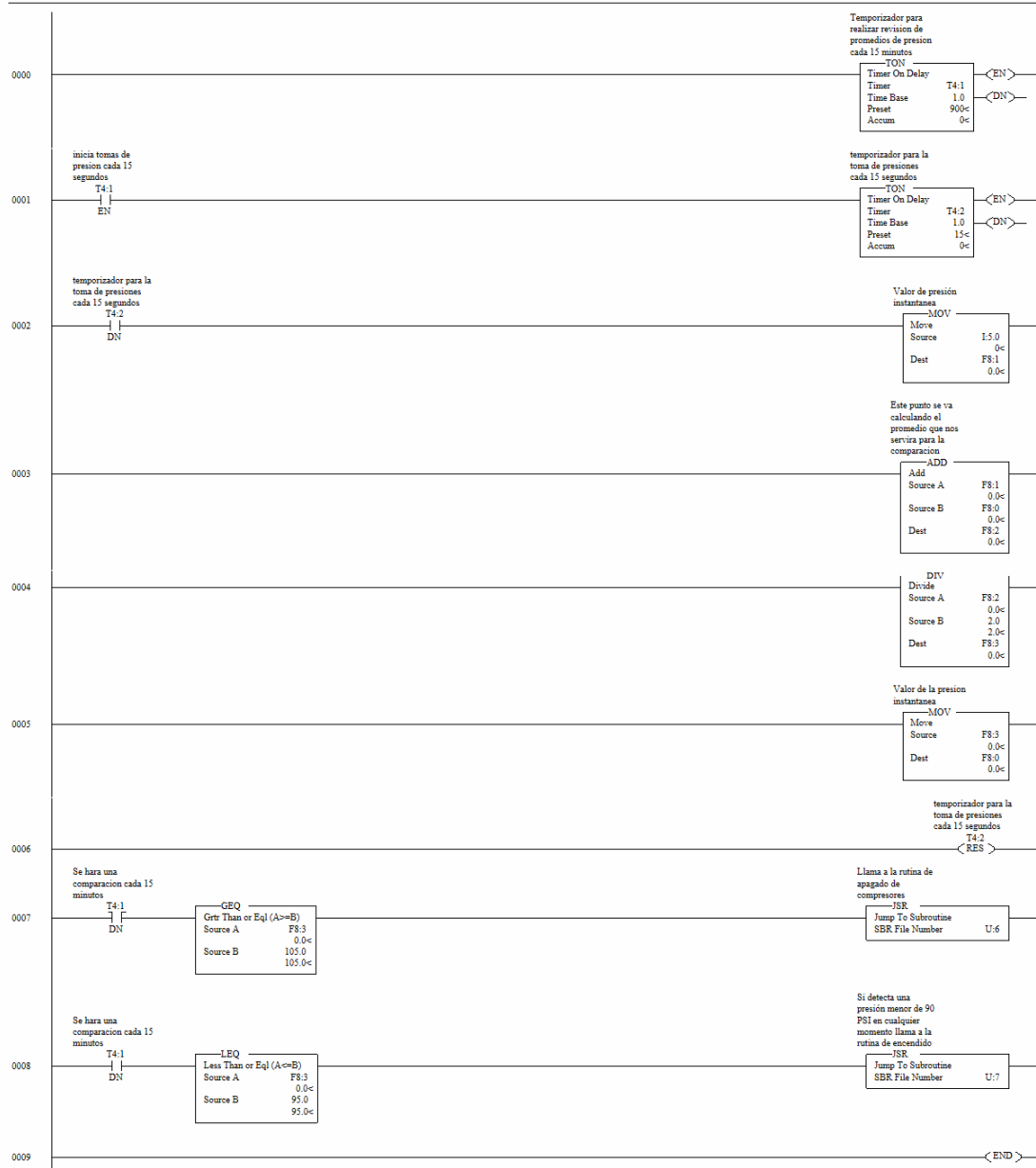
ANEXO 2 (PROGRAMA PLC)\_BAK003

LAD 3 - NORMAL - Rutina de operación normal de compresores --- Total Rungs in File = 5



ANEXO 2 (PROGRAMA PLC)\_BAK003

LAD 4 - DIFERENCIA --- Total Rungs in File = 10



ANEXO 2 (PROGRAMA PLC)\_BAK003

LAD 5 - SECADORES --- Total Rungs in File = 5



ANEXO 2 (PROGRAMA PLC)\_BAK003

LAD 6 - APAGADO --- Total Rungs in File = 11

