



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**PROPUESTA PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA DE
AIRE COMPRIMIDO DE LA EMPRESA DURMAN ESQUIVEL GUATEMALA S.A.**

Juan Luis Gómez Salazar

Asesorado por el Ing. Oscar Ernesto Jurado Godoy

Guatemala, mayo de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA DE
AIRE COMPRIMIDO DE LA EMPRESA DURMAN ESQUIVEL GUATEMALA S.A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JUAN LUIS GÓMEZ SALAZAR

ASESORADO POR EL ING. OSCAR ERNESTO JURADO GODOY

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

GUATEMALA, MAYO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Alberto Eulalio Hernández García
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortíz
EXAMINADORA	Inga. Karla María Lucas Guzmán
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR:

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

PROPUESTA PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE LA EMPRESA DURMAN ESQUIVEL GUATEMALA S.A.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha mayo de 2012.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J. L. Gómez Salazar', written in a cursive style.

Juan Luis Gómez Salazar

Guatemala, 14 ene. 13

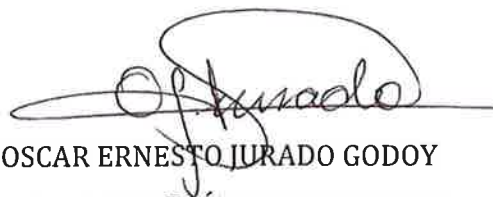
Ingeniero Cesar Ernesto Urquizú Rodas
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ingeniero Urquizú:

En cumplimiento a la resolución emitida por la Dirección de su Escuela, procedí a asesorar el trabajo de graduación del estudiante: Juan Luis Gómez Salazar con carné No. 2007-14197, con documento de identificación: 1664 84245 0101; el Trabajo de Graduación: **PROPUESTA PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE LA EMPRESA DURMAN ESQUIVEL GUATEMALA S.A.**

Considero que el trabajo cumple con los requisitos que establece la legislación universitaria, por lo que recomiendo su aprobación e impresión.

Sin otro particular me suscribo atentamente.



OSCAR ERNESTO JURADO GODOY
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL
Colegiado No. 8604

OSCAR ERNESTO JURADO GODOY
INGENIERO MECANICO INDUSTRIAL
COLEGIADO No. 8604

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF.REV.EMI.062.013

Como Catedrático Revisor del Trabajo de Graduación titulado **PROPUESTA PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE LA EMPRESA DURMAN ESQUIVEL GUATEMALA S.A.**, presentado por el estudiante universitario **Juan Luis Gómez Salazar**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑADA A TODOS”



Ing. Roberto Valle González
Ingeniero Industrial
Colegiado 2605

Ing. Roberto Valle González
Catedrático Revisor de Trabajos de Graduación
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala, abril de 2013.

/mgp



REF.DIR.EMI.132.013

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de **PROPUESTA PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE LA EMPRESA DURMAN ESQUIVEL GUATEMALA S.A.**, presentado por el estudiante universitario **Juan Luis Gómez Salazar**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. César Ernesto Urquizú Rodas
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, mayo de 2013.

/mgp



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE LA EMPRESA DURMAN ESQUIVEL GUATEMALA, S.A.**, presentado por el estudiante universitario: **Juan Luis Gómez Salazar**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, mayo de 2013

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por concederme las condiciones necesarias para lograr mi objetivo.
- Mis padres** Por ser un gran ejemplo de superación y otorgarme todas las oportunidades para ser una persona de bien.
- Mis hermanos** Por los momentos compartidos y las lecciones de vida aprendidas.
- Mi tío** Sergio Roberto Salazar Muñoz (q.e.p.d.), por el tiempo que compartió con mi familia.
- Mis amigos** A mis amigos de toda la vida, Oscar Alfredo González Campos (q.e.p.d.) y Oscar Humberto González Campos (q.e.p.d.), por todo el apoyo y las muestras sinceras de cariño que demostrarón hacia todos los miembros de mi familia.
- Mis amigos de colegio** Por compartir tantas experiencias durante los años de colegio y por mantener la amistad hasta el día de hoy.

Mis amigos de carrera

Por haber sido gran parte del aprendizaje a lo largo de los estudios universitarios.

Ing. Oscar Ernesto Jurado

Por su invaluable asesoría en el presente trabajo de graduación.

Durman Esquivel S.A

Por confiar y apoyar este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES DE DURMAN ESQUIVEL GUATEMALA	1
1.1. Historia	1
1.2. Misión, visión y valores	2
1.2.1. Misión	2
1.2.2. Visión.....	3
1.2.3. Valores	3
1.3. Proceso productivo.....	4
1.3.1. Maquinaria y equipos auxiliares	6
1.3.1.1. Tolva	6
1.3.1.2. Extrusora.....	6
1.3.1.3. Sistema de enfriamiento	7
1.3.1.4. Impresora industrial.....	7
1.3.1.5. Jalador	8
1.3.1.6. Sierra.....	9
1.3.1.7. Máquina para acampanar	9
1.3.2. Secuencia del proceso productivo	10

2.	AIRE COMPRIMIDO Y AHORRO DE ENERGÍA	13
2.1.	Aire comprimido	13
2.1.1.	Usos del aire comprimido.....	13
2.1.2.	Métodos de compresión de aire.....	14
2.1.2.1.	Flujo intermitente	14
2.1.2.2.	Flujo continuo	15
2.1.3.	Tipos de compresores.....	16
2.1.3.1.	Compresores de flujo intermitente.....	18
2.1.3.1.1.	Compresores de tornillo	19
2.1.3.2.	Compresores de flujo continuo	20
2.1.4.	Distribución de aire comprimido.....	21
2.1.4.1.	Tipos de sistema de distribución	22
2.1.4.1.1.	Sistema ramificado.....	23
2.1.4.1.2.	Sistema en anillo	23
2.1.4.1.3.	Red cerrada.....	24
2.2.	Ahorro de energía.....	24
2.2.1.	Etapas del diagnóstico energético	25
2.2.1.1.	Dirección	25
2.2.1.2.	Diagnóstico	26
2.2.1.3.	Planeación	26
2.2.1.4.	Organización.....	26
2.2.1.5.	Integración	26
2.2.1.6.	Control	27
2.2.2.	Tipos de diagnóstico energético	27
2.2.2.1.	Diagnóstico de nivel básico	27
2.2.2.2.	Diagnóstico de nivel fundamental.....	28
2.2.2.3.	Diagnóstico de tercer nivel	28

2.2.3.	Metodología para realizar un diagnóstico energético.....	29
2.2.3.1.	Trabajos previos.....	29
2.2.3.2.	Recopilación de la información	29
2.2.3.3.	Evaluación del estado energético	30
2.2.3.4.	Determinación del potencial de ahorro.....	30
2.2.3.5.	Evaluación económica de las medidas.....	31
2.2.3.6.	Selección de las medidas a implementar	31
2.2.3.7.	Aplicación de las acciones.....	31
2.2.4.	Diagnóstico energético en aire comprimido	32
3.	AHORRO DE ENERGÍA EN AIRE COMPRIMIDO	35
3.1.	Sistema de aire comprimido Durman Esquivel	36
3.1.1.	Generación de aire comprimido	37
3.1.1.1.	Compresores.....	38
3.1.1.2.	Motores eléctricos	39
3.1.1.3.	Secadores de aire	40
3.1.2.	Almacenamiento de aire comprimido	41
3.1.2.1.	Funciones del tanque de almacenamiento.....	42
3.1.2.2.	Tiempo de almacenamiento.....	43
3.1.2.3.	Volumen total de depósitos.....	44
3.1.2.4.	Capacidad del tanque de almacenamiento.....	47
3.1.3.	Distribución de aire comprimido	48
3.1.3.1.	Tubería principal	49

	3.1.3.2.	Tuberías secundarias y de servicio ...	52
3.1.4.		Tamaño del sistema de distribución.....	53
	3.1.4.1.	Longitud de tuberías principales	53
	3.1.4.2.	Longitud de tuberías secundarias.....	54
	3.1.4.3.	Longitud de tuberías de servicio	55
3.1.5.		Consumo de aire comprimido	56
	3.1.5.1.	Consumo de aire en cilindros neumáticos	57
	3.1.5.2.	Consumo de aire en sopladores	60
	3.1.5.3.	Resumen del consumo	62
3.2.		Disminución de fugas.....	64
3.3.		Control del compresor.....	66
	3.3.1.	Importancia de los sistemas de control.....	66
	3.3.1.1.	Estrategias de control	67
		3.3.1.1.1. Prendido-apagado	67
		3.3.1.1.2. Carga-sin carga	67
		3.3.1.1.3. Variación de frecuencia	68
	3.3.1.2.	Equipos de control	69
	3.3.1.3.	Funcionamiento de un sistema de control	71
		3.3.1.3.1. Lazo de control.....	72
	3.3.2.	Instalación eléctrica.....	73
4.		PROPUESTA DE MEJORA.....	75
	4.1.	Puntos críticos del sistema de aire comprimido.....	75
	4.2.	Diagnóstico del sistema de aire comprimido.....	76
	4.2.1.	Cálculo de fugas	77
	4.2.2.	Caída de presión.....	80

4.2.2.1.	Caída de presión en línea principal....	84
4.2.2.2.	Caída de presión en línea secundaria.....	85
4.2.2.3.	Caída de presión en línea de servicio	86
4.2.3.	Porcentaje de caída de presión.....	87
4.2.4.	Sistema de control.....	88
4.2.4.1.	Determinación técnica.....	88
4.3.	Focos de pérdida en Durman Esquivel, Guatemala.....	94
4.4.	Propuesta para la empresa	94
4.4.1.	Programa para control de fugas.....	95
4.4.1.1.	Determinar el nivel de fugas	95
4.4.1.2.	Localizar las fugas	95
4.4.1.3.	Eliminar las fugas encontradas	96
4.4.1.4.	Definir un programa de mantenimiento.....	96
4.4.1.4.1.	Mantenimiento diario ..	97
4.4.1.4.2.	Mantenimiento programado	99
4.4.1.4.3.	Stock de repuestos ...	100
4.4.2.	Reducción de caída de presión.....	101
4.4.2.1.	Reducción de la presión en la distribución	102
4.4.2.2.	Reducción de la presión en la compresión.....	102
4.4.3.	Eficiencia energética	103
4.4.3.1.	Indicador de eficiencia	104

5.	ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO	107
5.1.	Cálculo de costos.....	108
5.1.1.	Costos de operación	109
5.1.1.1.	Costo por fugas	109
5.1.1.2.	Costo por caída de presión excesiva	111
5.1.1.3.	Costo del plan de mantenimiento	112
5.1.2.	Costos de inversión.....	115
5.2.	Cálculo estimado de ahorro	118
5.3.	Cálculo de índices financieros	119
5.3.1.	Valor Presente Neto.....	121
5.3.2.	Tasa Interna de Retorno (TIR).....	123
5.3.3.	Período de recuperación.....	125
	CONCLUSIONES.....	127
	RECOMENDACIONES	131
	BIBLIOGRAFÍA.....	133
	ANEXOS.....	137

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Proceso productivo	5
2.	Representación de una tolva	6
3.	Representación de una extrusora	7
4.	Impresora industrial.....	8
5.	Jalador	8
6.	Máquina para acampanar	9
7.	Línea de extrusión de tubos.....	11
8.	Flujo intermitente.....	15
9.	Flujo continuo.....	16
10.	Clasificación de compresores	17
11.	Rotores helicoidales de un compresor de tornillo	20
12.	Árbol de fallas del sistema neumático.....	35
13.	Compresor de tornillo.....	39
14.	Operación de un compresor.....	44
15.	Tanques de almacenamiento.....	47
16.	Múltiple de admisión	50
17.	Isométrico de tubería neumática de Durman Esquivel	63
18.	Costo por fugas de aire.....	65
19.	Panel de control	70
20.	Transductor de presión	71
21.	Diagrama de un lazo de control cerrado	73
22.	Instalación eléctrica.....	74
23.	Diagrama de instalación eléctrica	74

24.	Diagrama de Moody	82
25.	Analizador de redes	89
26.	Gráfica de presión en suministro y en planta	91
27.	Detector acústico ultrasónico.....	117

TABLAS

I.	Datos técnicos de compresores	38
II.	Datos técnicos de motores eléctricos.....	40
III.	Datos técnicos de secadores de aire	41
IV.	Tanques de almacenamiento	46
V.	Longitud equivalente de accesorios	49
VI.	Tubería de una pulgada y media.....	51
VII.	Tubería de dos pulgadas.....	51
VIII.	Tubería de una pulgada	52
IX.	Tubería de media pulgada	52
X.	Tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada.....	53
XI.	Línea principal de aire	54
XII.	Línea secundaria de aire	54
XIII.	Lineas de servicio de aire (3/4").....	55
XIV.	Lineas de servicio de aire (1/2").....	56
XV.	Consumo de aire para cilindros neumáticos	58
XVI.	Interpolación para consumo de cilindros neumáticos	59
XVII.	Gasto de aire en sopladores	61
XVIII.	Consumo de aire comprimido en Durman.....	62
XIX.	Tiempo de llenado y vaciado del compresor	80
XX.	Consumo real de aire comprimido en Durman.....	81
XXI.	Caída de presión en libras por pulgada cuadrada	83
XXII.	Corriente de motores.....	92

XXIII.	Potencia consumida	93
XXIV.	Control de mantenimiento diario.....	98
XXV.	Control de mantenimiento programado	100
XXVI.	<i>Stock</i> de repuestos	101
XXVII.	Flujo entregado.....	105
XXVIII.	Costo del kilowatt-hora	108
XXIX.	Costo por fugas	110
XXX.	Consumo total de compresores.....	111
XXXI.	Costo de mano de obra	112
XXXII.	Costo unitario de accesorios para reparaciones	113
XXXIII.	Costo de mantenimiento diario	114
XXXIV.	Costo de mantenimiento programado	115
XXXV.	Costo de <i>stock</i> inicial	116
XXXVI.	Resumen de ahorros y costos	119
XXXVII.	Periodo de recuperación.....	126

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Aceleración de la gravedad
ϕ	Diámetro
$f.p$	Factor de potencia
lb/plg^2 (psi)	Libras por pulgada cuadrada
L	Longitud
n	Número de periodos
Re	Número de Reynolds
h_L	Pérdida de carga
$pie^3/minuto$	Pies cúbicos por minuto
%	Porcentaje
i	Tasa de interés
v	Velocidad

GLOSARIO

Aire libre	Es el aire que existe en las condiciones de presión y temperatura reinantes en la aspiración del compresor.
Capacidad	Es la cantidad de aire libre realmente aspirado por un compresor.
Caída de presión	La diferencia de presión existente entre dos puntos de una tubería de aire comprimido.
Caudal	Cantidad de fluido que circula; los caudales se expresan en volúmenes por unidad de tiempo, generalmente en metros cúbicos por segundo y son variables en el tiempo y el espacio.
Compresor	Máquina construida para aumentar la presión y desplazar fluidos compresibles, como el gas o el aire.
Fuga	La salida o escape de gas por un orificio o abertura, producidos accidentalmente.
Múltiple de admisión	Sistema con la finalidad de recolectar un gas de distintos puntos de admisión.

TIR

Tasa Interna de Retorno

VPN

Valor Presente Neto

RESUMEN

Esta propuesta es una herramienta informativa para generar ahorro en un sistema de aire comprimido. El eje central del documento es la rentabilidad de implementar medidas ahorrativas. El trabajo de graduación está estructurado en cinco capítulos que están relacionados con las fases de desarrollo de un proyecto de inversión. La empresa que permitió el uso de sus instalaciones para ejemplificar el estudio fue Durman Esquivel Guatemala, ubicada en el kilómetro 19,5 de la carretera al Pacífico.

En el primer capítulo se brinda información sobre la situación actual de la empresa así como una reseña histórica; se describe el proceso productivo y el estado actual de toda la maquinaria con que se dispone.

El segundo capítulo describe los lineamientos y conceptos básicos sobre neumática y muestra una metodología general para generar ahorro de energía en cualquier parte de una planta industrial.

En el tercer capítulo se describe la maquinaria utilizada para comprimir el aire y los medios utilizados en los puntos de servicio; además, se procede a calcular las instalaciones actuales, lo que ayuda a determinar las medidas que se pueden tomar para generar ahorro.

El cuarto capítulo trata de la propuesta de mejora al sistema de aire comprimido de Durman Esquivel. En este capítulo se comparan los valores obtenidos experimentalmente con datos tomados como aceptables en el diseño de sistemas de generación, distribución y consumo de aire comprimido.

Se introducen conceptos y metodologías orientadas al ahorro de energía para el control y operación adecuados del equipo neumático. Se presentan diagramas propuestos para generar el mayor beneficio posible.

El quinto capítulo aborda los temas que aprobaron la determinación técnica y los analiza desde el punto de vista económico y financiero. Se presentan datos tabulados sobre costos y ahorros estimados si se aplicaran las medidas propuestas.

OBJETIVOS

General

Proponer la mejora de la eficiencia energética en el sistema neumático en la empresa Durman Esquivel Guatemala S.A.

Específicos

1. Calcular el porcentaje de ahorro energético luego de realizar el diagnóstico del sistema de aire comprimido.
2. Determinar la metodología general más eficiente para realizar un diagnóstico energético.
3. Identificar las herramientas necesarias para la evaluación energética de los equipos de aire comprimido.
4. Conocer la metodología adecuada para el mantenimiento de los compresores del sistema neumático de la empresa.
5. Calcular los beneficios económicos y financieros de la propuesta de mejora energética en el sistema de aire comprimido.
6. Identificar los equipos necesarios para el funcionamiento eficiente de un sistema neumático.

INTRODUCCIÓN

El uso del aire comprimido es muy común en la industria, su uso tiene la ventaja sobre los sistemas hidráulicos de ser más rápido, aunque es menos preciso en el posicionamiento de los mecanismos y no permite fuerzas grandes. La compresión de aire se realiza con diversos propósitos, entre los que cuales se puede mencionar: transmisión de potencia, alimentación a un proceso de combustión, transporte y distribución de gas, obtención de condiciones más favorables en una reacción química, etc.

Existen diferentes métodos de compresión y la elección de alguno es crítica para el consumo eficiente de energía en una industria; el crecimiento de la economía durante los últimos años se ha traducido en un aumento desmedido del consumo de energía eléctrica, no se tiene en consideración la protección del medio ambiente y de los recursos naturales, lo cual podría comprometer el crecimiento futuro del país; el uso eficiente de la energía constituye una de las más importantes opciones tecnológicas para enfrentar los problemas señalados.

El uso eficiente de la energía eléctrica consiste en satisfacer los requerimientos energéticos de la sociedad al menor costo económico posible, energizar de manera productiva las actividades que requieren este recurso y concebir políticas energéticas a largo plazo, en oposición a los programas de emergencia. El ahorro de energía permite reducir los costos de producción, lo que se traduce en un incremento de la ganancia en una empresa.

El consumo de energía de los sistemas neumáticos en una empresa es considerable, la mayoría de veces el desperdicio se debe a errores en el diseño o a falta de mantenimiento del sistema en general.

1. ANTECEDENTES DE DURMAN ESQUIVEL GUATEMALA

1.1. Historia

Durman Esquivel fue fundada en 1959 en San José, Costa Rica por Arthur Durman Carranza. La empresa inició con una planta de tuberías de PVC en 1962; seis años después amplió su operación con una planta de inyección para la fabricación de accesorios de PVC; muy pronto, Durman Esquivel trascendió las fronteras del país donde se fundó. En 1975 llegó a Panamá; en 1987 se creó una división en El Salvador y a continuación en 1988 llegó a Guatemala.

A través de un proceso de fusiones y adquisiciones, la empresa ha alcanzado presencia en 11 países de Latinoamérica. Durante 2001, la corporación inició un proceso de consolidación en el mercado mexicano, alcanzando cinco plantas de producción en dicho país. En ese mismo año, comenzó su expansión por el mercado sudamericano fusionando tres participaciones accionarias que poseía en Perú. En el mismo período absorbió la empresa industrial Panelex S.A. en Costa Rica.

Para 2002 amplió su base productiva en México y redistribuyó la producción de tubería PVC de la planta en El Salvador entre sus otras plantas, pero mantuvo presencia en dicho país. Una operación similar realizó en Nicaragua, donde vendió la participación que tenía en Tubofort Nicaragua, para consolidar la operación en Tubofort Guatemala, lo que ayudó a brindar una mejora en las operaciones de Honduras y El Salvador, con un mejor servicio de entrega de producto desde esta planta.

El grupo Aliaxis en Latinoamérica surge de la unión entre Durman y Aliaxis, dos empresas líderes en la región, comprometidas con la excelencia en el campo de la construcción.

A través de sus marcas, Nicoll y Durman, resuelven y respaldan todos los retos que asumen. Enfocan sus esfuerzos al desarrollo de productos innovadores y a la entrega de las mejores asesorías, creando las soluciones más eficientes a las necesidades de sus clientes.

Gracias a la experiencia de años, su constante búsqueda de la excelencia y con el apoyo de un equipo de profesionales del más alto nivel, hoy pueden afirmar que son más que una empresa líder en la región, son una empresa de soluciones.

1.2. Misión, visión y valores

En Durman Esquivel es importante la planificación para saber a dónde quieren llegar; es por esto que cuenta con la misión, visión y valores que los ayudarán a cumplir sus objetivos.

1.2.1. Misión

“Proveer a nuestros clientes de soluciones con excelencia en el ramo de la construcción en América Latina, a través de productos innovadores y eficientes, de forma tal éstos ayuden a nuestros clientes a ser mejores y más rentables, mejorando así la calidad de vida en nuestro país, el de nuestros colaboradores y sus accionistas”.

1.2.2. Visión

“La consolidación del liderazgo del grupo Durman Esquivel en América Latina, basados en nuestra estrategia de negocio, política de calidad, valores y servicio”.

1.2.3. Valores

Los valores son un conjunto de principios, creencias y reglas que regulan la gestión de la organización. Constituyen la filosofía institucional y el soporte de la cultura organizacional. El objetivo básico de la definición de valores corporativos es el de tener un marco de referencia que inspire y regule la vida de la organización. Los valores son guías que orientan a las personas en cuanto a cosas que son importantes, que tienen sentido y que son estables a lo largo del tiempo.

Durman Esquivel está interesada en establecer un compromiso con el cliente y el mercado, ya que son ellos son quienes hacen que su negocio exista.

Todas y cada una de las personas que laboran en Durman Esquivel, tienen la responsabilidad permanente de ofrecer bienes y servicios que cumplan con los requisitos de sus clientes.

Para Durman Esquivel es importante encontrar en sus empleados los valores que se enumeran a continuación, para exceder los requerimientos de sus clientes.

- Honorabilidad
- Integridad moral

- Lealtad
- Innovación
- Trabajo en equipo
- Tolerancia
- Respeto al medio ambiente

1.3. Proceso productivo

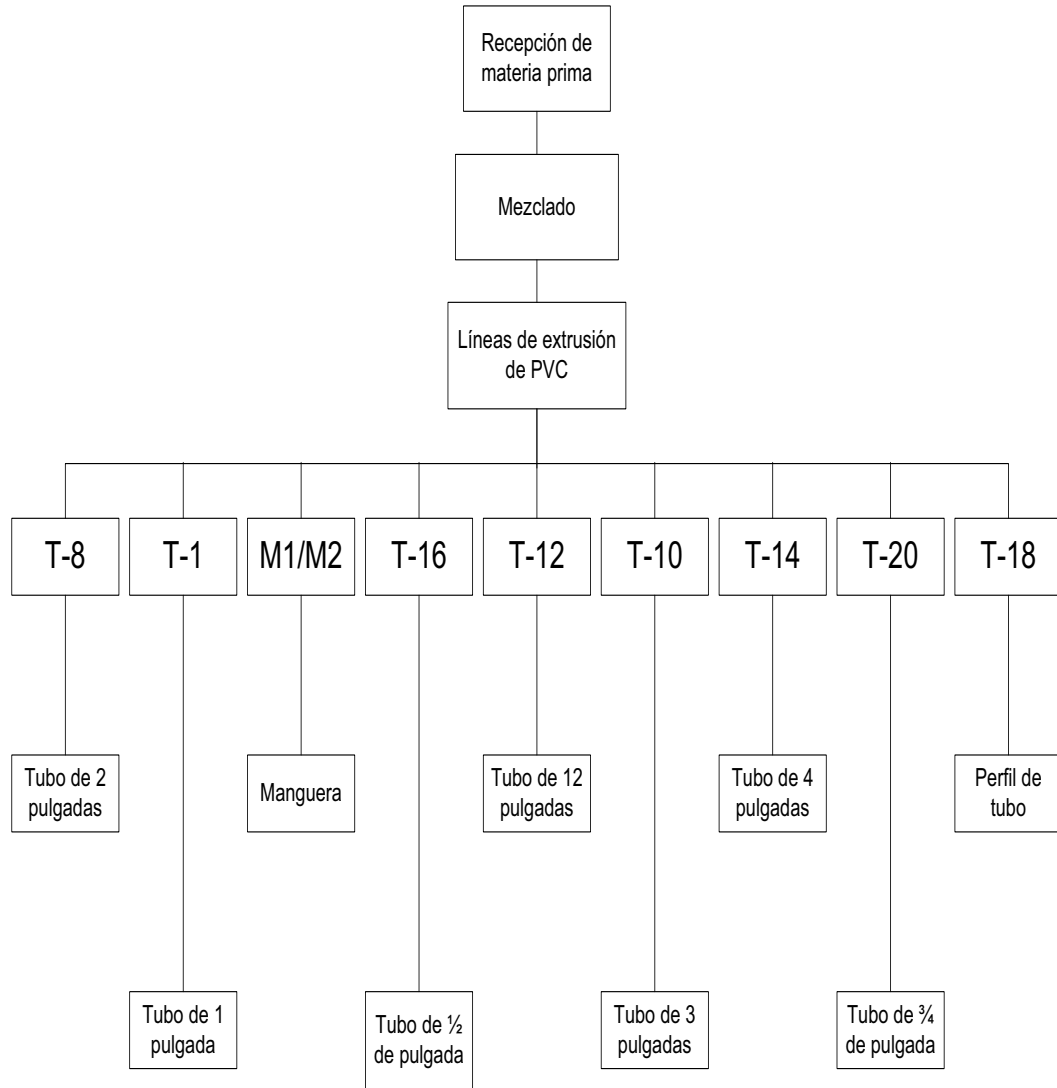
Es importante describir el proceso que se lleva a cabo en la empresa para manufacturar los productos que Durman Esquivel ofrece al mercado. La extrusión es la principal herramienta utilizada para crear los diversos tamaños de tubo, posteriormente el material es cortado y empacado para su venta.

El proceso productivo cuenta con nueve líneas de producción que básicamente siguen el mismo procedimiento, presentando algunas variaciones de tamaño y forma.

La preparación del material comienza en los silos de resina virgen en donde se recibe y almacena la materia prima para ser tratada. El material es posteriormente enviado hacia el cuarto de mezclado en donde se le añaden resinas y otros materiales, para que el producto presente las propiedades requeridas; finalmente la mezcla es almacenada en depósitos denominados silos de compuesto de donde se tomará el material para alimentar las distintas líneas de producción.

En la figura 1 se indican las líneas de producción existentes y el proceso general que se lleva a cabo en la empresa, así como los productos obtenidos.

Figura 1. **Proceso productivo**



Fuente: elaboración propia.

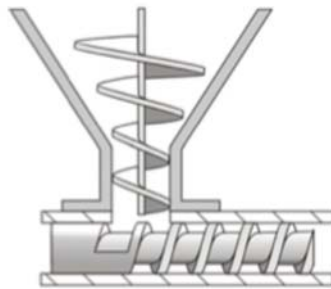
1.3.1. Maquinaria y equipos auxiliares

Con el fin de ofrecer una breve introducción a la maquinaria que se utiliza en el proceso, se realiza la siguiente descripción, para facilitar la comprensión de la terminología que se maneja en este tipo de procesos productivos.

1.3.1.1. Tolva

La tolva es un dispositivo similar a un embudo de gran tamaño destinado al depósito de materiales granulares o pulverizados para alimentar un proceso. Generalmente es de forma cónica y siempre es de paredes inclinadas (ver figura 2).

Figura 2. **Representación de una tolva**

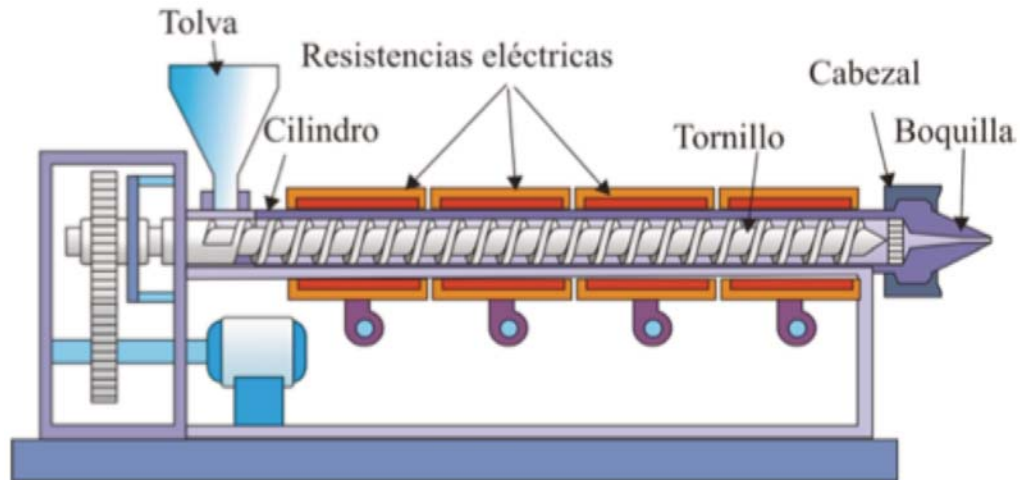


Fuente: BELTRAN, M; MARCILLA, A. Tecnología de polímeros. p. 111.

1.3.1.2. Extrusora

La extrusora es una máquina alimentada por medio de una tolva, que hace pasar el material por un husillo (tornillo sin fin), que calentado, derrite el material y al ser expulsado a presión por la máquina por medio de un dado (molde), se obtiene una forma determinada solicitada bajo diseño (ver figura 3).

Figura 3. **Representación de una extrusora**



Fuente: BELTRAN, M; MARCILLA, A. Tecnología de polímeros. p. 104.

1.3.1.3. Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento es un conjunto de mecanismos utilizados para disminuir la temperatura del material a través de cambios continuos de agua, por medio de válvulas operadas con mandos neumáticos.

1.3.1.4. Impresora industrial

Una impresora industrial es una máquina utilizada para aplicar códigos alfanuméricos, logotipos y gráficos de alta calidad, para prácticamente cualquier superficie, en cualquier velocidad de línea, ángulo o ubicación de un producto o envase (ver figura 4).

Figura 4. **Impresora industrial**



Fuente: <http://www.videojet.com/laam/es/videojet-1610-doble-cabezal>. Consulta: 10 de febrero de 2012.

1.3.1.5. **Jalador**

El jalador consiste de dos orugas, una abajo y la otra arriba, que por medio de presión de aire sujetan al tubo y lo tiran hacia una dirección determinada (ver figura 5).

Figura 5. **Jalador**



Fuente: <http://www.asia.ru/en/ProductInfo/1429068.html>. Consulta: 10 de febrero de 2012.

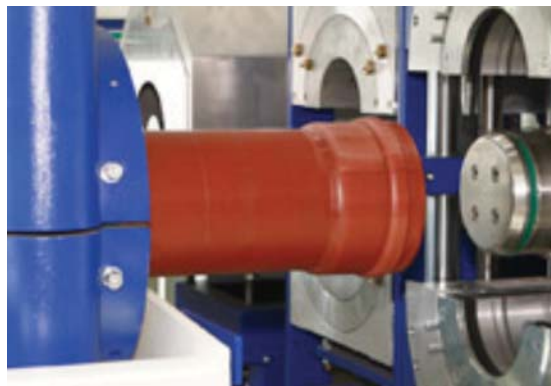
1.3.1.6. Sierra

La sierra es una herramienta utilizada para cortar madera u otros materiales; en este caso plástico, posee una hoja con filo dentado. En la empresa existen diferentes tipos de sierra para manejar los diferentes tamaños de tubo que se producen.

1.3.1.7. Máquina para acampanar

La máquina para acampanar es utilizada para aumentar el diámetro de uno de los extremos del tubo producido, para que coincida con el diámetro externo del mismo tamaño de tubo. Este dispositivo calienta el extremo del tubo hasta que el material se vuelve maleable y posteriormente aumenta el diámetro de la sección del tubo.

Figura 6. **Máquina para acampanar**



Fuente: <http://www.sica-italy.com/newsletter.php?ln=spa&nwsl=16>. Consulta: 10 de febrero de 2012.

1.3.2. Secuencia del proceso productivo

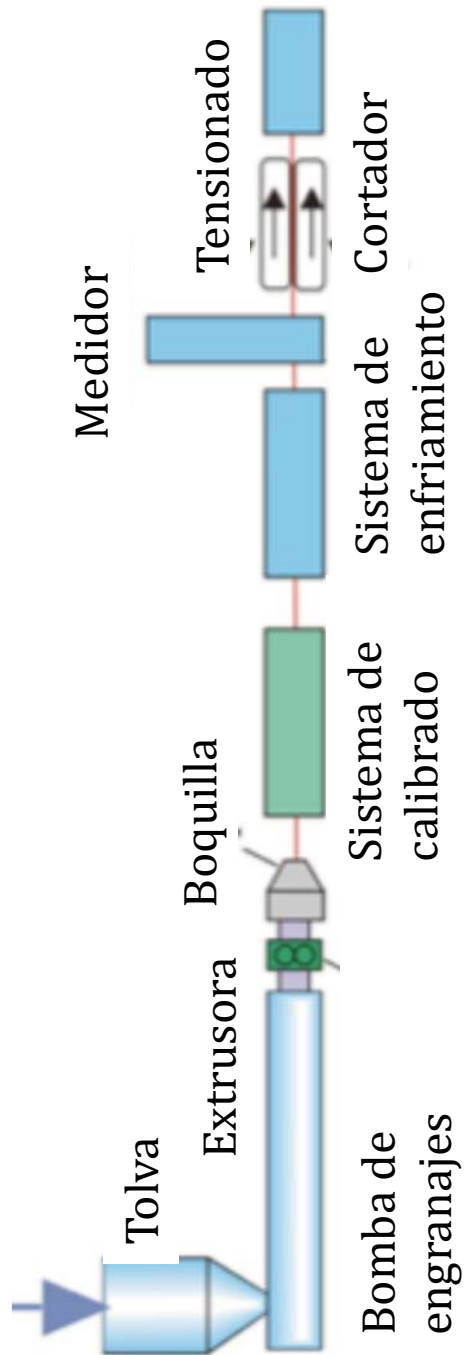
En cada una de las líneas de producción en la empresa se utilizan básicamente los mismos procedimientos, independientemente del tamaño de tubo a producir. El proceso comienza con el llenado de las tolvas, las que se encargan de dosificar el material hacia la extrusora de plástico; en esta máquina se calienta el compuesto hasta que llega a la fluidez deseada.

El dado o molde recibe el material proveniente de la extrusora y se encarga de darle una forma determinada, al salir del molde el tubo ya ha tomado las dimensiones deseadas. El sistema de enfriamiento recibe el tubo y disminuye la temperatura del mismo. El tubo sale del baño, en este momento la impresora industrial le imprime información en la superficie del producto, que incluye tamaño del tubo, planta en que se produjo, país, etc.

El jalador recibe el tubo y se encarga de darle la velocidad deseada a la línea de producción; en el caso de que la línea se mueva muy rápido o muy despacio se verá afectada la calidad del producto, por lo que es un proceso muy delicado en la extrusión de tubería de PVC.

La sierra está programada para cortar el tubo cada 6 metros y finalmente manda el tubo a la acampanadora, en donde el extremo del tubo es calentado y posteriormente ensanchado. El último paso de la línea de producción es el almacenaje.

Figura 7. Línea de extrusión de tubos



Fuente: BELTRAN, M; MARCILLA, A. Tecnología de polímeros. p. 156.

2. AIRE COMPRIMIDO Y AHORRO DE ENERGÍA

2.1. Aire comprimido

El aire es la mezcla de gases que constituye la atmósfera terrestre y está compuesto en proporciones variables por sustancias como el nitrógeno (78%), oxígeno (21%), vapor de agua (entre 0% y 7%) y 1% de otras sustancias. El aire tiene la capacidad de ser comprimido, almacenado y luego distribuido para su uso posterior.

Se denomina aire comprimido al que se encuentra a una presión superior a la atmosférica; esta condición del aire se obtiene mediante compresores, las moléculas del aire comprimido no ofrecen ninguna resistencia para desplazarse entre sí y transmiten su presión a toda pared con la que están en contacto.

2.1.1. Usos del aire comprimido

La compresión es el proceso mediante el cual se eleva la presión de un fluido gaseoso por una disminución de su volumen específico. Por consiguiente, un compresor es una máquina destinada a elevar la presión de un fluido. La compresión se realiza con diversos propósitos, entre los cuales están los siguientes:

- Transmisión de potencia
- Alimentación para un proceso de combustión
- Alimentación para un proceso industrial

- Transporte y distribución de gas
- Hacer circular un gas a través de un proceso o sistema
- Obtención de condiciones más favorables en una reacción química
- Obtención y mantenimiento de niveles de presión reducidos mediante la remoción de gases del sistema

2.1.2. Métodos de compresión de aire

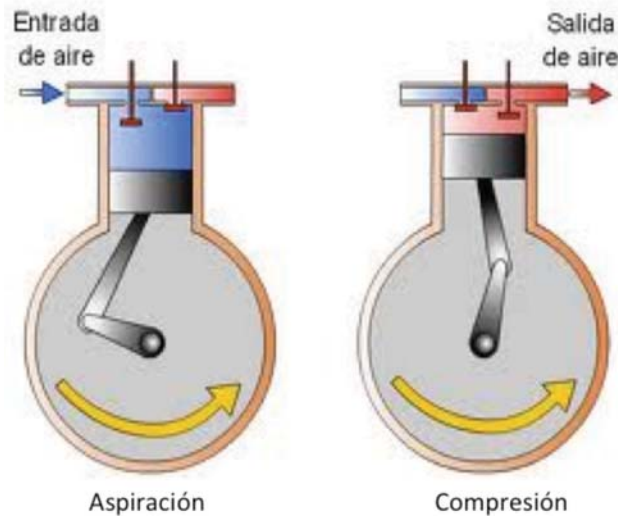
Se utilizan cuatro métodos para comprimir un gas. Dos son de flujo intermitente, y los otros dos de flujo continuo. Ambos serán descritos a continuación.

2.1.2.1. Flujo intermitente

El flujo intermitente en un compresor se debe a que volúmenes sucesivos de gas son confinados dentro de un espacio cerrado y elevados a una mayor presión; en la figura 8 se aprecia el mecanismo que se encarga de mover un pistón para atrapar el aire y luego enviarlo a un contenedor cerrado.

- El primer método de desplazamiento positivo consiste en atrapar cantidades consecutivas de gas en una cámara, reducir el volumen y empujar luego el gas comprimido fuera de la cámara.
- El segundo método de flujo intermitente radica en atrapar cantidades consecutivas de gas en un espacio cerrado, trasladarlo sin cambio de volumen a la descarga de un sistema de alta presión; comprimir el gas mandando el flujo en sentido contrario al normal y finalmente empujar el gas comprimido fuera de la cámara.

Figura 8. **Flujo intermitente**

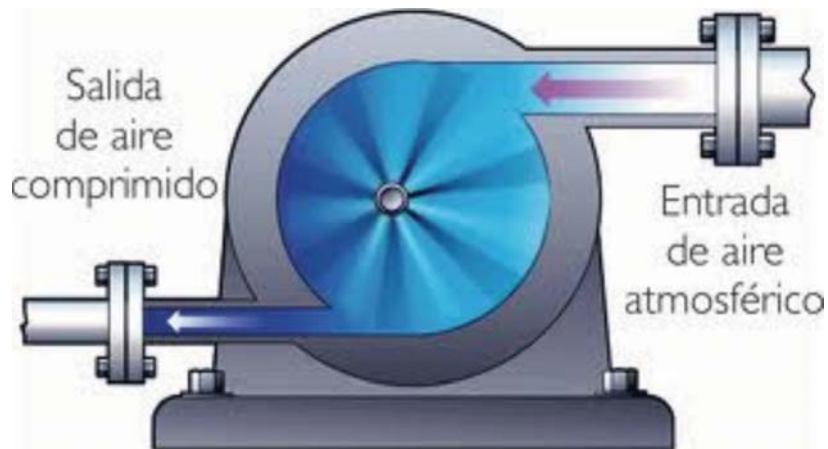


Fuente: http://tecno2aulavirtual.blogspot.com/2013_01_01_archive.html. Consulta: 17 de marzo de 2012.

2.1.2.2. **Flujo continuo**

- En la compresión, por medio del primer método de flujo continuo, se comprime el gas por la acción mecánica de un impulsor o rotor con paletas en rápida rotación, el cual imparte velocidad y presión al gas que está fluyendo, es decir, la velocidad se convierte en presión en difusores estacionarios o paletas.
- El segundo método consiste en utilizar un chorro de gas o vapor que arrastre el gas a comprimir para luego convertir la alta velocidad de la mezcla en presión, en un difusor localizado más abajo. Los eyectores normalmente operan con una presión de admisión inferior a la atmosférica.

Figura 9. **Flujo continuo**



Fuente: <http://compresores5i.blogspot.com>. Consulta: 17 de marzo de 2012.

2.1.3. Tipos de compresores

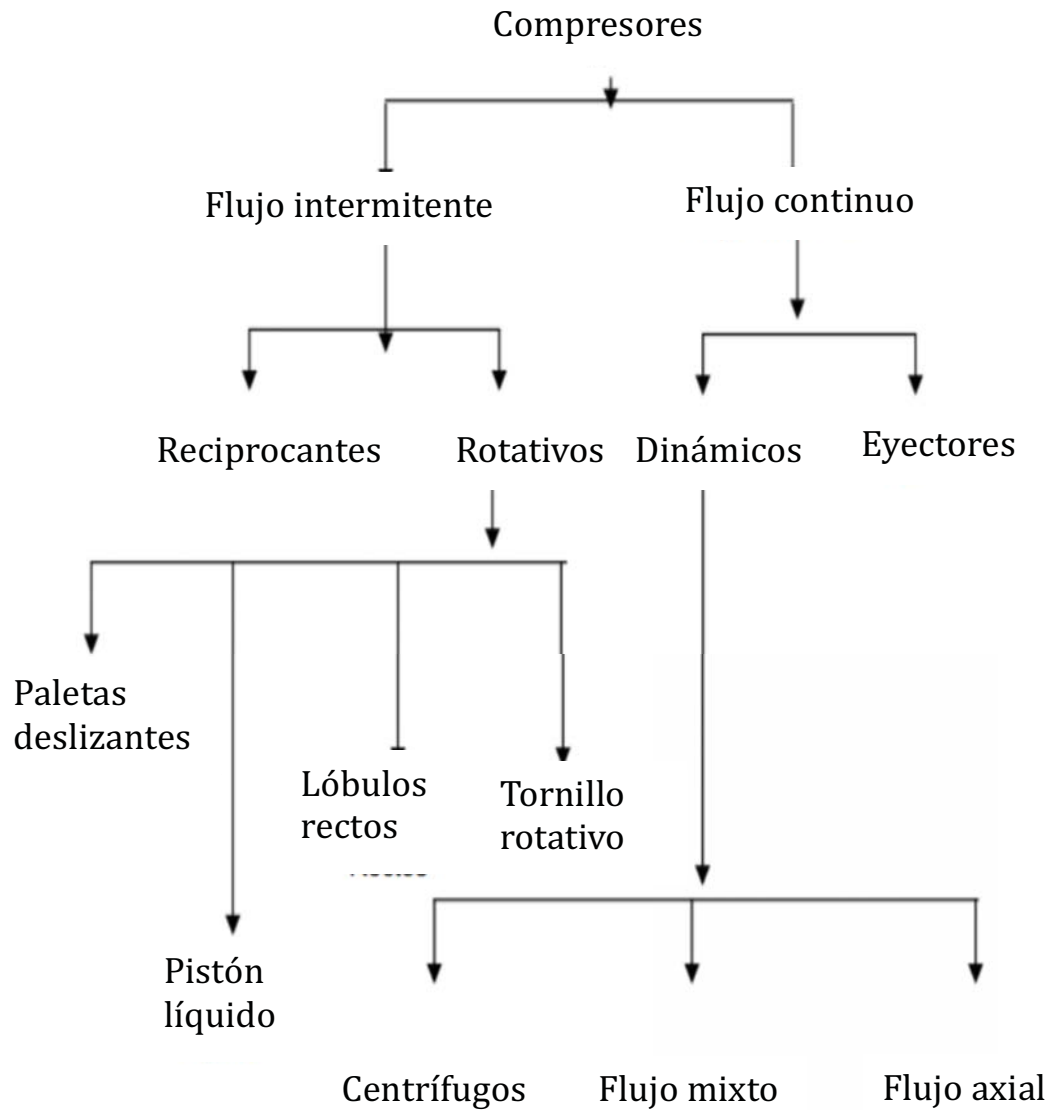
Para generar aire comprimido se utilizan dispositivos denominados compresores que elevan la presión del aire al valor de trabajo deseado. Los mecanismos y mandos neumáticos se alimentan desde una estación central.

El aire comprimido viene del cuarto de compresores y llega a las instalaciones a través de tuberías.

Para producir aire a bajas presiones, inferiores a 0.55 libra por pulgada cuadrada, se utilizan generalmente ventiladores.

Por encima de este valor se emplean varios tipos de compresores y ventiladores, los cuales pueden clasificarse como sigue:

Figura 10. Clasificación de compresores



Fuente: ÁVILA, Alvaro. Manual del profesional del aire comprimido. p. 1.

2.1.3.1. Compresores de flujo intermitente

Los compresores de flujo intermitente son aquellos en los que volúmenes sucesivos de gas son confinados dentro de un espacio cerrado y elevados a una mayor presión. Los distintos dispositivos que pertenecen a los compresores de desplazamiento positivo se describen brevemente a continuación.

- Compresores reciprocantes: son máquinas en las cuales el elemento que comprime y desplaza el gas es un pistón que efectúa un movimiento recíprocante dentro de un cilindro.
- Compresores rotativos: son máquinas en las cuales la compresión y el desplazamiento son efectuados por la acción de movimiento de elementos que están en rotación.
- Compresores de paletas deslizantes: son máquinas rotativas en las cuales paletas axiales se deslizan radialmente en un rotor excéntrico montado en una carcasa cilíndrica. El gas atrapado entre las paletas es comprimido y posteriormente desplazado.
- Compresores de pistón líquido: son máquinas rotativas en las cuales el agua u otro líquido hacen las veces de pistón para comprimir y desplazar el gas que se maneja.
- Compresores de lóbulo recto: son máquinas en las cuales dos impulsores rotativos de lóbulos rectos encajados atrapan el gas y lo trasladan desde la admisión hasta la descarga. En estos no hay compresión interna; el aumento de presión se debe al contraflujo.

2.1.3.1.1. Compresores de tornillo

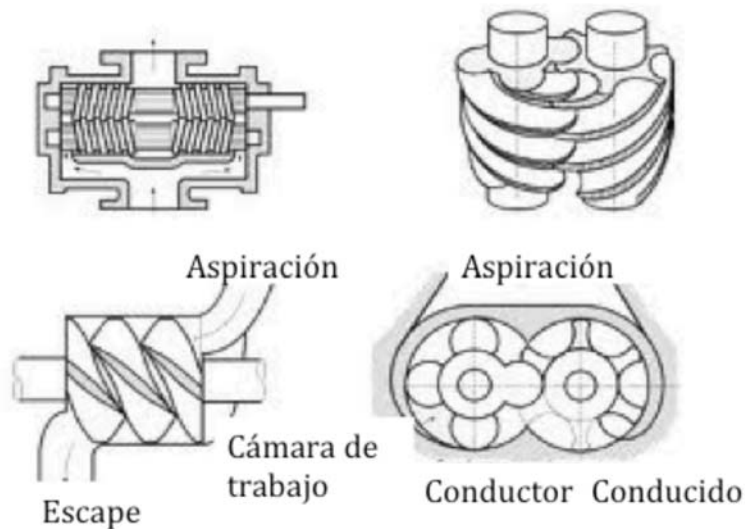
Debido a que los compresores de tornillo son objeto de estudio en el presente trabajo, se dará una explicación más extensa sobre el mismo a razón de ilustrar la maquinaria encontrada en la empresa. Los compresores de tornillo son de tipo volumétrico y este diseño ha demostrado ser compatible para satisfacer necesidades de una amplia gama de caudales que van desde 88 hasta 2 470 pies cúbicos por minuto, manejando presiones máximas de trabajo de entre 8 y 10 bar.

El compresor rotativo de tornillo es una máquina con dos rotores que comprime gas entre las cámaras de los lóbulos helicoidales entrelazados y la carcasa. Los lóbulos en los rotores no son idénticos. Los compresores de tornillo están dispuestos de tal manera que el rotor macho se encuentra dotado de lóbulos y el rotor hembra de acanaladuras en las cuales se introducen los lóbulos en el curso de la rotación.

El accionamiento del conjunto tiene lugar por el extremo del eje que lleva el rotor macho, quien arrastra por contacto a la hembra, o lo hace mediante engranajes sincronizados que posicionan relativamente los elementos con enorme exactitud, consiguiendo en ambos casos la intersección mutua entre los cuatro lóbulos del macho y los seis canales de la hembra.

Es posible tener doble etapa haciendo un arreglo de máquinas en serie. Ocasionalmente las dos etapas están en la misma carcasa, conectadas por ductos internos.

Figura 11. **Rotores helicoidales de un compresor de tornillo**



Fuente: CARNICER, Enrique. Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones. p. 122.

2.1.3.2. **Compresores de flujo continuo**

Aunque los compresores que se encuentran en Durman Esquivel son de desplazamiento positivo, se ilustrarán los compresores de flujo continuo con fines didácticos.

- **Compresores dinámicos:** son máquinas rotativas en las cuales un impulsor en rápida rotación acelera el gas que pasa a través de este; la cabeza de velocidad es convertida en presión, parcialmente en el elemento rotativo y parcialmente en los difusores estacionarios o paletas.
- **Compresores centrífugos:** son máquinas en las cuales uno o más impulsores aceleran el gas; la energía cinética adquirida se transforma en presión en un difusor corriente abajo. El flujo es radial.

- Compresores axiales: son máquinas en las cuales el gas se acelera y desacelera por la acción conjunta de paletas móviles montadas sobre un rotor y paletas fijas montadas sobre un estator; este cambio continuo de momento genera un aumento en la presión. El flujo principal es axial.
- Compresores de flujo mixto: son máquinas con un impulsor que combina características de los tipos centrífugo y axial.
- Eyectores: son aparatos que se valen de un chorro de gas o vapor a alta velocidad para arrastrar hacia su interior al gas que se quiere comprimir; un difusor localizado corriente abajo convierte la velocidad de la mezcla en presión.

2.1.4. Distribución de aire comprimido

El objetivo del sistema de distribución es llevar el aire comprimido a los puntos donde lo requieren los usuarios finales, lo cual debe ser realizado con una caída de presión mínima. En relación con este punto, se tiene que usualmente la presión de operación de un compresor para aire comprimido es de 100 psi (7 bar), pero la presión óptima de operación de las herramientas y dispositivos neumáticos es de unos 90 psi, lo que indica que en estos casos la caída de presión del sistema sea de unos 10 psi.

Con frecuencia se toma esta caída de presión como el valor máximo de diseño de un sistema de distribución. Esta caída incluye la generada debido a la presión que se tiene en los accesorios y equipos de usuarios finales.

El diseño del sistema de distribución requiere, tomar en cuenta la posibilidad de expansión futura, que incide principalmente en el

dimensionamiento de los cabezales de distribución y el tanque de almacenamiento.

Ante la posibilidad de que se arrastre agua o aceite en exceso las tuberías horizontales deberán contar con una ligera pendiente aguas abajo para facilitar el desalojo de esas sustancias, contando además con trampas para la purga del sistema; para evitar estos problemas, las tomas de aire en tuberías verticales que descienden, deberán hacerse por la parte superior. Se debe garantizar que el sistema en general produzca una buena distribución de aire, independientemente de si todos los usuarios finales demandan aire o no.

En general, una instalación de aire comprimido de tipo industrial está conformado por siete dispositivos; filtro del compresor, compresor, posenfriador, tanque de almacenamiento, filtros en línea, secadores, aplicaciones con sus purgas, unidades de mantenimiento y secadores adicionales. Los dispositivos que pueden variar son los secadores y los secadores adicionales; no se refiere a los tipos sino a que pueden no ser necesarios, ya que hay aplicaciones que requieren el aire tal y como ingresa al compresor, es decir, con cierto grado de humedad.

2.1.4.1. Tipos de sistema de distribución

Los parámetros clave que deciden en una instalación de aire comprimido según Enrique Carnicer (1991):

- Presión: la presión a la cual se desea trabajar, tanto para el caudal de aire entregado por el compresor como para el de utilización en la red.

- Caudal: el caudal de aire comprimido a suministrar por el compresor, así como el que debe circular por cada ramal de distribución.
- Pérdida de presión: la pérdida de presión o caída de presión se refiere a la pérdida de energía que se va originando en el aire comprimido ante los diferentes obstáculos que encuentra en su desplazamiento, hacia los puntos de utilización. El conseguir que la pérdida de presión esté entre los límites permisibles es fundamental al momento de concebir una instalación de aire comprimido.
- Velocidad de circulación: también existe límite para la velocidad del aire, ya que en cuanto mayor es la velocidad de circulación, tanto mayor es la pérdida de presión en el recorrido hasta el punto de aplicación.

2.1.4.1.1. Sistema ramificado

En este tipo a partir del cabezal principal, se generan los ramales secundarios hacia los distintos puntos de consumo. En esencia, es igual a un sistema de ductos de distribución de aire acondicionado. Como desventaja inherente a este tipo de sistemas, está el desbalanceo de la carga que causa una mala distribución de aire, por lo que será necesario tomar en cuenta este efecto para diseñar con mayor cuidado el tamaño de las líneas de distribución. La caída total de presión del sistema se determina tomando en cuenta el más alejado de consumo.

2.1.4.1.2. Sistema en anillo

En este, a partir del cabezal principal, para el suministro de aire a los usuarios finales se utiliza uno o varios lazos cerrados, con lo que se garantiza

que la presión en los diversos puntos de consumo será más uniforme en cualquier condición de carga del sistema, al provenir el aire para cada equipo o herramienta desde dos puntos.

Evidentemente se incrementa la cantidad de tubería y se disminuye la capacidad de cada línea, lo que produce caídas de presión más bajas.

2.1.4.1.3. Red cerrada

En la red cerrada con interconexiones hay un circuito cerrado, que permite trabajar en cualquier sitio con aire, mediante las conexiones longitudinales y transversales de la tubería de aire comprimido. Ciertas tuberías de aire comprimido pueden ser bloqueadas mediante válvulas de cierre si no se necesitan o si hay que separarlas para efectuar reparaciones y trabajos de mantenimiento.

2.2. Ahorro de energía

El ahorro de la energía en todas sus manifestaciones, en los últimos años ha jugado un papel de suma importancia dentro del desarrollo de la humanidad. Sin embargo, en Centro América, los índices energéticos (producción entre unidad de energía), siguen siendo altos comparados con los respectivos valores de los países altamente industrializados; el mejorar estos índices depende de aprovechar al máximo la energía que se requiere en los procesos de producción.

Probablemente la parte de mayor importancia para el ahorro de energía sea el diagnóstico energético, puesto que de la certeza y atención en que sea desarrollado, dependerá el éxito de las acciones que posteriormente sean

emprendidas. Por el contrario, el pretender ahorrar energía sin haber pasado antes por un diagnóstico energético suele llevar a fracasos.

En este capítulo serán proporcionados los elementos necesarios para desarrollar diagnósticos energéticos en diversas instalaciones.

La administración de la energía en cualquiera de sus manifestaciones, repercute directamente en los costos de producción, el proceso de administración de los recursos energéticos, consiste en la aplicación de las diversas técnicas que permitan alcanzar la máxima eficiencia en el uso de estos; es decir, utilizar de manera óptima y adecuada cada oportunidad en la planta industrial, en el caso actual el sistema de aire comprimido de la empresa.

2.2.1. Etapas del diagnóstico energético

Es importante para realizar un diagnóstico energético seguir una metodología bien estructurada. A continuación se presenta un lista de pasos que ejemplifica la manera más adecuada para diagnosticar los problemas de consumo excesivo de energía en una empresa.

2.2.1.1. Dirección

Consiste en delegar la autoridad necesaria a un responsable que promueva e impulse el uso racional y eficiente de la energía dentro de la empresa y comunidad que en ella labora. Se deben definir los mecanismos de supervisión y los medios de comunicación como los componentes esenciales del programa.

2.2.1.2. Diagnóstico

Se refiere a la etapa fundamental de la gestión energética, implica el análisis histórico del uso de energía relacionado con los niveles de producción y el estudio detallado de las condiciones de diseño y operación de los equipos, sistemas y procesos involucrados en la actividad industrial o empresarial. El diagnóstico energético debe proponer las acciones y medidas correctivas que han de aplicarse para superar las condiciones actuales de operación, establece la factibilidad técnica y económica de realizarlas, así como la evaluación económica de las mismas, determinando los parámetros de rentabilidad de cada acción.

2.2.1.3. Planeación

Consiste en elegir la alternativa concreta de acción a seguir, las políticas en materia de energía, el tiempo de ejecución, el logro de objetivos y, por último, se determina el monto de recursos financieros para la aplicación del programa.

2.2.1.4. Organización

En esta etapa se define la estructura que permita instrumentar el programa establecido. Aquí es necesario especificar las funciones de todos los grupos e individuos que participen en el programa de ahorro de energía.

2.2.1.5. Integración

Consiste en elegir a la persona o grupos de personas que van a ser los responsables de la ejecución del programa, así como la adquisición de la

instrumentación y el equipo necesario para la realización del diagnóstico y monitorear los avances del programa.

2.2.1.6. Control

En esta etapa se establecen normas de consumo de energía, de mantenimiento y de operación, así como el método que permita dar seguimiento permanente al programa. Todo ello, mediante monitoreo a través de un sistema integral de información energética y listas de verificación de la aplicación de medidas de ahorro.

2.2.2. Tipos de diagnóstico energético

Los diagnósticos energéticos permiten determinar con el balance de energía, los principales equipos consumidores de energía. A través de los diagnósticos, se identifican los puntos del proceso de mayor uso de energía, haciendo resaltar aquellos donde esta se desperdicia y donde es posible generar un ahorro (potenciales de ahorro de energía).

En resumen, los objetivos principales de un diagnóstico energético son: establecer metas de ahorro de energía, diseñar y aplicar sistemas integrales para el ahorro de energía, evaluar técnica y económicamente las medidas de ahorro de energía, disminuir el consumo de energía sin afectar negativamente los niveles y condiciones de producción.

2.2.2.1. Diagnóstico de nivel básico

Se lleva a cabo mediante un examen visual del proceso industrial o instalación de que se trate, reconociendo y revisando el diseño original de los

equipos consumidores de energía, para dar una idea de los potenciales de ahorro de energía que se pueden lograr por modificación en los hábitos de operación, corrección de desperdicios o por la incorporación de tecnología eficiente. De este diagnóstico se pueden obtener buenas recomendaciones a nivel general. Por ejemplo, fugas de energía, mala operación de los equipos o instrumentos, equipos que pueden reemplazarse por otros más eficientes, como motores, compresores, luces, etc.

2.2.2.2. Diagnóstico de nivel fundamental

Proporciona información sobre el consumo de energía tanto eléctrica como térmica, por áreas funcionales o procesos específicos de operación; es decir se detectan los subsistemas de mayor desperdicio energético. Este nivel provee datos acerca del ahorro de energía y en consecuencia de reducción de costos, como consecuencia de su realización se obtiene una cartera de proyectos de aplicación, logrando de esta forma dirigir el camino de las metas para ahorro energético.

Es el más útil para conocer los potenciales de ahorro de energía de una instalación. Estos se cualifican y cuantifican. Se analiza entre el 75 y 80% de los consumidores energéticos, dando prioridad a los de potencia superior y mayor tiempo de utilización.

2.2.2.3. Diagnóstico de tercer nivel

Proporciona información precisa y comprensible de todos y cada uno de los puntos relevantes del diagrama del proceso industrial o cualquier instalación a evaluar, así como las pérdidas de energía de cada uno de los equipos involucrados. Este nivel está caracterizado por instrumentación extensiva, por la

adquisición de datos y por los estudios de ingeniería involucrada; se aclara que muchas de las acciones propuestas para lograr ahorro de energía son producto de reingeniería de los procesos.

Este tipo de diagnóstico es llamado microdiagnóstico, ya que se profundiza en el proceso y equipos involucrados en este. Requiere la participación de especialistas particulares para definir aplicaciones complejas.

2.2.3. Metodología para realizar un diagnóstico energético

La metodología para un diagnóstico energético no está siempre definida, sin embargo, los puntos estratégicos para determinar los potenciales de ahorro de energía pueden ser los siguientes.

2.2.3.1. Trabajos previos

En este primer punto de la metodología se realiza principalmente la elaboración de la estrategia de trabajo. En virtud del tipo de instalación a diagnosticar, se recopila la información. Adicionalmente, se hace la recopilación del entorno en el que se elabora el diagnóstico. Se obtienen los costos de las tarifas eléctricas.

2.2.3.2. Recopilación de la información

Esta es la etapa más importante del trabajo, puesto que el éxito del proyecto tendrá como primer antecedente el desarrollo de una ingeniería de campo confiable, que cualifique y cuantifique la distribución de la energía en la instalación. Durante el desarrollo de esta etapa se recopilará la información por

equipos. Además se realizarán las mediciones que sean necesarias para la evaluación. Se hará acopio de planos, listados, estadísticas etc., con que cuente la empresa, tales como:

- Diagramas de distribución de aire comprimido
- Listado de equipos principales
- Costumbres de operación de la instalación, área, proceso, equipo
- Recibos eléctricos

2.2.3.3. Evaluación del estado energético

Con la información obtenida de las etapas I y II, y los métodos de balance seleccionados en la etapa I, se procederá a realizar la evaluación del funcionamiento energético de los sistemas y equipos. En una primera etapa se analizará el comportamiento histórico del consumo de energía de la empresa y su relación con la producción de la misma. Así se determinarán los índices energéticos actuales de la empresa.

2.2.3.4. Determinación del potencial de ahorro

De acuerdo con la tarea realizada en el inciso anterior, quedarán determinados los focos de pérdidas de mayor contribución a escala energética. Para minimizar el consumo de energía se evaluarán los potenciales de ahorro de energía, primero por la aplicación de medidas administrativas y prácticas operacionales. Segundo por prácticas eficientes y programas de mantenimiento. Se detectarán aquellas actividades que por ajuste a los equipos, tiendan a aprovechar adecuadamente la energía y por la aplicación de alternativas tecnológicas.

2.2.3.5. Evaluación económica de las medidas

Esta etapa se realizará mediante las siguientes actividades: se hará la conversión de las cantidades determinadas como ahorros de energía a su equivalente económico en quetzales. En la primera fase de este punto se contemplan exclusivamente medidas de ajuste y corrección a los sistemas de las instalaciones, ya que los resultados son importantes en el inmediato y corto plazo. En una segunda fase evaluarán económicamente los ahorros derivados por la incorporación de aditamentos para el ahorro de energía.

2.2.3.6. Selección de las medidas a implementar

En esta etapa se realizará la clasificación jerárquica de los proyectos sobre la base del tiempo de recuperación y tasa interna de retorno. El tiempo de recuperación es una medida de liquidez que no vislumbra la verdadera rentabilidad de los proyectos. La tasa interna de retorno mide la rentabilidad de los proyectos, que puede ser comparada contra la tasa mínima atractiva de la misma empresa, la tasa que generan otros proyectos de inversión, y el valor del dinero de los mercados financieros.

2.2.3.7. Aplicación de las acciones

Finalmente, ya determinados los potenciales de ahorro y evaluados desde el punto de vista energético y monetario, es decir, ahorro de energía y económico estimado por medida de ahorro y la inversión requerida para llevar a cabo dicha acción, el paso que sigue es implementar las medidas que sean más atractivas y que cumplan con las expectativas y políticas de la empresa.

2.2.4. Diagnóstico energético en aire comprimido

El nivel de diagnóstico energético no es estricto; en muchos casos se puede aplicar un nivel para una parte o etapa del proceso, los procedimientos utilizados se dejan a criterio del analista siempre que se demuestre su validez; por tal razón se seleccionó el sistema neumático de Durman Esquivel Guatemala; aún así el procedimiento para llevar a cabo un diagnóstico energético del resto de departamentos en la empresa es el mismo y se puede realizar en caso de que se deseara.

El aire comprimido ha experimentado en estos últimos tiempos un auge, debido a su alto poder de adaptación a cualquier sistema de trabajo organizado, siendo evidente que sus cualidades lo hacen recomendable para ejecutar labores que difícilmente pueden cubrir otras energías que carezcan de flexibilidad que lleva implícito este fluido, ya que puede fácilmente actuar en circuitos de potencia como en el control de máquinas más especializadas.

El aire comprimido es un alto consumidor de energía y normalmente es olvidado en los programas de ahorro de energía de las industrias. De hecho, el sistema de aire comprimido representa cerca del 15% de la energía que usa el sector industrial; sin embargo, en muchas industrias puede ser el mayor consumidor de energía debido a la falta de atención.

Es posible ahorrar energía en aire comprimido. Los proyectos de ahorro de energía han demostrado que existe un buen potencial de ahorro, dado que la gran mayoría de las industrias poseen equipos, redes, tuberías, y aditamentos que no han sido concebidos con criterio ahorrador. El ahorro de energía en los sistemas de aire comprimido analiza los siguientes factores como las causas principales de pérdida:

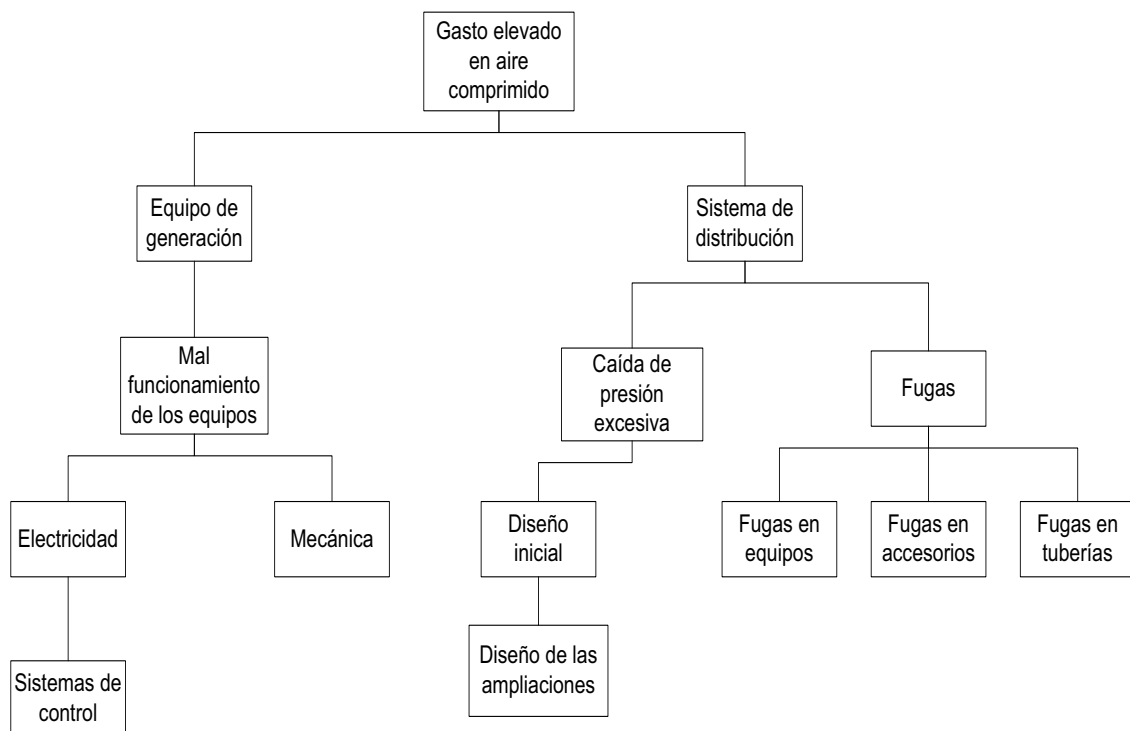
- Disminución de fugas
- Almacenamiento
- Sistema de distribución
 - Líneas principales de distribución
 - Líneas secundarias
 - Líneas de servicio
- Caídas de presión
- Control del compresor

El término mejorar la eficiencia energética de una planta o alguna sección de la misma puede sonar un tanto complicado y aunque requiere de conocimientos extensos, en este caso de aire comprimido, todo se reduce al diseño original del sistema y cómo se le ha modificado con las nuevas demandas que se han presentado.

3. AHORRO DE ENERGÍA EN AIRE COMPRIMIDO

Los problemas que se pueden tener en el sistema de aire comprimido en la empresa Durman Esquivel, Guatemala, se plantean por medio de un árbol de fallas; con la ayuda de la observación y la recopilación de datos, se realizó un diagrama que muestra las áreas de oportunidad para el caso específico del sistema neumático de la empresa. En la figura 12 se muestran las posibles causas del consumo excesivo de energía eléctrica en aire comprimido.

Figura 12. **Árbol de fallas del sistema neumático**



Fuente: elaboración propia.

3.1. Sistema de aire comprimido Durman Esquivel

El aire comprimido es uno de los servicios que con mayor frecuencia utiliza el sector industrial. Es empleado como fluido de limpieza, refrigerante, elemento transportador, activador de herramientas neumáticas y de diversos sistemas de control; además, puede mezclarse con varios productos y resulta indispensable en infinidad de maquinaria.

Un sistema de aire comprimido se divide en dos partes: la generación y la demanda. Del lado de la generación se encontrará el compresor, motor del compresor, equipo de tratamiento de aire como filtros, enfriadores, secadores, tanques de almacenamiento, etc. Por el lado de la demanda, se encuentran las líneas de distribución, mangueras y el equipo neumático.

El sistema neumático en la empresa Durman Esquivel, Guatemala, es utilizado ampliamente a través de todo el proceso productivo; es entonces importante conocer este proceso a grandes rasgos y profundizar en las áreas que sea necesario, para detallar las características relevantes al tema de ahorro de energía en la generación, distribución y consumo de aire en sistemas de aire a alta presión.

El sistema de aire comprimido a grandes rasgos en Durman Esquivel, Guatemala, está compuesto por cuatro compresores de tornillo, alimentados por cuatro motores eléctricos de alta eficiencia. El fluido es pasado a través de secadores de aire y llevado a tanques de almacenamiento por medio de un múltiple de admisión. Posteriormente el aire sale de los tanques de almacenamiento hacia los diferentes puntos de uso, el sistema de distribución cuenta con tubería de diferentes tamaños de diámetro y dispositivos de purga automática.

La tubería de servicio para la maquinaria en la empresa tiene ramificaciones en forma de cuello de cisne y la presión media de servicio es de 100 psi. Los siguientes incisos explican a detalle cada parte del sistema neumático.

3.1.1. Generación de aire comprimido

El sistema de aire comprimido en Durman Esquivel, acciona una cantidad considerable de mecanismos en cada una de las etapas mencionadas anteriormente. Para que el sistema sea alimentado, el aire debe pasar por un tratamiento previo. El primer paso es la captación y compresión del fluido; el aire comprimido no es otra cosa que el mismo aire en las condiciones de presión y temperatura reinantes en el ambiente, atrapado en un mecanismo donde se incrementa su presión por medio de la reducción de volumen a través de un proceso mecánico. La máquina que realiza este trabajo es conocida como compresor y su funcionamiento fue explicado en el capítulo 2, del presente informe.

La captación de aire comprimido en Durman Esquivel cuenta con cuatro compresores de desplazamiento positivo del tipo tornillo rotativo, utilizados para incrementar la presión del fluido que en el caso de la empresa está funcionando con un valor medio de servicio de 100 libras por pulgada cuadrada (psi). El equipo de compresión es alimentado por motores eléctricos trifásicos del tipo jaula de ardilla.

Los datos de funcionamiento de los compresores y sus respectivos motores eléctricos fueron recolectados y luego tabulados para su mejor comprensión.

3.1.1.1. Compresores

Los compresores en Durman Esquivel son de tornillo rotativo, esto quiere decir que son máquinas que producen aire comprimido por un procedimiento rotatorio y continuo, es decir, que empujan el aire desde la aspiración hacia la descarga, comprimiéndolo.

Según datos del fabricante, los compresores de Durman Esquivel son de una etapa tipo rotativo a tornillo asimétrico, aptos para servicio continuo, lubricados y enfriados por aceite a presión. Estos compresores funcionan a 135 psi de presión máxima de trabajo. Estas máquinas poseen un sistema de regulación por modulación y carga-descarga (ambos incorporados) controlado por un microprocesador, incluyendo la lectura de los parámetros operativos, alarmas y protecciones del equipo. Estos compresores son estacionarios y se caracterizan por tener un muy bajo nivel sonoro. Los compresores Sullair son estacionarios, compactos, de fácil instalación y mantenimiento.

En la tabla I se puede apreciar la información técnica de cada uno de los compresores que se encuentran en el cuarto de máquinas de la empresa.

Tabla I. **Datos técnicos de compresores**

Compresor	Marca	Modelo	Potencia (Hp)	$\frac{\text{pies}^3}{\text{min}}$ (CFM)	P trabajo (psi)	P máxima (psi)
1	Sullair	FS2830	30	135	125	135
2	Sullair	ES1140				
3	Sullair	2209/A				
4	Sullair	ES	40	150		

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Compresor de tornillo**



Fuente: equipo de la empresa Durman Esquivel.

3.1.1.2. Motores eléctricos

Los motores de corriente alterna son aquellas máquinas que convierten energía eléctrica en energía mecánica. Los motores eléctricos son máquinas cuya corriente de campo magnético se suministra por medio del fenómeno conocido como inducción. Para el accionamiento de los compresores se necesita de este tipo de máquinas y en Durman Esquivel se dispone de los motores que se describen en la tabla II.

Por medio de un acople directo se conectan los ejes de los motores eléctricos a los ejes de los compresores de tornillo, a través de este acople se hace girar el tornillo del compresor de manera continua, para generar la compresión del aire.

Tabla II. **Datos técnicos de motores eléctricos**

Motor eléctrico	Marca	Modelo	Potencia (Hp)	Velocidad angular (RPM)	Voltaje	Corriente
1	Toshiba	0025004317R02	30	3 540	460	70/35
2	Toshiba	0025004317R02				
3	Toshiba	0025004317R02				
4	Toshiba	02250043177R00	40	1 770		94/17

Fuente: elaboración propia.

3.1.1.3. Secadores de aire

El aire atmosférico contiene humedad en forma de vapor de agua y según las condiciones en las que actúa; este vapor puede o no condensarse en gotas líquidas. En el proceso de compresión de Durman Esquivel, el aire aspirado por el compresor de tornillo es enviado a un equipo denominado secador de aire; en esta máquina el fluido comprimido se enfría considerablemente con la finalidad de condensar y retirar una fracción grande del vapor de agua contenido en el mismo. Para que en la instalación neumática no aparezca ninguna cantidad de agua, el aire comprimido, antes de ser distribuido a la red, debe haberse secado hasta un punto de rocío que sea inferior a la temperatura del aire ambiente en donde se utiliza.

La selección de los aparatos encargados del secado de aire, es entonces de vital importancia para el funcionamiento eficiente de un sistema de aire comprimido. Los datos técnicos fueron obtenidos de las placas encontradas en los equipos de secado de aire; los valores de trabajo son los que se describen en la tabla que aparece a continuación.

Tabla III. **Datos técnicos de secadores de aire**

Secador	Marca	Modelo	CFM	Presión de trabajo	Presión máxima
1	Sullair	SRD-300	300	100 psi	150 psi
2	Sullair	SR175	175	-----	170 psi

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Almacenamiento de aire comprimido

La capacidad de almacenamiento de aire en un sistema tiene como función principal absorber las fluctuaciones causadas por la demanda y controlar los períodos de trabajo de los compresores, por lo que el tamaño adecuado es muy importante. Se debe analizar la posibilidad de aprovechar en forma efectiva los tanques de almacenamiento de aire. Una reserva de aire siempre disponible permite contar con el fluido comprimido en lugar de demandar potencia de los compresores.

El aire comprimido debe ser almacenado para su posterior uso, por lo que se procede a verificar la capacidad volumétrica de los tanques que actualmente posee Durman Esquivel, al salir del colector de admisión, el aire se dirige a dos contenedores, cada uno con volumen diferente.

El primer tanque, el más pequeño, posee las siguientes características que ayudarán a determinar la capacidad de almacenaje, el depósito tiene forma cilíndrica y en cada uno de los extremos posee cascos esféricos; el diámetro del cilindro es de 50,9 centímetros, con una altura de 142 centímetros y las secciones esféricas sobresalen de los extremos del cilindro 10 centímetros.

El dato de la capacidad de almacenaje en la empresa actualmente es desconocido, por lo que se describe el método de cálculo utilizado para obtener dicho dato.

3.1.2.1. Funciones del tanque de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento son componentes muy importantes en el sistema de aire comprimido, ya que cumplen con las funciones que se exponen a continuación:

- Amortiguar las pulsaciones del caudal de aire salido de los compresores alternativos.
- Proporcionan capacidad de almacenamiento que sirve para evitar que los ciclos de operación de un compresor sean muy cortos, con lo que se reduce el desgaste y uso del compresor, ya que el compresor al estar más tiempo en modo de descarga, es decir trabajando en vacío, se logrará obtener el máximo de ahorro energético en función de poder sacar de operación a los compresores.
- Hacer frente a las demandas pico de caudal sin que se provoquen caídas de presión.
- Adaptar el caudal de salida del compresor al consumo de aire de la red.

3.1.2.2. Tiempo de almacenamiento

Es importante contar con un almacenamiento adecuado del aire comprimido; este ayudará a cubrir los picos de demanda. Los tanques del sistema neumático deben estar preparados para cubrir la demanda de la planta como mínimo un minuto, funcionando a una presión de 100 psi, en el caso de Durman Esquivel.

El tanque de aire comprimido proporciona capacidad de almacenamiento que sirve para evitar que los ciclos de operación de un compresor sean muy cortos, con lo que se reduce el desgaste y uso del compresor.

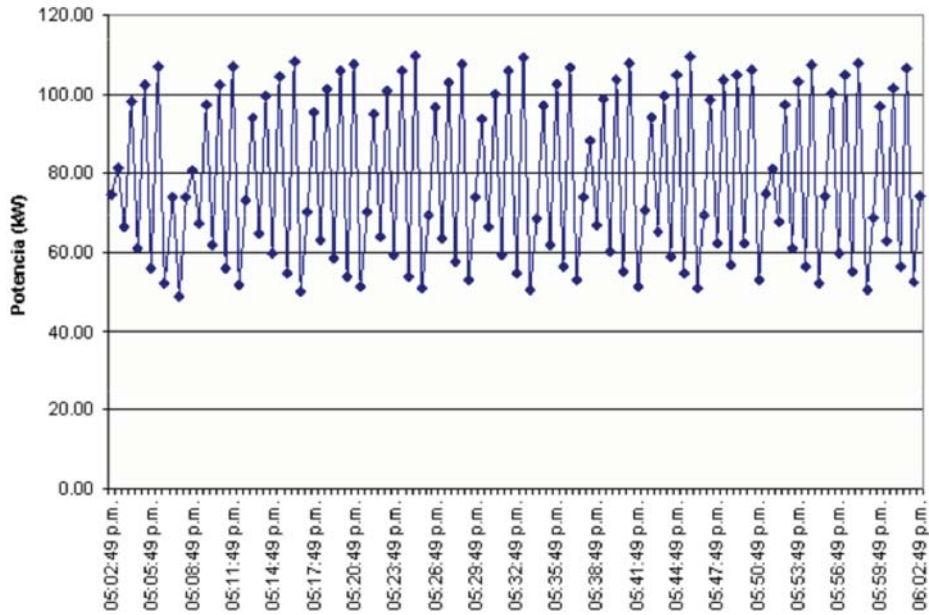
Demandas altas durante lapsos cortos o demandas instantáneas pueden ser satisfechas por aire almacenado. Muchos sistemas pueden necesitar más de un tanque de almacenamiento que de un compresor adicional.

Sin tanques de almacenamiento el compresor funcionará de manera continua o casi continua, siempre que exista un valor de demanda tal que evite que alcance la presión máxima de descarga que produce el compresor.

En la figura 18 se muestra cómo opera un arreglo de compresores que no cuenta con el tanque de almacenamiento adecuado.

En la gráfica los picos hacia arriba representan el momento cuando el compresor está trabajando con carga; es decir, comprimiendo y entregando aire; en los picos hacia abajo, el compresor está trabajando en vacío, es decir, está comprimiendo pero no entregando aire.

Figura 14. Operación de un compresor



Fuente: FIDE. Curso taller sobre promotores de ahorro y eficiencia de energía eléctrica.

3.1.2.3. Volumen total de depósitos

El volumen total de los tanques es la suma del volumen del cilindro más dos veces el volumen del casco esférico, para cada uno de los depósitos encontrados en la empresa.

$$V_T = (V_C + 2V_E)_1 + (V_C + 2V_E)_2$$

Donde:

V_T = volumen total

V_C = volumen del cilindro

V_E = volumen del casco esférico

El volumen del cilindro está definido por el área del círculo que es la multiplicación del cuadrado del radio del círculo por el número π y finalmente multiplicado por su altura.

$$V_C = \pi * r^2 * h$$

Donde:

$$\pi = 3,141592$$

r = radio de la circunferencia

h = altura del cilindro

La fórmula para el primer cilindro resulta:

$$V_C = \pi * (25,45)^2 * 142 = 288\,944,07 \text{ cm}^3$$

El volumen de un casco esférico se obtiene de una serie de relaciones matemáticas que resulta de la siguiente manera.

$$V_E = \frac{\pi h}{6} \times (3a^2 - h^2)$$

Donde:

h = altura del extremo del cilindro hasta el punto más alto del casco

a = radio del cilindro

La fórmula para el casco del cilindro resulta:

$$V_E = \frac{\pi * (10)}{6} \times (3 * 25,45^2 - 10^2) = 9\,650,49 \text{ cm}^3$$

Usando la ecuación para el volumen total de cilindros se obtiene el siguiente resultado.

$$V_T = 288\,944,07 + 2 * 9\,650,49 = 308\,245,05 \text{ cm}^3$$

El segundo tanque tiene la misma forma que el primero, pero con dimensiones diferentes. El diámetro del segundo cilindro es de 101,8 centímetros; su altura es de 142 centímetros y la distancia que sobresale el casco esférico es de 20 centímetros. Usando el procedimiento descrito anteriormente, se obtiene que el volumen total del segundo cilindro es 1 232 980,20 centímetros cúbicos.

Las especificaciones de los tanques se detallan en dimensionales del sistema internacional de medidas; para los fines del presente trabajo se utilizarán dimensionales del sistema inglés, como se muestra a continuación.

Tabla IV. **Tanques de almacenamiento**

	Tanque 1			Tanque 2		
	Altura (pies)	Radio (pulgadas)	Pies cúbicos	Altura (pies)	Radio (pulgadas)	Pies cúbicos
Cilindro	4,66	10	10,2	4,66	20	40,81
Cascos	0,33	10	0,68	0,66	20	5,46
		Volumen	10,88		Volumen	46,27

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Tanques de almacenamiento**



Fuente: equipo de la empresa Durman Esquivel.

3.1.2.4. Capacidad del tanque de almacenamiento

En el caso de Durman Esquivel, debido a que la empresa cuenta con compresores del tipo tornillo rotativo y estos son muy eficientes, ya que no es usual que tengan que cubrir demandas pico, se concluye que el tamaño de tanque es suficiente.

Este tipo de compresores tiene una regulación interna por lo que el motor permanece encendido, el arranque y paro para el llenado de tanques no es una preocupación, como en el caso de los compresores de émbolo recíprocante.

3.1.3. Distribución de aire comprimido

El medio de conducción y distribución de los fluidos a presión son las tuberías y los ductos, limitándose el uso de los últimos a transportar humos y aire caliente o frío a baja presión. Las tuberías se emplean para transportar fluidos a presiones significativas que causan esfuerzos de trabajo sobre las paredes, como el caso de Durman Esquivel.

La adecuada disposición de tuberías tiene como fin reducir al mínimo las resistencias por fricción. La instalación de los diferentes equipos interconectados por tuberías debe considerarse desde el punto de vista de facilidad de acceso y de trabajo.

El cuarto de compresores en Durman Esquivel se encuentra ubicado estratégicamente para que el siguiente paso en la compresión de aire sea más sencillo. La distribución de un sistema neumático tiene como objetivo transportar el aire comprimido desde el tanque de almacenamiento hasta la herramienta o cualquier otro tipo de equipo neumático; con una pérdida de carga limitada.

Para el transporte de aire comprimido desde la central de compresores hasta los lugares de utilización, se emplea una red de conducciones conocidas bajo el nombre de sistema ramificado.

Es importante considerar que la red de tuberías posee una gran cantidad de accesorios que le añaden una longitud extra; es por este motivo que a continuación se presenta una tabla que ayudará a obtener la longitud a la que equivale determinado accesorio instalado en un sistema neumático.

Tabla V. Longitud equivalente de accesorios

Tipo de accesorio	Tamaño nominal de la tubeía (pulgadas)						
	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2
Codo	1,55	2,06	2,62	3,45	4,02	5,17	6,16
Válvula de compuerta	0,36	0,48	0,61	0,81	0,94	1,21	1,4
Válvula de ángulo	8,65	11,4	14,6	19,1	22,4	28,7	34,3
Válvula de globo	17,3	22,9	29,1	38,3	44,7	57,4	68,5
Tee	0,62	0,82	1,05	1,38	1,61	2,07	2,47

Fuente: CARNICER, E. Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones. p. 300.

3.1.3.1. Tubería principal

La instalación actual del sistema de aire comprimido es adecuada en lo que respecta a los materiales y accesorios utilizados; sin embargo el mantenimiento de los equipos y de las instalaciones tiene muchas áreas de oportunidad en las cuales se puede mejorar; en la figura 12, al principio de este capítulo, se muestran los potenciales de ahorro, la tubería aparentemente está en buen estado, pero mediante una observación más detallada, se pueden encontrar una gran cantidad de fugas. El rediseño de las tuberías para las ampliaciones que se han dado es también un aspecto que se debe tomar en consideración.

El conjunto de compresores descrito anteriormente se encuentra conectado por tubería de una pulgada y media (1,5") de diámetro.

La red utiliza una serie de accesorios como codos, tees, válvulas y uniones para hacer que los cuatro compresores envíen el fluido hacia los dos secadores de aire y luego converjan en un colector conocido como múltiple de admisión que posteriormente envía el aire hacia los tanques de almacenamiento que fueron descritos anteriormente de manera más detallada.

Figura 16. **Múltiple de admisión**



Fuente: instalaciones de Durman Esquivel, Guatemala.

Se contabilizó el número de accesorios en la tubería dentro del cuarto de compresores y se calculó la longitud equivalente que representa cada uno de los accesorios. Se debe hacer la observación que a la sumatoria de longitudes equivalentes de accesorios se le tiene que añadir la longitud real de las tuberías; este dato fue conseguido utilizando una cinta métrica y se obtuvo un total de 84,24 pies. A continuación se presentan los datos tabulados.

Tabla VI. **Tubería de una pulgada y media**

Accesorios	Cantidad	Longitud equivalente (ft)	Total
Codos	22	4,02	88,44
Tees	10	1,61	16,1
Uniones Universales	20	0,01	0,2
Válvulas de compuerta	21	0,94	19,74
Total	73	6,58	124,48

Fuente: elaboración propia.

El aire comprimido fluye fuera del cuarto de compresores y se divide en dos circuitos neumáticos principales, llevando el fluido por medio de tubería de dos pulgadas de diámetro; el primer circuito alimenta cuatro silos de materia virgen, las tolvas del área de mezclado y tres silos de compuesto, para posteriormente mandar el compuesto al área de extrusión donde serán fabricados los distintos productos que Durman Esquivel ofrece.

Tabla VII. **Tubería de dos pulgadas**

Accesorio	Cantidad	Longitud equivalente	Total
Codos 90	5	5,17	25,85
Tees	27	2,07	55,89
Uniones universales	8	1,5	12,00
Reductores	2	1,55	3,10
Válvulas de globo	4	57,4	229,6
Válvulas de compuerta	2	1,21	2,42
Total	48	68,9	328,86

Fuente: elaboración propia.

3.1.3.2. Tuberías secundarias y de servicio

Las ramificaciones que surgen del primer circuito usan tubos de una pulgada y de media pulgada para alimentar los distintos dispositivos. El segundo circuito suministra aire al área donde se lleva a cabo el proceso productivo; el detalle de la tubería utilizada por ambos circuitos se presenta en las siguientes tablas, elaboradas para tener mejor control sobre la cantidad de accesorios instalados en el sistema.

Tabla VIII. Tubería de una pulgada

Accesorios	Cantidad	Longitud equivalente	Total
Codos	21	2.62	55,02
Tees	4	1.05	4,20
Válvulas de compuerta	7	0.61	4,27
Total	32	4.28	63,49

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Tubería de media pulgada

Accesorios	Cantidad	Longitud equivalente	Total
Codos	21	1,55	32,55
Tees	5	0,62	3,10
Válvulas de compuerta	7	0,36	2,52
Total	33	2,53	38,17

Fuente: elaboración propia.

Las derivaciones del sistema que alimentan al equipo de producción directamente usan tubos de tres cuartos de pulgada y tienen incorporado un

cuello de cisne para el control de humedad localizado; la tabla X muestra el número total de accesorios por línea de producción.

Tabla X. **Tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada**

Accesorio	CANTIDAD								Suma	Longitud equivalente	Total
	T-8	T-1	T-16	T-12	T-10	T-14	T-20	T-18			
Codo	21	24	21	21	23	21	22	25	178	2,06	366,68
Tee	6	9	6	6	10	8	6	8	59	0,82	48,38
Válvula	7	6	9	8	9	7	8	9	63	0,48	30,24
Total	34	39	36	35	42	36	36	42	300	3,36	445,30

Fuente: elaboración propia.

3.1.4. **Tamaño del sistema de distribución**

Cuando se transporta un fluido a través de una tubería, se origina, inevitablemente una pérdida de presión, que se traduce en consumo de energía y por lo tanto en un aumento de los costos de energía eléctrica. La disminución de presión es causada por el rozamiento en los tubos rectos y por la oposición de las variaciones de dirección en los conductos, añadiendo las resistencias individuales de los accesorios. Las tuberías para aire comprimido deben estar ampliamente dimensionadas con la debida atención, preparando próximas ampliaciones.

3.1.4.1. **Longitud de tuberías principales**

Se denomina tubería principal a la línea de aire que sale del depósito y canaliza la totalidad del caudal de aire. Debe tener la mayor sección posible y prever un margen de seguridad en cuanto a posteriores crecimientos de planta.

Tabla XI. **Línea principal de aire**

No.	Descripción	Cantidad	Longitud (pies)	Longitud equivalente
1	Tubería	1	806,25	
2	Codos	22		4,02
3	Tees	10		1,61
4	Uniones universales	20		0,01
5	Válvula de compuerta	21		0,94
6	Longitud parcial		806,25	124,48
7	Longitud total			930,73

Fuente: elaboración propia.

3.1.4.2. Longitud de tuberías secundarias

Son las que toman el aire de la tubería principal, ramificándose por las zonas de trabajo, y de las cuales salen las tuberías de servicio. El caudal de aire que transportan será el correspondiente a la suma de los caudales parciales que de ella se deriven.

Tabla XII. **Línea secundaria de aire**

No.	Descripción	Cantidad	Longitud (pies)	Longitud equivalente (pies)
1	Tubería	1	310,00	
2	Codos	21		2,62
3	Tees	4		1,05
4	Válvula de compuerta	7		0,61
	Longitud parcial		310,00	38,17
	Longitud total			348,17

Fuente: elaboración propia.

3.1.4.3. Longitud de tuberías de servicio

Las tuberías de servicio, o bajantes son las que alimentan a las herramientas o equipos neumáticos en el punto de manipulación. Se requiere dimensionarlas conforme al número de salidas o tomas, procurando no colocar más de dos o tres acoplamientos rápidos en cada una de ellas.

Las tuberías demasiado pequeñas ocasionan altas velocidades de circulación de aire, haciendo difícil la separación por métodos mecánicos de las partículas contaminantes.

En Durman Esquivel estas tuberías alimentan a los equipos que contribuyen directamente a la producción tales como: tolvas, extrusoras, impresoras, jaladores, sierras y acampanadoras. Debido a que las tuberías de menor diámetro son en las que el fluido alcanza una mayor velocidad, es muy importante mantenerlas en buen estado.

Tabla XIII. Líneas de servicio de aire (3/4")

No.	Descripción	Cantidad	Longitud	Longitud equivalente
1	Tubería	1	868,50	
2	Codos	178		2,06
3	Tees	59		0,82
5	Válvula de compuerta	63		0,48
	Longitud parcial		868,50	445,30
	Longitud total			1 313,80

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Líneas de servicio de aire (1/2")**

No.	Descripción	Cantidad	Longitud (pies)	Longitud equivalente (pies)
1	Tubería	1	39,40	
2	Codos	21		1,55
3	Tees	5		0,62
5	Válvula de compuerta	7		0,36
	Longitud parcial		39,40	38,17
	Longitud total			77,57

Fuente: elaboración propia.

3.1.5. Consumo de aire comprimido

La demanda del sistema de aire comprimido se determina sumando el consumo promedio requerido por cada una de las herramientas y por la operación de cada proceso en toda la planta, tomando en cuenta factores de carga de cada uno de estos. Todo sistema puede presentar picos de demanda que se pueden satisfacer a través de tanques de almacenamiento; estos serán más efectivos si se localiza lo más cerca posible de dónde se requieran estas altas demandas.

Una evaluación cuidadosa de la demanda del sistema puede llevar a una adecuada estrategia de control a través de los tanques de almacenamiento, de tal manera que se pueda reducir la demanda global del conjunto de compresores del que se dispone.

En Durman Esquivel se cuenta con gran variedad de manuales de operación proporcionados por el fabricante de las diversas máquinas, para la estimación del consumo de aire comprimido en el sistema neumático se verificó

en el manual de cada una de las máquinas, sin embargo algunos equipos, debido a su antigüedad o a otras razones, no contaban con esta información fundamental para el diagnóstico del sistema, por lo que se tuvo que investigar métodos para calcular el dato experimentalmente.

Las máquinas como las sierras o las denominadas acampanadoras, contaban con sus datos de consumo, por lo que se procedió a tomar los datos proporcionados por el fabricante.

3.1.5.1. Consumo de aire en cilindros neumáticos

En el caso de otros equipos como las enrolladoras, los baños y la guillotina, se tuvo que seguir un procedimiento para calcular el requerimiento de los mismos. El consumo de aire puede calcularse conociendo el diámetro del cilindro, su carrera, el número de carreras y la presión de servicio.

$$Q = 2 \times (s \times n \times q)$$

Donde:

Q = consumo de aire en litros / minuto

q = consumo de aire por centímetro de carrera en litros / minuto

s = carrera en centímetros

n = número de carreras por minuto

Nótese que para el cálculo adecuado de esta ecuación se requiere de un dato denominado consumo de aire por centímetro de carrera, el cual puede ser encontrado en la tabla que se presenta a continuación.

Tabla XV. Consumo de aire para cilindros neumáticos

		Presión de trabajo en bar														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Diámetro cilindro, mm	Consumo de aire en litros por cm de carrera del cilindro															
	6	0.0005	0.0008	0.0011	0.0014	0.0016	0.0019	0.0022	0.0025	0.0027	0.0030	0.0033	0.0036	0.0038	0.0041	0.0044
12	0.002	0.003	0.004	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.018	
16	0.004	0.006	0.008	0.010	0.011	0.014	0.016	0.018	0.020	0.022	0.024	0.026	0.028	0.029	0.032	
25	0.010	0.014	0.019	0.024	0.029	0.033	0.038	0.043	0.048	0.052	0.057	0.062	0.067	0.071	0.076	
35	0.019	0.028	0.038	0.047	0.056	0.066	0.075	0.084	0.093	0.103	0.112	0.121	0.131	0.14	0.149	
40	0.025	0.037	0.049	0.061	0.073	0.085	0.097	0.110	0.122	0.135	0.146	0.157	0.171	0.183	0.195	
50	0.039	0.058	0.077	0.096	0.115	0.134	0.153	0.172	0.191	0.21	0.229	0.248	0.267	0.286	0.305	
70	0.076	0.113	0.150	0.187	0.225	0.262	0.299	0.335	0.374	0.411	0.448	0.485	0.523	0.56	0.597	
100	0.155	0.231	0.307	0.383	0.459	0.535	0.611	0.687	0.763	0.839	0.915	0.991	1.067	1.143	1.219	
140	0.303	0.452	0.601	0.750	0.899	1.048	1.197	1.346	1.495	1.644	1.793	1.942	2.091	2.240	2.389	
200	0.618	0.923	1.227	1.531	1.835	2.139	2.443	2.747	3.052	3.356	3.660	3.964	4.268	4.572	4.876	
250	0.966	1.441	1.916	2.392	2.867	3.342	3.817	4.292	4.768	5.243	5.718	6.193	6.668	7.144	7.619	

Fuente: CARNICER, Enrique. Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones. p. 256.

En seguida se ejemplificará el método utilizando datos recopilados en la empresa. Con fines didácticos se tomaron como ejemplo los cilindros neumáticos que se encuentran en el sistema de enfriamiento de cada una de las líneas de producción. Los baños cuentan con dos cilindros cada uno, los cuales son de doble efecto y tienen un diámetro de 63 milímetros con una carrera de 10 centímetros; estos dispositivos operan a una presión de 95 libras por pulgada cuadrada. El dato consumo de aire por centímetro de carrera se obtiene de la tabla XI a través de una interpolación, como se explicará a continuación.

Tabla XVI. **Interpolación para consumo de cilindros neumáticos**

Consumo de aire (litros/cm)	Diámetro del cilindro
0,153	50
q	63
0,299	70

Fuente: elaboración propia.

Aplicando la fórmula de interpolación:

$$q = \frac{(63 - 50) \times (0,299 - 0,153)}{70 - 50} + 0,153 = 0,2479 \text{ litros/centímetro de carrera}$$

La fórmula de consumo de aire resulta:

$$Q = 2 \times (10 \times 10 \times 0,2479) = 49,58 \text{ litros por minuto}$$

El consumo total del sistema de enfriamiento en unidades del sistema ingles es 3,5 pies cúbicos por minuto tomando en cuenta que por cada máquina se tienen 2 cilindros.

3.1.5.2. Consumo de aire en sopladores

En el proceso de recopilación de información se encontró el problema de cómo calcular el consumo de aire en máquinas que funcionan como sopladores, tal es el caso de los dispositivos utilizados para el enfriamiento de la materia en proceso. La tabla XIII proporciona la información requerida, dependiendo del diámetro del orificio y de su presión de trabajo efectiva.

A continuación se dará un ejemplo de cómo usar la tabla para calcular el consumo de aire en una manguera; se tomó como ejemplo el soplador de la línea de producción T-20. La presión del soplador es de 6 bar y el tamaño del orificio es de 3 mm; en caso de no encontrar el valor en la tabla, se procede a interpolar entre los 2 valores más cercanos, como se ejemplificó anteriormente.

Para encontrar el valor de consumo de aire se localizan en la tabla los valores mencionados anteriormente y el punto donde se intersectan es la respuesta de gasto en metros cúbicos por minuto; en el presente caso se tiene que el consumo de una manguera es de 20 CFM.

Tabla XVII. Gasto de aire en sopladores

Gasto en metros cúbicos por minuto												
Diámetro del orificio, mm	Presión efectiva en bar											
	2	3	4	5	6	7	8	10	12	15	20	30
0.1	0.0003	0.0004	0.0005	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.001	0.0012	0.0014	0.0019	0.0028
0.2	0.0011	0.0015	0.0018	0.0022	0.0025	0.0029	0.0032	0.004	0.0047	0.0058	0.0076	0.0111
0.3	0.0025	0.0033	0.0041	0.0049	0.0057	0.00649	0.00730	0.0089	0.0105	0.0130	0.0170	0.0251
0.5	0.0068	0.00905	0.0113	0.0135	0.0158	0.0180	0.0203	0.0248	0.0292	0.0360	0.0472	0.0696
1	0.0272	0.0362	0.0452	0.0541	0.0631	0.0721	0.0811	0.0990	0.117	0.144	0.188	0.279
1.5	0.0613	0.0815	0.102	0.122	0.142	0.162	0.183	0.223	0.263	0.323	0.425	0.627
2	0.109	0.145	0.181	0.217	0.252	0.288	0.324	0.396	0.468	0.575	0.755	1.110
3	0.245	0.326	0.406	0.487	0.568	0.649	0.730	0.891	1.05	1.30	1.70	2.510
4	0.436	0.579	0.723	0.865	1.01	1.15	1.30	1.585	1.87	2.30	3.02	4.45
5	0.681	0.905	1.13	1.35	1.58	1.80	2.03	2.48	2.93	3.60	4.72	6.96
6	0.981	1.304	1.63	1.95	2.27	2.60	2.92	3.57	4.22	5.18	6.80	10.0
8	1.75	2.32	2.89	3.46	4.04	4.62	5.19	6.34	7.5	9.20	12.1	17.8
10	2.72	3.62	4.52	5.41	6.31	7.21	8.11	9.90	11.7	14.4	18.8	27.9
12	3.92	5.22	6.50	7.78	9.09	10.4	11.68	14.3	16.9	20.7	27.2	40.1
15	6.13	8.15	10.2	12.2	14.2	16.2	18.25	22.3	26.3	32.3	42.5	62.7
20	10.9	14.5	18.1	21.7	25.2	28.8	32.4	39.6	46.8	57.5	75.5	111
25	17.0	22.6	28.2	33.8	39.5	45.0	50.7	61.9	73.1	90.0	118	
30	24.5	32.6	40.6	48.7	56.8	64.9	73	89.1	105	130		
35	33.4	44.4	55.3	66.3	77.3	88.3	99.3	121	144			
40	43.6	57.9	72.3	86.5	101	115	130	159				
45	55.2	73.3	91.3	110	128	146						
50	68.1	90.5	113	135								
55	82.4	109.5	136									
60	98.1	130.4										

Fuente: CARNICER, Enrique. Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones. p. 260.

3.1.5.3. Resumen del consumo

El consumo de aire comprimido en la empresa Durman Esquivel Guatemala S.A queda definido de la siguiente manera.

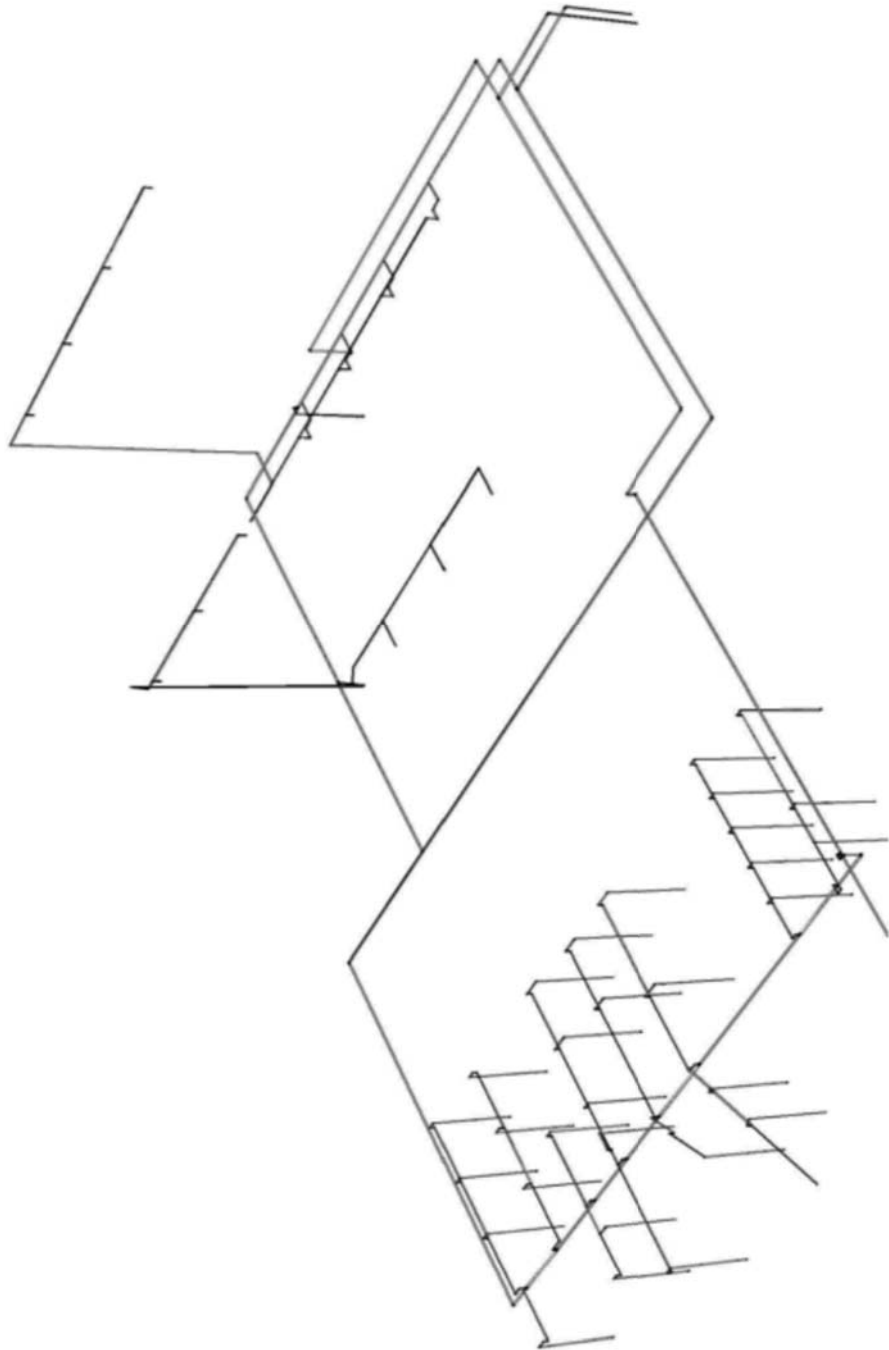
Tabla XVIII. Consumo de aire comprimido en Durman

No.	Equipo	Cantidad	Consumo unitario (CFM)	Porcentaje de utilización	Consumo total (CFM)
1	Silos	7	90,00	20%	126,00
2	Tolva	9	16,00	40%	57,60
3	Baño	9	3,50	60%	18,90
4	Impresora 2 cabezales	4	2,50	60%	6,00
5	Impresora 4 cabezales	3	6,00	60%	10,80
6	Sierra	7	4,00	60%	16,80
7	Campanadora	7	20,00	60%	84,00
8	Enrolladora	2	5,00	60%	6,00
10	Sopladores	3	20,00	75%	45,00
12	Fugas 10%				37,11
	TOTAL				408,21

Fuente: elaboración propia.

El sistema de aire comprimido fue dibujado en un programa de diseño asistido por computadora, para ejemplificar al lector la forma que posee la distribución de tuberías desde la salida del cuarto de compresores hasta sus estaciones de servicio.

Figura 17. **Isométrico de tubería neumática de Durman Esquivel**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

3.2. Disminución de fugas

Un problema común en la industria, es el escape de aire por medio de fugas en el sistema, junto con la caída de presión. Esta situación origina varios problemas operativos resultando en un trabajo ineficiente de los equipos que utilizan este servicio, lo que causa una menor productividad de los mismos; un aumento en la frecuencia de los ciclos del sistema de compresión, resultante en la disminución de la vida útil del equipo y consecuentemente en la de los demás componentes del sistema; un aumento en los requerimientos de mantenimiento, que incrementa los paros no programados y, por último, obligará a elevar innecesariamente la capacidad del sistema de compresión.

Las fugas de aire en acoplamientos, tuberías, juntas, son puntos de pérdida de energía. Muchas empresas tienen una gran cantidad de fugas y por lo tanto, pérdidas energéticas que se traducen en dinero desperdiciado para la empresa. La pérdida de aire comprimido en la instalación de Durman Esquivel es un volumen sorprendentemente alto, y resulta difícil descubrir, dado que el aire es invisible y a la vez inodoro, añadiendo a esto que el nivel de ruido en la empresa dificulta escuchar los escapes de aire significativos.

Si la fuga de aire es grande, no representa un grave problema, ya que es bastante fácil de identificar el ruido que hace la descubre o en otro caso la gran caída de presión en la red permite darse cuenta de que algo anda mal.

Las pequeñas fugas de aire no suelen observarse, por lo tanto se les resta importancia. Este pensamiento es equivocado y está muy lejos de la realidad, puesto que si se suman las cantidades de pequeñas fugas que pueden darse en las uniones de tuberías, válvulas, y mangueras, se tiene como resultado un escape continuo de aire comprimido con demanda ilimitada.

En instalaciones antiguas, que no son mantenidas bajo supervisión, los escapes significan de un 25% a un 30% de la capacidad total del compresor. Con un gasto razonable de mantenimiento, estas cifras pueden bajar hasta valores más aceptables cerca del 10% o menos de la capacidad del compresor. El costo de fijar las pérdidas de aire por escape dentro de límites tolerables, es decir, darle mantenimiento continuo a las tuberías, es muy pequeño en comparación con el costo de mantener las pérdidas de aire.

Mediante la aplicación de un programa de control de fugas, podría ser muy sencillo y barato comenzar a generar ahorro en el sistema neumático; además, esta es una de las áreas a las que menor atención se le presta y generalmente es donde existe la mayor pérdida. En la figura 17 se muestra una tabla de la cantidad de dinero que se podría llegar a ahorrar en un año, según el porcentaje de pérdida de aire a una presión de 7 bar, de un equipo funcionando las 24 horas del día los 365 días del año.

Figura 18. **Costos por fugas de aire**

Consumo/minuto			Nivel de fugas			
m ³	CFT	kW	10%	20%	30%	40%
			\$	\$	\$	\$
10	350	55	10,000	20,000	30,000	40,000
20	700	110	20,000	40,000	60,000	80,000
30	1050	160	30,000	60,000	90,000	120,000
50	1750	250	50,000	100,000	150,000	200,000
75	2650	350	75,000	150,000	225,000	300,000
100	3500	500	100,000	200,000	300,000	400,000

Fuente: www.leekseek.com. Consulta: 12 de octubre de 2012.

3.3. Control del compresor

El objetivo de un sistema neumático es transportar el aire de manera eficiente. En muchas ocasiones la operación de alguno de los compresores se debe a incrementos breves en la demanda de aire de la planta, lo cual indica que ese compresor únicamente está operando para suplir picos de carga que genera la planta y son de baja duración en tiempo, lo que crea una demanda artificial.

La finalidad de tener un control en el arreglo de compresores es tomar datos de campo por medio de dispositivos electrónicos, para posteriormente mandar una señal y rectificar el funcionamiento del equipo de manera casi inmediata.

El sistema de control de compresores acerca a los equipos que utilizan aire comprimido, a estabilizar la presión del aire en los puntos de uso, controlar la distribución, administrar las fugas y mejorar la secuencia de uso de los compresores, mientras maximiza el rendimiento de los equipos neumáticos.

3.3.1. Importancia de los sistemas de control

Los controles en los sistemas de aire comprimido hacen que la oferta de aire sea lo más cercana posible a la demanda del sistema. Aunque no siempre se logra en tiempo real, esta ventaja lo convierte en una de las herramienta más importantes para obtener reducciones en el consumo energético, ya que un control adecuado dará como resultado una operación eficiente y un alto desempeño del sistema.

Un sistema de control se justifica debido a los ahorros en el consumo de energía, dado que se puede recuperar la inversión en menos de un año con un sistema de control eficiente.

3.3.1.1. Estrategias de control

El tipo de estrategia de control que se propondrá depende de los datos obtenidos en el diagnóstico del siguiente capítulo, a continuación se explicarán varios tipos de esquemas de control que se pueden aplicar en distintos casos tomando todas las consideraciones que se han explicado a lo largo del presente informe.

3.3.1.1.1. Prendido-apagado

Es el control más simple disponible, ya que a través de un interruptor automático de caída de presión encienden o apagan el motor del compresor. Dada su sencillez, se le puede utilizar tanto en compresores recíprocos como en rotativos de tipo tornillo.

Por la forma de operación, su aplicación se limita a sistemas con ciclos de servicio muy bajos, de lo contrario el motor se puede sobrecalentar por los constantes arranques; además requeriría de mayor mantenimiento. Es recomendable utilizarlos con dispositivos denominados arrancadores suaves, para controlar el número de arranques y paros por hora.

3.3.1.1.2. Carga-sin carga

Conocidos también como controles de velocidad constante, estos esquemas de control alimentan el sistema en el modo de carga y cuando la

presión se alcanza, pasan al modo sin carga, donde el compresor sigue trabajando, pero sin entregar aire al sistema; esto permite que el motor opere a velocidad constante.

Este tipo de control de compresor se utiliza en compresores reciprocantes y rotativos tipo tornillo de alta capacidad, pero siguen consumiendo un cierto porcentaje de la potencia a plena carga, lo que los hace ineficientes hasta cierto punto.

3.3.1.1.3. Variación de frecuencia

Los esquemas de control por medio de variación de frecuencia regulan automáticamente la velocidad del motor del compresor; esto permite modular la capacidad del compresor y por lo tanto se podrá responder fielmente y de forma precisa a las fluctuaciones de la demanda.

Los variadores de frecuencia se pueden instalar en casi cualquier compresor, pero por sus características, los mejores resultados se obtienen aplicándolos en los compresores de tornillo rotativo, sobre todo cuando se tienen demandas fluctuantes, ya que tienen excelente respuesta a picos de carga.

Los esquemas de control de variación de frecuencia eliminan el modo de operación sin carga de un compresor, por lo que se elimina el porcentaje estimado de pérdidas de trabajar con el compresor en vacío; además al poder medir la presión con gran exactitud, se puede ajustar la velocidad en forma automática, manteniendo una presión constante en el sistema.

Un sistema de control debe contar con una serie de equipos mínimos para su correcto funcionamiento; a continuación se presenta una breve explicación de los mismos.

3.3.1.2. Equipos de control

Es necesario explicar los equipos utilizados para poner en funcionamiento un sistema de control en el arreglo de compresores de la empresa Durman Esquivel, si resultara viable instalarlos en el diagnóstico del siguiente capítulo. A continuación se describe cada uno de estos dispositivos.

Controlador lógico programable o PLC por sus siglas en inglés, es un dispositivo electrónico capaz de secuenciar procesos utilizados en automatización industrial; es el equipo encargado de recibir las señales del entorno, procesarlas y luego enviar una respuesta al equipo de control (ver figura 19).

Variador de frecuencia es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna por medio del control de la frecuencia de alimentación eléctrica suministrada al motor (ver figura 19).

Flipón es un interruptor operado automáticamente, diseñado para proteger un circuito eléctrico del daño causado por corrientes muy altas. Su función básica es detectar una falla y luego interrumpir su continuidad para inmediatamente cortar el flujo eléctrico.

Transductor es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra de diferente a la salida.

El nombre del transductor indica cuál es la transformación que realiza (por ejemplo electroneumática, transforma una señal eléctrica en neumática o viceversa).

Contactor es un interruptor controlado eléctricamente usado para cambiar a un circuito de potencia, similar a un relé, a excepción que usa corrientes más grandes. Un contactor es controlado por un circuito, el cual tiene una potencia mucho menor que el circuito activado.

En las figuras 19 y 20 se muestra un sistema de control para un compresor del tipo tornillo rotativo ya instalado.

Figura 19. **Panel de control**



Fuente: equipos de la empresa Ingeniería Industrial y Proyectos S.A.

Figura 20. **Transductor de presión**



Fuente: equipo de la empresa Ingeniería Industrial y Proyectos S.A.

3.3.1.3. Funcionamiento de un sistema de control

El sistema de control de un compresor de tornillo rotativo se encarga de hacer una secuencia lógica de funcionamiento, es decir, según la presión y el flujo requerido en el sistema, se determina la cantidad de compresores que se necesitan, arrancando las máquinas en orden y posteriormente apagándolas para cuando el sistema no lo requiera.

El control de compresores responde de manera casi inmediata a los cambios físicos del sistema de aire comprimido; el instrumento de campo, el transductor, se encarga de recoger la señal en el punto de funcionamiento,

posteriormente convierte la señal en pulsos eléctricos y finalmente lo envía como información digital al panel de control.

Según los parámetros programados en el panel, el sistema responde y modula el arreglo de compresores. Es evidente que un sistema de control cerrado proporciona grandes ahorros, ya que este se adapta a la demanda de la planta en tiempo real y no se desperdicia el recurso de la energía eléctrica.

El motor de inducción es una de las mejores formas de obtener energía mecánica a partir de energía eléctrica. Tiene la limitante de mantener su velocidad fija, sin importar las variaciones de carga; es posible variar su velocidad cambiando el número de polos o la frecuencia eléctrica, sin embargo, el compresor accionado por el motor eléctrico debe permitir esta variación, ya que el funcionamiento del sistema neumático no debe verse afectado.

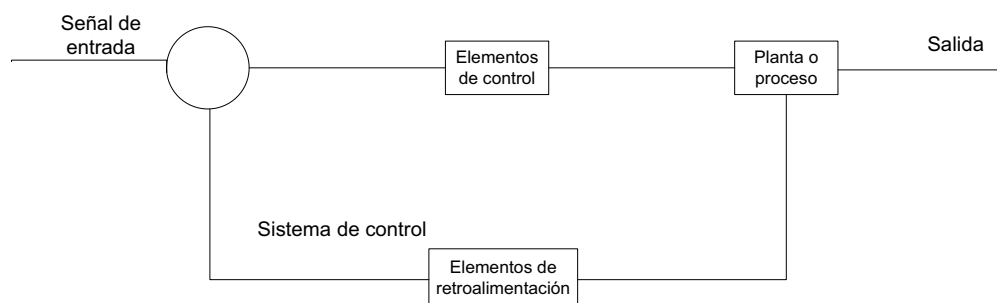
En Guatemala, la frecuencia eléctrica tiene un valor de 60 Hz, es por medio de esta variable que un variador de frecuencia aprovecha la oportunidad de ahorrar energía.

3.3.1.3.1. Lazo de control

Es el tipo de sistema en el que la acción de control está en función de la señal de salida. Los sistemas de circuito cerrado usan la retroalimentación desde un resultado final para ajustar la acción al inicio del sistema.

En el caso actual se tendría que contar con transductores de presión en el sistema de aire comprimido que envíen la señal hacia un PLC, para secuenciar los variadores de frecuencia.

Figura 21. Diagrama de un lazo de control cerrado



Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Instalación eléctrica

Es importante analizar la instalación de los equipos eléctricos; en este caso todos los compresores son accionados por motores eléctricos de corriente alterna de eficiencia superior.

Es evidente el gran impacto de los motores eléctricos en el consumo de energía en el sector industrial; por lo tanto, resalta la importancia de identificar y evaluar oportunidades de ahorro de energía en ellos. Sin embargo, es necesario determinar con precisión el estado energético actual de los mismos y conocer sistemas alternativos como la instalación de equipos electrónicos.

En la instalación de equipos eléctricos en Durman Esquivel se encuentran los cuatro motores de alta eficiencia en conexión directa a cada uno; a continuación en la figura 22 se puede observar el panel de conexión de los motores que actualmente se encuentran en la empresa.

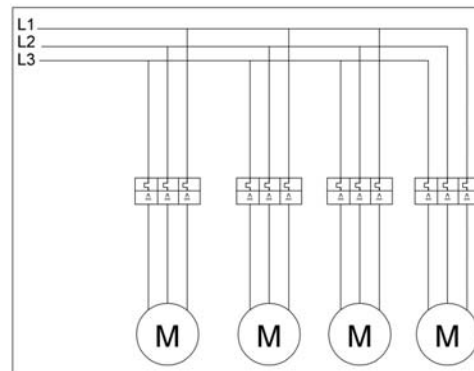
Figura 22. **Instalación eléctrica**



Fuente: equipos de la empresa Durman Esquivel.

La figura 23 que se presenta a continuación es una representación de la instalación eléctrica de los motores en un diagrama, para su mejor comprensión; donde se muestra la forma en que los motores se conectan a las líneas de alimentación eléctrica.

Figura 23. **Diagrama de instalación eléctrica**



Fuente: elaboración propia.

4. PROPUESTA DE MEJORA

La metodología para un diagnóstico energético no está siempre definida, sin embargo, según la teoría presentada en el segundo capítulo sigue una estructura básica. Los puntos estratégicos para determinar los potenciales de ahorro de energía fueron definidos en el presente reporte.

Como primer punto se hace una recopilación de información útil para hacer los cálculos necesarios, la información del sistema neumático que opera en la empresa fue descrita en el capítulo anterior, posteriormente se definen los puntos críticos y se hace una evaluación del estado energético del sistema. Luego de determinar la situación en la empresa se determinan los potenciales de ahorro y tras aprobar una evaluación técnica y económica se aplican las medidas más convenientes.

4.1. Puntos críticos del sistema de aire comprimido

El ahorro de energía en la empresa analizada se basa en tres ejes principales, los cuales son: control de fugas, caída de presión y control del sistema de aire. A continuación se definirá el estado en que se encuentra cada uno de estos puntos respecto de valores admisibles de diseño y mantenimiento.

Un punto crítico se define como una etapa del proceso donde se puede aplicar una medida de control y es esencial para prevenir, reducir o eliminar un riesgo que puede comprometer la operación y el consumo de energía del sistema de aire comprimido.

En esta sección se definen las partes más vulnerables del sistema neumático que actualmente se encuentran en la empresa Durman Esquivel. Los puntos críticos son por su naturaleza los que tienden a fallar con mayor frecuencia en los sistemas de aire comprimido y generalmente son los que generan un mayor costo solo por mantener funcionando el sistema de manera ineficiente. Aunque los puntos críticos de control son los más sensibles de fallar, esto no quiere decir que en la empresa todos ellos sean deficientes; a continuación se presenta una lista de los puntos que se deben tomar en cuenta en la fábrica.

- Líneas de distribución
 - Tuberías
 - Accesorios
 - Fugas
- Consumo de aire
- Control del compresor

4.2. Diagnóstico del sistema de aire comprimido

El aire comprimido en Durman Esquivel es un recurso muy importante que ayuda al proceso productivo a ser más eficiente, por lo que un sistema de aire comprimido correctamente operado puede generar ahorro de energía, requiere menor mantenimiento y disminuye los gastos ocasionados por situaciones imprevistas.

El objetivo del presente informe es determinar las oportunidades de ahorro que existen en la empresa; es entonces importante concluir el estado actual de las instalaciones neumáticas que operan en la empresa.

En los siguientes incisos se determinará el estado de las instalaciones neumáticas en relación con el diseño y mantenimiento de los equipos, asimismo, se tomará en cuenta el uso de nuevas tecnologías para el mejor aprovechamiento del aire comprimido.

4.2.1. Cálculo de fugas

Es posible calcular el volumen de aire que se está perdiendo en fugas, utilizando una serie de métodos y herramientas que se explicarán a continuación.

Para calcular el nivel de fugas en la empresa se debe dejar conectadas todas las herramientas neumáticas un día no laborable, tomando como patrón la capacidad del compresor instalado. Poner en marcha el sistema y dejarlo funcionando hasta que llene de aire toda la instalación a la presión de trabajo de alrededor de 120 psi. Una vez alcanzada esta presión, el compresor se dispara y se controla con un cronómetro el tiempo que el compresor trabaja en vacío.

Como consecuencia de las fugas de aire existentes en el circuito, baja la presión hasta el punto mínimo en que se ha regulado la válvula piloto o la descompresión; el compresor comienza a trabajar de nuevo con carga.

Se debe anotar también el tiempo que tarda en volverse a disparar, con lo que se tendrá el tiempo exacto de pérdida de aire comprimido por fugas. Se debe repetir este procedimiento varias veces para obtener un valor promedio de tiempo que sea más preciso.

La ecuación que se presenta a continuación y las tablas correspondientes ayudarán con el cálculo de este valor en el estudio de la empresa Durman Esquivel.

$$Q = \frac{q \times t}{T}$$

Donde:

Q = aire desperdiciado en fugas

T = tiempo de trabajo en vacío del compresor

t = tiempo que el compresor tarda en volverse a disparar

q = cantidad de aire suministrada por el compresor

Tabla XIX. **Tiempo de llenado y vaciado del compresor**

No.	t (segundos)	T (segundos)
1	57	334
2	54	351
3	59	339
Promedio	56,67	341,33

Fuente: elaboración propia.

Utilizando los datos de la tabla XIX y la ecuación para el cálculo de fugas, la fórmula resulta:

$$Q = \frac{(0,94 \text{ minutos}) \times (15,8 \text{ metros cúbicos/ minuto})}{5,69 \text{ minutos}} = 2,61 \text{ m}^3/\text{minuto}$$

La cantidad de aire que escapa debido a fugas es de 2,61 metros cúbicos por minuto; tomando esa cantidad en fugas y dividiéndola por la cantidad total de aire que generan los cuatro compresores de 15,8 metros cúbicos por minuto (ver tabla I, capítulo 3) se obtiene un porcentaje de 16,52% en escape de fluido previamente comprimido. Este dato es muy diferente al aceptado que oscila entre 5% y 10% de escape de aire comprimido, es decir que el sistema está desperdiciando una gran cantidad de CFM, lo que se traduce en consumo eléctrico y finalmente en grandes pérdidas monetarias para la empresa.

Es ahora cuando finalmente se puede hacer una tabla más real sobre el consumo de aire comprimido que existe en la empresa; anteriormente, en la tabla XIV se hizo un estimado suponiendo un valor admisible de fugas del 10%. La nueva tabla de consumo resulta de la siguiente manera.

Tabla XX. **Consumo real de aire comprimido en Durman**

No.	Equipo	Cantidad	Consumo unitario (CFM)	Porcentaje de utilización	Consumo total (CFM)
1	Silos	7	90,00	20%	126,00
2	Tolva	9	16,00	40%	57,60
3	Baño	9	3,50	60%	18,90
4	Impresora 2 cabezales	4	2,50	60%	6,00
5	Impresora 4 cabezales	3	6,00	60%	10,80
6	Sierra	7	4,00	60%	16,80
7	Campanadora	7	20,00	60%	84,00
8	Enrolladora	2	5,00	60%	6,00
10	Sopladores	3	20,00	75%	45,00
12	Fugas 16,52 %				61,31
	TOTAL				432,40

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Caída de presión

La presión y el caudal son dos variables importantes de establecer para el dimensionamiento de la línea de tubería y para el cálculo de la caída de presión admisible en el sistema.

Para calcular la demanda de esta variable se debe de sumar la presión de funcionamiento de la herramienta, la caída de presión que se presentará en las líneas y los accesorios, para obtener así la presión al inicio de la línea principal.

Para determinar el flujo máximo necesario en el sistema de aire comprimido se debe elaborar un listado de la maquinaria neumática utilizada en la planta. Esta información se encuentra en la tabla XIV del presente reporte. Las pérdidas de carga en tuberías se calcula por medio de la ecuación de Darcy-Weisbach que se presenta a continuación.

$$h_L = \frac{fLv^2}{2\phi g} = \frac{8fLQ^2}{\phi^5 g \pi^2}$$

Donde:

h_L = pérdida de carga

ϕ = diámetro de tubería

L = longitud de la tubería

v = velocidad del fluido

g = aceleración de la gravedad

f = factor de fricción

El factor de fricción es función de la rugosidad del material, diámetro de la tubería y del número de Reynolds; este último se define como:

$$R_e = \frac{\phi v \rho}{\mu}$$

Donde:

R_e = número de Reynolds

v = velocidad del fluido

ρ = densidad

μ = viscosidad del fluido

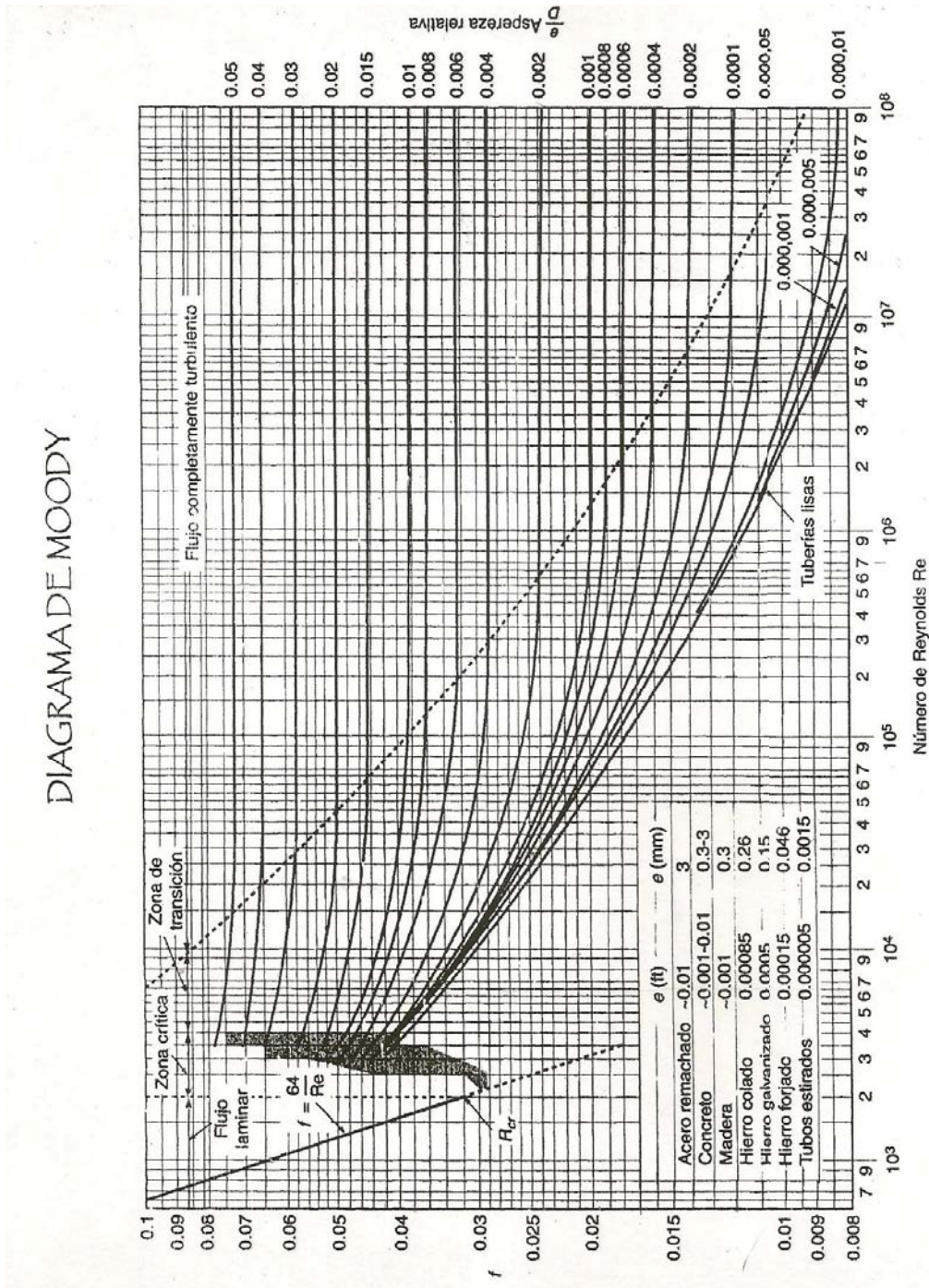
El factor de fricción se puede determinar mediante diferentes relaciones experimentales o el diagrama de Moody; el procedimiento para determinar el factor de fricción se divide en dos rangos principales de operación: flujo laminar y flujo turbulento.

El flujo laminar se considera cuando se presenta un número de Reynolds menor o igual que 2300 ($R_e \leq 2300$). Para este régimen de flujo se calcula el factor de fricción para tuberías lisas y rugosas, utilizando la ecuación de Poiseulle:

$$f = \frac{64}{R_e}$$

El flujo turbulento se considera cuando se presenta un número de Reynolds mayor que 4000 ($R_e > 4000$). Para este régimen de flujo se calcula el factor de fricción para tuberías lisas y rugosas por medio del diagrama de Moody, que se ilustra a continuación.

Figura 24. Diagrama de Moody



Fuente: MÉRIDA, Carmen. Recopilación de tablas y diagramas. p. 2.

Otra forma de calcular la pérdida de presión es utilizando tablas que ya incorporan los cálculos que se derivan de la ecuación de Darcy-Weisbach y el diagrama de Moody.

Tabla XXI. **Caída de presión en libras por pulgada cuadrada**

CFM	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"
40	5,512	1,244	0,328	0,079	0,035			
45	6,976	1,574	0,416	0,101	0,044	0,012		
50	8,613	1,943	0,513	0,124	0,055	0,015		
60	12,402	2,799	0,739	0,179	0,079	0,021		
70		3,809	1,006	0,243	0,107	0,029	0,012	
80		4,075	1,314	0,318	0,140	0,038	0,016	
90		6,297	1,663	0,402	0,177	0,048	0,020	
100		7,774	2,053	0,497	0,219	0,060	0,025	
125		12,147	3,207	0,776	0,342	0,093	0,038	0,012
150			4,619	1,118	0,492	0,134	0,055	0,018
175			6,287	1,522	0,670	0,183	0,075	9,024
200			8,211	1,987	0,875	0,239	0,098	0,031
225			10,392	2,515	1,107	0,302	0,124	0,040
250			12,830	3,105	1,367	0,373	0,153	0,049
275				3,757	1,654	0,452	0,186	0,059
300				4,471	1,968	0,537	0,221	0,071
325				5,248	2,309	0,631	0,259	0,083
350				6,086	2,678	0,731	0,301	0,096
375				6,987	3,075	0,840	0,345	0,110
400				7,949	3,498	0,955	0,393	0,125
425				8,974	3,949	1,079	0,443	0,142
450				10,061	4,428	1,209	0,497	0,159
475				11,210	4,933	1,347	0,554	0,177
500				12,421	5,466	1,493	0,614	0,196
550					6,614	1,806	0,743	0,237
600					7,871	2,150	0,884	0,282
650					9,238	2,523	1,037	0,331

Fuente: CARNICER, Enrique. Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones. p. 214.

Finalmente, luego de obtener las caídas de presión, se procede a calcular el porcentaje de pérdida de presión de todas las líneas de distribución y se compara con el valor aceptable que debería ser como máximo de un 10%. La ecuación para obtener este porcentaje es la siguiente:

$$\% \text{ de pérdida de presión} = \frac{(\text{Caída de presión} \times 100)}{\text{Presión de la instalación}}$$

En los siguientes incisos se procederá a calcular la caída de presión por tipo de línea de distribución y posteriormente se obtendrá el porcentaje de pérdida de presión.

4.2.2.1. Caída de presión en línea principal

La longitud total de la tubería principal es de 930,73 pies y tiene un diámetro de dos pulgadas; el consumo de esta tubería es el total de consumos para toda la red de distribución, ya que es la encargada de transportar el aire a toda la planta, teniendo un total de 408,21 CFM.

Utilizando los datos de la tabla XXI, se procede a localizar la columna de 2 pulgadas de tubería y los valores más cercanos para el consumo de aire, se interpola entre estos valores y se obtiene el resultado como se muestra a continuación.

$$h_L = \frac{(408,21 - 400) \times (1,079 - 0,955)}{425 - 400} + 0,955 = 0,996 \text{ psi}$$

Se debe recordar que el dato anterior es para tubería de 100 pies, por lo que se debe encontrar la relación entre la longitud real y se multiplica por este valor, lo cual da un total de 9,26 psi de caída de presión para la línea principal.

4.2.2.2. Caída de presión en línea secundaria

La longitud total de la línea secundaria es de 348,17 pies y el diámetro es de una pulgada; el consumo de esta tubería se determina tomando el consumo en una de las líneas secundarias que corresponde al consumo total menos el consumo de la tubería principal y las pérdidas ocasionadas por fricción. Utilizando el método de porcentajes en una tubería en paralelo, se sabe que la pérdida total es igual a la pérdida en cada una de las tuberías por separado, por lo que se puede tomar el consumo de solo una de las líneas secundarias y calcular el dato correspondiente a la caída de presión.

La tubería de una pulgada consume el aire comprimido que se dirige hacia 4 silos y 3 tolvas; la suma de la línea secundaria más alejada del compresor da un total de 91,2 CFM; con este dato se procede como se muestra a continuación.

Utilizando los datos de la tabla XXI, se localiza la columna de una pulgada de tubería y los valores más cercanos para el consumo de aire; se interpola entre estos valores y se obtiene el resultado como lo muestra la siguiente ecuación.

$$h_L = \frac{(91,2 - 90) \times (2,053 - 1,663)}{100 - 90} + 1,663 = 1,767 \text{ psi}$$

La longitud en este caso varía de ser la total, ya que por ser una tubería en paralelo, se toma la longitud del ramal que se eligió para calcular la caída de presión. La longitud del ramal elegido es la de los silos de resina virgen y tiene un total de 210 pies. El factor de relación se multiplica por el dato encontrado y da un total de 3,71 psi.

4.2.2.3. Caída de presión en línea de servicio

La longitud total de la tubería de servicio es de 1 313,8 pies y el diámetro es de tres cuartos de pulgada; el consumo de esta línea se determina tomando el consumo de cada una de las máquinas en una línea determinada y aplicando el procedimiento anterior para calcular la caída de presión.

Las líneas de servicio tienen dos puntos en común, el primero es la línea de distribución que se encuentra aproximadamente a la misma presión en todos sus puntos y el segundo punto se considera como el ambiente que posee las mismas características de presión y altura a la salida de los equipos, motivo por el cual se considera un arreglo en paralelo.

Utilizando los datos de la tabla XXI, se procede a localizar la columna que contiene los datos de tres cuartos de pulgada de tubería y los valores más cercanos para el consumo de aire a 48,95 CFM que corresponden a la maquinaria de la línea de producción T-18; se interpola entre estos valores y se obtiene el resultado como se muestra a continuación.

$$h_L = \frac{(48,95 - 45) \times (1,943 - 1,574)}{50 - 45} + 1,574 = 1,87 \text{ psi}$$

La longitud de la línea de producción más alejada del compresor corresponde a 185 pies y obteniendo la relación entre longitud real y el dato de la tabla XXI, para calcular el valor real, se obtiene una caída de presión en la línea de servicio de 3,46 psi; esto quiere decir que la velocidad del aire en este punto es muy elevada y genera grandes caídas de presión, aunque sea la línea que menor diámetro posee.

4.2.3. Porcentaje de caída de presión

El porcentaje de caída de presión resulta de la suma de cada una de las pérdidas calculadas en los incisos anteriores, posteriormente es dividida por el valor real de presión de la instalación y finalmente comparada con un valor aceptable de pérdida de presión. El procedimiento de cálculo se describe a continuación.

$$\text{Caída de presión} = P_{\text{principal}} + P_{\text{secundaria}} + P_{\text{de servicio}}$$

Sustituyendo datos, la fórmula resulta:

$$\text{Caída de presión} = 9,26 + 3,71 + 3,46 = 16,43 \text{ psi}$$

Utilizando el dato anterior se calcula el porcentaje de pérdida utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de pérdida de presión} = \frac{(16,43 \times 100)}{120} = 13,69\%$$

El valor obtenido muestra que la caída de presión es mayor a valores admisibles, teniendo como máximo un diez por ciento.

4.2.4. Sistema de control

Un sistema de control es un arreglo de dispositivos orientado al mantenimiento de condiciones específicas en un proceso, maquinaria o arreglo de equipos. El lazo de control es un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema, con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallos y se obtengan los resultados óptimos.

4.2.4.1. Determinación técnica

Se debe hacer una recopilación de datos, mediante elaboración de listados, tanto en lo que respecta a equipos de generación de aire en la parte de suministro, como la maquinaria que utiliza herramientas neumáticas para su operación en la parte de la demanda, así como también la elaboración de diagramas del sistema de distribución de aire con sus distintos ramales.

Es importante utilizar un analizador de redes (ver figura 25), este instrumento consiste en un análisis asistido por computadora, el aparato es instalado en las líneas de conexión eléctrica de los motores por medio de medidores de campo comunmente denominados ganchos. Los ganchos se encargan de leer la corriente continuamente y generar gráficas de la variación del sistema.

Cabe mencionar que debido a que los compresores del tipo tornillo rotativo no se adaptan a las leyes de semejanza de dispositivos centrífugos, es necesario obtener estos datos directamente del campo.

Es conveniente además utilizar transductores de presión capaces de enviar la información a una base de datos, para obtener el comportamiento del sistema durante un período de tiempo determinado de operación.

Figura 25. **Analizador de redes**



Fuente: www.dranetz.com. Consulta: 25 de noviembre de 2012.

Dentro de los datos que se pueden obtener mediante el equipo de análisis del sistema se encuentran:

- Presión en la generación
- Presión en la red de distribución
- Entrega de aire de los compresores
- Consumo eléctrico de los compresores
- Presión y demanda del sistema

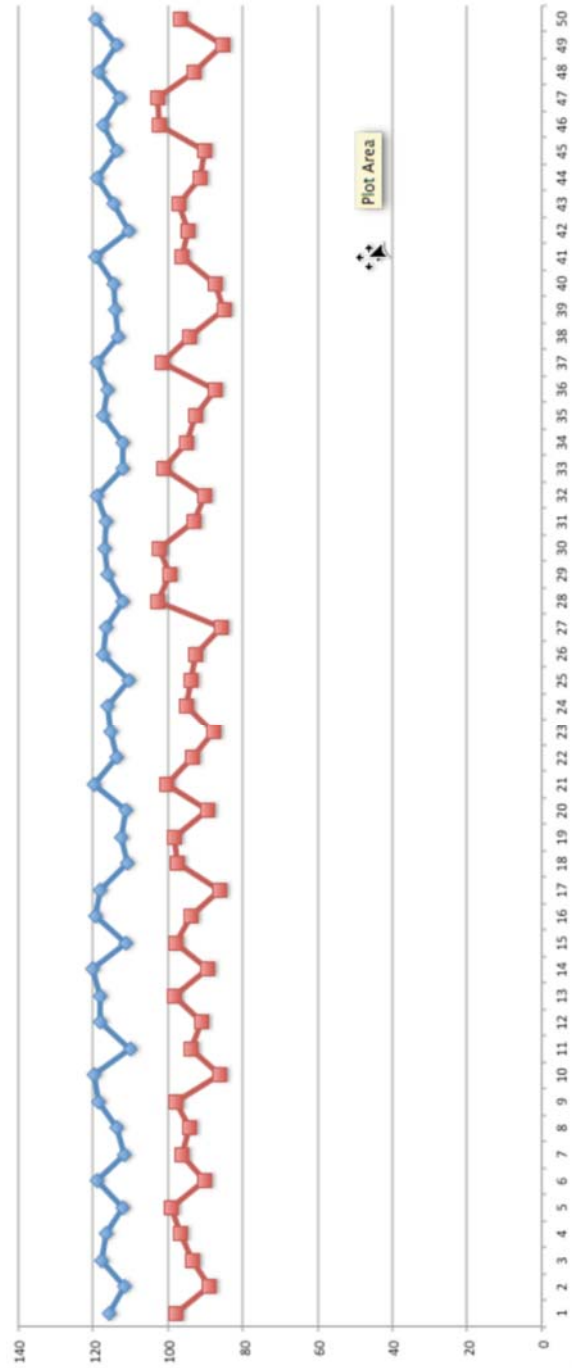
Se puede determinar una gráfica aproximada utilizando un método manual de recolección de datos. Debido a que en la empresa se cuenta con medidores de presión instalados en diversos puntos, se puede proceder a tomar las lecturas que arrojan los manómetros. Es importante saber qué aparatos de medición tomar en cuenta.

Se tomó como referencia el manómetro a la salida del tanque de almacenamiento que se encuentra en el cuarto de compresores y se anotaron las presiones de la última línea de producción denominada T-18, la que se encuentra más alejada del compresor; por esta razón es la que arrojaría mayor variabilidad. Se debe recordar que las variables neumáticas están íntimamente relacionadas, por lo que el perfil que se obtuvo es muy similar en ambas tomas de datos.

Durante la recopilación de datos se tomó una muestra de 50 lecturas (anexo 1) de cada uno de los puntos de referencia separados por un período de 5 minutos. A continuación se presenta la figura 26, que describe los datos que se recopilieron durante la investigación, nótese en la gráfica que el perfil de ambas series de lecturas es muy similar, esto se debe a que el período de tiempo en que se recolectó la información fue aproximadamente el mismo y el sistema de aire comprimido se comportaba en ambos puntos de manera similar.

En las gráficas, la línea superior describe el comportamiento de presión de suministro, y la línea inferior muestra el comportamiento de la línea de producción T-18, es decir, la que representa al sistema.

Figura 26. Gráfica de presión en suministro y en planta



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel.

Se puede observar en la figura 26 que el mayor problema es acercar el suministro de aire a la distribución, es decir, corregir la caída de presión; esto concuerda con los resultados del inciso anterior.

Además del análisis del comportamiento de la presión en la red de aire comprimido, se debe analizar otra variable: la potencia eléctrica consumida; de nuevo se tomó una serie de datos durante diferentes periodos del día, que ayudaron a calcular esta variable y se tabularon para su mejor comprensión.

La potencia eléctrica consumida es aquella tomada en caballos de fuerza en el eje de entrada del compresor; para registrar este dato se necesita saber la corriente a la que están trabajando los motores eléctricos que accionan los compresores por medio de un multímetro; este dato se describe a continuación.

Tabla XXII. **Corriente de motores**

Motor	Potencia (Hp)	Corriente (amperios)			Suma	Promedio
		1	2	3		
1	30	39,20	35,00	39,10	37,77	38,91
		39,00	39,60	39,80	39,47	
		40,20	39,20	39,10	39,50	
2	30	39,30	39,00	39,60	39,30	39,42
		39,20	39,10	39,00	39,10	
		40,20	39,20	40,20	39,87	
3	30	36,00	39,00	38,50	37,83	37,69
		35,50	40,20	34,60	36,77	
		39,20	39,10	37,10	38,47	
4	40	50,20	51,10	48,50	49,93	49,73
		49,30	48,20	50,70	49,40	
		50,90	49,80	48,90	49,87	

Fuente: elaboración propia.

La potencia consumida o la que se entrega al compresor se debe calcular con la siguiente ecuación para motores eléctricos trifásicos:

$$\text{Potencia consumida} = \sqrt{3} \times V \times I \times f.p$$

Donde:

V = voltaje suministrado

I = corriente eléctrica

f. p = factor de potencia

En la tabla XXIII se muestra el cálculo de la potencia promedio consumida por cada uno de los motores en el cuarto de compresores de Durman Esquivel, Guatemala.

Tabla XXIII. **Potencia consumida**

Motor	Corriente	Voltaje	Factor de potencia	Potencia consumida
1	38,91	460	0,93	28,83
2	39,42	460	0,93	29,21
3	37,69	460	0,93	27,93
4	49,73	460	0,88	34,87

Fuente: elaboración propia.

Luego de analizar los datos de variabilidad en el comportamiento de aire y de electricidad, se pudo notar que estos no varían lo suficiente como para justificar técnicamente la instalación de equipos de control, es decir, la demanda de aire se mantiene muy estable a lo largo del tiempo, lo que no dejaría lugar para la operación eficiente de equipos como los variadores de frecuencia.

4.3. Focos de pérdida en Durman Esquivel, Guatemala

Los focos de pérdida son los puntos críticos de control que de hecho están generando desperdicio de energía. El procedimiento de cálculo de los focos de pérdida se realizó en el inciso anterior, la principal pérdida de energía queda definida en algunos de los puntos críticos de control y se determinó mediante la recopilación, análisis y comparación de datos con valores admisibles que son los siguientes.

- Fugas (16,52 %)
- Caída de presión (13,69%)

Es importante mencionar que se estima llegar a un punto óptimo de operación, el cual será alcanzado a través de disminuir los índices a valores aceptables o permisibles según la teoría de diseño de instalaciones de aire comprimido.

4.4. Propuesta para la empresa

Dados los niveles de pérdida en los que se está incurriendo y, por otro lado, los beneficios que se pueden obtener, a continuación se presenta una serie de pasos y recomendaciones, cuya aplicación dará muy buenos resultados para disminuir la pérdida de aire comprimido.

En el caso de las fugas de aire y la caída de presión, se describirá una metodología a seguir para disminuir estos efectos adversos.

4.4.1. Programa para control de fugas

En el caso de Durman Esquivel, el estudio arrojó un 16,52 % en fugas, con un programa de control de fugas; este valor se debe reducir a un punto cercano al 10%; la aplicación de la metodología que se presenta a continuación ayudará a mantener un nivel bajo de fugas.

4.4.1.1. Determinar el nivel de fugas

El porcentaje de fugas, en términos de la capacidad del compresor, deberá ser menor al 10% si el sistema recibe un buen mantenimiento; de lo contrario, este porcentaje puede ser del orden de 20 o hasta 30% de pérdidas de la capacidad del compresor.

La mayoría de los compresores están dotados de medidores de tiempo que llevan un registro de los períodos de carga y no carga, por lo que un incremento en el período de carga para el mismo nivel de producción, indica que los niveles de fugas han aumentado.

4.4.1.2. Localizar las fugas

Debido a que la mayoría de las veces las fugas de aire comprimido son imperceptibles, inodoras y prácticamente imposibles de ver, se pueden emplear diferentes métodos. Existen aparatos para identificar fugas, la mejor forma para detectarlas es mediante la utilización de un detector acústico ultrasónico, el cual puede reconocer la alta frecuencia de los ruidos y sonidos asociados con las fugas de aire; también se recomienda utilizar agua con jabón y aplicar la mezcla en las áreas a inspeccionar; las fugas se encuentran en los lugares donde aparecen burbujas.

Las fugas pueden estar localizadas casi en cualquier parte del sistema; sin embargo, comúnmente se encuentran en: acoplamientos, mangueras, tubos, reguladores de presión, sellos de las tuberías y juntas en mal estado.

4.4.1.3. Eliminar las fugas encontradas

Eliminar una fuga puede ser tan sencillo como apretar bien una conexión o tan complejo como reparar el accesorio con falla; pero, en general, el gasto siempre es más económico que el costo de no hacerlo.

En ocasiones, para eliminar algunas fugas es necesario esperar hasta que se lleve a cabo un paro programado de la planta; mientras tanto se puede localizar o marcar las fugas con una señal de alerta y eliminarlas cuando el paro se presente.

En Durman Esquivel se acostumbra a hacer mantenimiento de la maquinaria por cada línea de producción; se recomienda este momento para hacer los cambios necesarios en la tubería.

4.4.1.4. Definir un programa de mantenimiento preventivo

El programa de mantenimiento preventivo consiste en una asignación temporal de las tareas del departamento de mantenimiento y sus respectivos insumos (mano de obra, materiales, herramientas, repuestos).

El programa de mantenimiento para la empresa consistirá básicamente en mantenimiento preventivo, ajustes, cambio de piezas, inspecciones y visitas.

El programa de mantenimiento contempla principalmente el tipo de mantenimiento preventivo. Aunque se pueden dar casos de tareas correctivas de mantenimiento, que se contemplan en los costos y el *stock* de repuestos.

4.4.1.4.1. Mantenimiento diario

Durante la producción, que es donde opera activamente la maquinaria de la planta, se deben realizar las siguientes actividades con frecuencia diaria:

- Inspección visual (buscar corrosión, desgaste, mangueras gastadas, juntas en mal estado) de líneas primarias, secundarias y de servicio
- Revisión de juntas (verificar que estén bien apretadas) en todas las líneas de aire comprimido
- Marcar fugas a ser reparadas en mantenimiento periódico

Como herramienta para realizar el mantenimiento diario, se propone el uso de las siguientes hojas de control para las labores de mantenimiento durante la operación diaria.

Tabla XXIV. Control de mantenimiento diario

Hoja de control de fugas (plan diario)							
Supervisor		Fecha		Hora			
Operario		Firma de operario					
No.	Tarea	Tubería	Herramientas	Fugas encontradas			Motivo
				Sí	No	Cantidad	
1	Revisión visual	T-8	Trapo, llave stilson, marcador				
2	Revisión visual	T-1					
3	Revisión visual	M1/M2					
4	Revisión visual	T-16					
5	Revisión visual	T-12					
6	Revisión visual	T-10					
7	Revisión visual	T-14					
8	Revisión visual	T-20					
9	Revisión visual	T-18					
Observaciones							

Fuente: elaboración propia.

4.4.1.4.2. Mantenimiento programado

Con el objetivo de simplificar la ejecución de las tareas de mantenimiento programado, este tipo de mantenimiento se realizará con frecuencia semanal y haciendo paros por líneas de producción; es decir, una semana cada línea productiva, durante el período de producción de la planta.

Antes de cortar la alimentación de aire se debe utilizar un detector acústico ultrasónico para encontrar las fugas imperceptibles al tacto, luego de esto se procede como se explica a continuación.

Antes y después del mantenimiento periódico, es necesario limpiar el área operacional de las máquinas, verificar el estado de la pintura y piezas de estructura (desgaste, desajuste). Verificar el desgaste en juntas y elementos de fijación (tuercas, tornillos, roscas, soldaduras).

En este tipo de mantenimiento se realizarán cambios de piezas completas (tubos, juntas, acoples, mangueras, etc.) con el fin de prevenir la falla en las piezas que muestren corrosión o desgaste.

Es importante identificar toda la herramienta que el equipo de trabajo utilizará, debido a que este incluirá un detector acústico ultrasónico, el cual resulta muy caro.

Como una herramienta de planificación y control, se recomienda el uso de las siguiente hojas de control para las actividades semanales.

Tabla XXV. Control de mantenimiento programado

MANTENIMIENTO PROGRAMADO					
Línea de producción		Hora		Duración	
Equipo de trabajo #		Supervisor		Firma supervisor	
Equipo utilizado					
No.	Tarea	Sí	No	Diámetro	Motivo
1	Cambio de tubería				
2	Cambio de uniones				
3	Cambio de mangueras				
4	Cambio de llaves de paso				
5	Corrección de soldadura				
6	Elementos de fijación				
7	Otros				
Observaciones					

Fuente: elaboración propia.

4.4.1.4.3. Stock de repuestos

Para finalizar el plan de mantenimiento se recomienda mantener un pequeño *stock* de repuestos para contar con la disposición de materiales de manera inmediata, si se requiriera. A continuación se presenta una tabla que detalla las cantidades de cada una de las piezas que se podrían utilizar.

Tabla XXVI. **Stock de repuestos**

No.	Repuesto	Cantidad
1	Tee 1/2"	5
2	Codo 1/2"	5
3	Válvula de compuerta 1/2"	5
4	Tubo 1/2" (6 metros)	1
5	Tee 3/4"	15
6	Codo 3/4"	15
7	Válvula de compuerta 3/4"	15
8	Tubo 3/4" (6 metros)	2
9	Tee 1"	5
10	Codo 1"	5
11	Válvula de compuerta 1"	5
12	Tubo 1" (6 metros)	1
13	Tee 2"	5
14	Codo 2"	5
15	Válvula de compuerta 2"	5
16	Tubo 2" (6 metros)	1

Fuente: elaboración propia.

4.4.2. Reducción de caída de presión

Es común encontrar que la mayoría de equipos y herramientas operan eficientemente con un suministro de aire de alrededor de 95 psi o menos. Esto lleva a concluir que es posible, en algunos casos, reducir la presión de descarga del sistema de compresión o reducir solamente la presión del sistema de distribución; en el mejor de los casos será posible reducir ambas presiones.

La caída de presión se calcula desde la salida del arreglo de compresores hasta el punto más alejado del mismo; en el presente capítulo se hicieron los cálculos pertinentes tomando en cuenta las consideraciones necesarias para tal caso. El valor máximo admisible para una caída de presión es del 10% del valor de presión a la salida del arreglo de compresores; el valor obtenido mediante los cálculos realizados en el capítulo anterior es de 13,69%, lo cual difiere en un 3,69%.

4.4.2.1. Reducción de la presión en la distribución

Se debe especificar la presión real que utilizarán los equipos; comúnmente se usa la presión promedio del sistema, lo que trae como resultado un alto costo en la operación del equipo; esto resulta en que los equipos trabajan a una presión menor de la que requieren.

El reducir la caída de presión en la distribución influye directamente en los niveles de fugas, lo que mejorará el desempeño global del sistema, aumentando con ello la capacidad del sistema. Por otro lado, se reducen los esfuerzos en los componentes de los equipos en operación, por lo tanto, si el sistema requiere cantidades significativas de aire comprimido, se debe especificar los equipos que operen con bajos niveles de presión; se recomienda utilizar reguladores de presión en los puntos que necesiten baja presión de funcionamiento.

El cambio en la presión puede requerir modificar o cambiar algunos componentes de acuerdo con nuevas presiones, tales como controladores, filtros y reguladores. Es importante hacer los cambios pertinentes para evitar que cualquier variación en la demanda cause una disminución en los puntos de uso y que los equipos no operen de forma adecuada.

4.4.2.2. Reducción de la presión en la compresión

A mayor presión mayor será el consumo de energía; se debe asegurar que el diseño del sistema de aire comprimido no haya considerado únicamente los requerimientos de presión máxima, sobre todo cuando unos cuantos usuarios serán los que utilicen esos niveles. Se debe revisar el desempeño del compresor a diferentes presiones de descarga.

Si realmente no existe problema con el compresor después de reducir la presión, se debe ajustar el control del mismo para la nueva demanda y de ser posible poder apagarlo o ponerlo en modo sin carga para obtener mayor reducción en el consumo de energía.

4.4.3. Eficiencia energética

Es necesario entender el concepto de eficiencia energética. En muchas ocasiones se puede confundir con la restricción del uso de este recurso, lo que está muy lejos de la realidad. La eficiencia energética se refiere al uso de la energía cuando realmente es necesario, es decir, lo que busca es optimizar el consumo, obteniendo el mismo resultado final.

La oportunidad de hacer eficiente el consumo de energía se puede manifestar de muchas formas y en una planta industrial se puede presentar el ahorro en los siguientes sistemas:

- Corrección de factor de potencia
- Sistema de iluminación
- Sistema de aire acondicionado
- Sistema de refrigeración
- Sistema hidráulico
- Sistema de aire comprimido

Para cada uno de los sistemas es necesario definir una relación entre lo que se produce y lo que se consume de manera eficiente. Un indicador de eficiencia es lo que se busca obtener de un estudio de ahorro de energía, ya que es este el que indica la manera en que opera el sistema.

La potencia específica es el indicador de eficiencia para un sistema de aire comprimido y este se explica a continuación.

4.4.3.1. Indicador de eficiencia

Para finalizar la propuesta se requiere de un último factor que ayude a definir el mejor o peor funcionamiento del sistema de aire comprimido. Es necesario contar con un indicador de eficiencia para proponer una mejora de la misma; a continuación se define la potencia específica de un sistema neumático y se explica cómo calcularlo.

La potencia específica es definida como la razón entre la potencia consumida en kilowatts (kW) y el flujo producido por el compresor en pies cúbicos por minuto (CFM), dada una presión de funcionamiento. La representación matemática de este parámetro se muestra a continuación.

$$\text{Potencia específica} = \frac{\text{Potencia consumida (kW)}}{\text{Flujo producido (CFM)}}$$

La potencia consumida es aquella tomada en caballos de fuerza en el eje de entrada del compresor; en la tabla XXIII de este capítulo se encuentra la descripción de estos datos.

El flujo producido se describe en la tabla XIV del presente informe y los porcentajes de utilización de cada motor, fueron determinados dadas las capacidades máximas de producción de aire comprimido de cada uno de los compresores que aparece en las placas de la maquinaria; esta información se detalla en la tabla que se muestra a continuación.

Tabla XXVII. **Flujo entregado**

Compresor	Flujo Máximo	% de utilización	Total consumido	Flujo entregado
1	135	24,32	408,21	99,28
2	135	24,32	408,21	99,28
3	135	24,32	408,21	99,28
4	150	27,03	408,21	110,34

Fuente: elaboración propia.

Los valores obtenidos anteriormente son los que se deben utilizar en la ecuación de potencia específica; se podría pensar que debe usarse el valor de aire tomando en cuenta las fugas de un 16,52 %, pero en este caso cabe resaltar que es un indicador de eficiencia que mide cuánto aire está siendo entregado de manera útil a los equipos en la planta; es por esta razón que se toma el valor de consumo de la tabla XIV.

La ecuación de potencia específica resulta de la siguiente manera con cada uno de los cuatro motores que se encuentran en el cuarto de compresores de la empresa:

$$\text{Potencia específica}_{\text{motor } 1} = \frac{28,83 \text{ kW}}{99,28 \text{ CFM}} = 0,2903 \text{ kW/CFM}$$

$$\text{Potencia específica}_{\text{motor } 2} = \frac{29,21 \text{ kW}}{99,28 \text{ CFM}} = 0,2942 \text{ kW/CFM}$$

$$\text{Potencia específica}_{\text{motor } 3} = \frac{27,93 \text{ kW}}{99,28 \text{ CFM}} = 0,2813 \text{ kW/CFM}$$

$$\text{Potencia específica}_{\text{motor 4}} = \frac{34,87 \text{ kW}}{110,34 \text{ CFM}} = 0,3160 \text{ kW/CFM}$$

El valor de la potencia específica se encuentra entonces promediando el resultado de esta variable en cada uno de los motores y es de 0.2955 kw/cfm, conociendo que el rango para que un equipo trabaje eficientemente se debe mantener entre 0,18 y 0,20 kw/cfm, se puede llegar a la conclusión de que el equipo usa más potencia para producir menos flujo de aire comprimido.

Luego del análisis, cálculo y comparación de datos, se puede decir que el sistema de aire comprimido de Durman Esquivel, Guatemala, cuenta con dos potenciales de ahorro principales.

El mantenimiento y administración de fugas es el área más vulnerable que se encontró en el estudio; el valor que alcanza es de un 16,52 %, lo cual es demasiado elevado, comparado con valores admisibles de entre 5% y 10%.

Por último, se pudo hacer la determinación técnica de no utilizar equipos de control, ya que la producción en Durman Esquivel es muy estable y por lo tanto su consumo eléctrico y neumático se comporta de la misma manera. Un sistema de control requiere que existan fluctuaciones notables en la red neumática y según los datos obtenidos, no se visualiza un comportamiento lo suficientemente variable.

Luego del estudio técnico de los potenciales de ahorro, se debe finalmente determinar si la aplicación de las medidas traerá beneficios económicos para la empresa.

5. ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO

El trabajo de recopilación y análisis de información no sería de utilidad para la empresa si no representara un beneficio económico a corto, mediano y largo plazo. Es necesario poder relacionar todos los conceptos explicados anteriormente con variables que representen unidades monetarias.

Para determinar la rentabilidad de la implementación de un proyecto es común utilizar una gran variedad de herramientas administrativas, como un análisis financiero, el cual tiene entre muchas de sus ventajas el permitir visualizar cómo se comportará a futuro la propuesta si de hecho se implementara.

En el presente capítulo se pretende analizar los aspectos económicos de la inversión que representa la propuesta de mejora de eficiencia energética. Algunas veces los datos se presentarán de manera tabulada para facilitar la visualización y proporcionar la información de una manera sintetizada.

El estudio económico ayudará a determinar qué tanto es posible ahorrar en la factura de electricidad mes a mes; es decir, será posible señalar en cuánto disminuyen los costos a los que está acostumbrada la empresa, de aplicarse las medidas propuestas en el capítulo anterior. Es necesario utilizar un factor que relacione las medidas mecánicas y neumáticas con el consumo eléctrico, para poder definir la cantidad de dinero que se gasta por mantener funcionando el sistema de aire comprimido; para esto se utilizará el concepto de potencia específica, explicado en el último inciso del capítulo anterior.

Debido a que se cuenta con la información de cuánto cuesta el kilowatt-hora, se podrá determinar el costo en quetzales de comprimir el aire. Esta información es descrita en la tabla siguiente, para obtener un valor más confiable se determinó el promedio del costo del kilowatt-hora de los primeros meses de operación de la planta en 2012.

Tabla XXVIII. **Costo del kilowatt-hora**

Mes	Q/kw-h total
Enero	1,59
Febrero	1,90
Marzo	1,94
Abril	1,88
Promedio	1,8275

Fuente: elaboración propia.

En Durman Esquivel la energía es adquirida directamente de la planta generadora de electricidad, motivo por el cual el precio varía un poco en relación con el precio comercial que es ofrecido a los clientes con propiedades residenciales.

5.1. Cálculo de costos

El costo total se describirá en los incisos que aparecen a continuación; es importante calcular el costo que genera la operación para el funcionamiento del sistema de aire comprimido, pero también es necesario tomar en cuenta los costos que se tienen por mal funcionamiento, lo cual ayudará a demostrar si el proyecto de inversión es viable desde un punto de vista financiero.

Es de suma importancia considerar los costos de la compra e instalación de equipos nuevos, así como de la implementación de nuevas metodologías de trabajo; a continuación se hacen los cálculos necesarios.

5.1.1. Costos de operación

Es la valoración monetaria de la suma de recursos destinados a la operación y funcionamiento de una empresa o unidad funcional de la misma.

5.1.1.1. Costo por fugas

Anteriormente se mencionó que las fugas encontradas en el sistema de aire comprimido son muy elevadas ya que alcanzan un valor de 16,52%; es decir, de la totalidad de la producción de aire se está desperdiciando cerca de una cuarta parte; afortunadamente con la implementación de un programa de control de fugas se puede mitigar este problema.

Si se tomara como aceptable el mayor valor de diseño para un sistema de aire comprimido que equivale a un 10%, se estaría afirmando que 6,52% de aire en el que ya se invirtió dinero para su compresión, se está escapando a la atmósfera y no está contribuyendo al proceso productivo.

Se sabe que en la empresa se trabaja 24 horas al día todo el mes, a excepción de paros repentinos o planificados para mantenimiento, motivo por el cual se tomará un mes comercial de 30 días.

Tomando en cuenta además que cada uno de los motores tiene un dato de potencia específica diferente, se tabularon los datos para que el cálculo del costo sea más realista.

Tabla XXIX. Costo por fugas

Motor	Potencia específica	CFM	participación	% de fugas	Potencia (kW)	kW-hora	Costo
1	0,2903	432,4	24,32%	6,52%	1,99	1,8275	2 618,99
2	0,2942		24,32%		2,02	1,8275	2 654,17
3	0,2813		24,32%		1,93	1,8275	2 537,79
4	0,3160		27,03%		2,41	1,8275	3 168,52
Total							10 979,48

Fuente: elaboración propia.

El costo por fugas mostrado anteriormente depende de varios factores; primero se puede observar que el consumo está dividido en cada uno de los motores, se debe recordar que las dimensionales de potencia específica son kw/cfm; si se multiplica este factor por el consumo total de la planta, incluyendo sus fugas, se podrá encontrar la potencia necesaria para que cada motor entregue el flujo requerido.

Además de esto, se debe tomar en cuenta el porcentaje de pérdida debido a fugas que se tienen en la planta, que ascienden a 6,52%. Luego de hacer las multiplicaciones necesarias se obtiene la potencia consumida por las fugas.

Adicionalmente a esto, se sabe que el costo del kW-hora es de Q. 1,8275. Se multiplica la potencia utilizada en fugas por el precio y la cantidad de horas que opera el equipo, ya que este opera 720 horas en el mes; se sabe luego de realizar las operaciones que el costo por fugas es de Q. 10 979,48.

5.1.1.2. Costo por caída de presión excesiva

La caída de presión no debe ser mayor del 10% entre la planta de compresión y el punto más alejado de consumo, por lo que se recomienda mantenerla entre 5 y 15 psi, como máximo.

Caídas de presión mayores a los valores señalados darán como resultado un desempeño pobre del sistema y, por lo tanto, un consumo excesivo de energía, ya que por cada 2 psi de caída de presión, se tendrá un aumento aproximado de un 1% en el costo equivalente de la potencia consumida por el compresor.

La caída de presión en la empresa tiene un valor de 13,69%; esto equivale a una caída de 16,43 psi, si se quisiera llegar a un valor normal bastaría con acercarlo a 15 psi, para que se encontrara en un valor de diseño aceptable.

Tabla XXX. Consumo total de compresores

Motor	Potencia específica	CFM	% de participación	Potencia consumida	Costo kW-hora	Costo
1	0,2903	432,4	24,32%	30,53	1,8275	40 168,55
2	0,2942		24,32%	30,94	1,8275	40 708,19
3	0,2813		24,32%	29,58	1,8275	38 923,23
4	0,3160		27,03%	36,93	1,8275	48 596,91
Total						168 396,89

Fuente: elaboración propia.

Si se aplicaran las medidas del capítulo anterior para reducir como mínimo 2 psi, se estaría ahorrando 1% del total consumido por los compresores y este valor asciende a Q. 1 683,96.

5.1.1.3. Costo del plan de mantenimiento

Para obtener los costos del plan de mantenimiento, se toman en cuenta todos los materiales e insumos de las tareas de mantenimiento diarias y programadas. Es necesario además contemplar que en los costos, se debe tomar en cuenta el tiempo utilizado por los trabajadores en las labores de mantenimiento.

De conformidad con el Acuerdo Gubernativo No. 359-2012, se establece que para trabajadores no agrícolas, el salario mínimo actual es de Q. 71,40 diarios.

El cálculo de la mano de obra por hora se desglosa como se muestra en la tabla XXVIII, donde los porcentajes de las prestaciones laborales son calculados sobre el devengado diario y luego sumados para obtener el total ganado durante un día; para obtener el costo por hora se divide el total entre 8 horas que corresponden a una jornada diurna normal.

Tabla XXXI. Costo de mano de obra

Mínimo no agrícola	Q 71.40	Desglose de costos de mano de obra (diario, por persona)								
7o. (diario)	Q 11.90	Bonificación (Q 250.00/30días)	IGSS PATRONAL (10,67%)	IRTRA (1%)	INTECAP (1%)	Indemnización (8,33%)	Bono 14 (8,33%)	Aguinaldo (8,33%)	Vacaciones (4,165%)	Total
Devengado diario	Q 83.30	Q 8.33	Q 8.89	Q 0.83	Q 0.83	Q 6.94	Q 6.94	Q 6.94	Q 3.47	Q 126.48
Costo por hora										Q 15.81

Fuente: elaboración propia.

Es necesario también hacer el cálculo de los materiales que serán utilizados en los mantenimientos de las piezas que con más frecuencia se cambian en las líneas de producción de la empresa.

A continuación se presenta una tabla de precios individuales y el luego aparece el costo del *stock* recomendado de los accesorios requeridos para las reparaciones.

Tabla XXXII. **Costo unitario de accesorios para reparaciones**

Accesorio	TEE	CODO 90º	Válvula de compuerta	Tubo de 6 metros
1/2"	Q 5,15	Q 4,50	Q 79,48	Q 82,48
3/4"	Q 6,00	Q 5,32	Q 100,89	Q 120,36
1"	Q 9,55	Q 9,50	Q 140,54	Q 172,28
2"	Q 27,26	Q 26,21	Q 360,25	Q 318,60

Fuente: departamento de ventas DIDELESA, Calzada Roosevelt Guatemala.

Para obtener el costo por repuestos utilizados mensualmente se toman en cuenta principalmente dos elementos: el costo por almacenamiento y de los repuestos propiamente dicho.

El costo por almacenamiento se estimará en un 5% del valor de los repuestos, los costos por limpieza y luz eléctrica (cantidad estimada de Q. 60,00 mensuales). Si se considera que se cambiarán mensualmente 3 accesorios de cada uno de los diferentes diámetros, se tiene un total de Q. 2 500,15; es importante mencionar que los tubos de 6 metros de cualquier medida serán considerados como imprevistos, ya que su cambio se considera más severo y menos frecuente que el de los accesorios.

Ahora que se cuenta con el costo de un operario por hora y el costo por repuestos, se puede hacer un estimado de cuánto cuesta cada uno de los diferentes tipos de mantenimiento. Primero se mostrará el costo de mantenimiento diario e inmediatamente después se muestra el costo del mantenimiento programado.

El costo de materiales para el mantenimiento diario incluye el precio de una libra de *wipe* que asciende a Q. 6,50 y un estimado del desgaste de piezas y marcadores, lo cual resulta en un total de Q.10,00.

Tabla XXXIII. **Costo de mantenimiento diario**

	Descripción	Cantidad	Costo/hora	Costo total
DIARIO	Mano de obra	3	Q 15,81	Q 47,43
	Materiales	Trapos, llaves y marcadores		Q 10,00
TOTAL				Q 57,43

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Costo de mantenimiento programado**

	Descripción	Cantidad	Costo/hora	Costo total
PROGRAMADO	Mano de obra	6	Q 15,81	Q 94,86
	Materiales	Tres cambios de cada uno de los accesorios		Q 253,86
	Imprevistos	Cambio de tubo completo		Q 150,00
TOTAL				Q 498,72

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con todos los análisis descritos anteriormente, se obtiene un total de los costos de operación; el costo del mantenimiento individual al mes asciende a un total de Q. 1 722,90, tomando los 30 días del mes; de manera similar, el mantenimiento programado suma una cantidad de Q. 1 994,88 tomando las cuatro semanas del mes. El total del mantenimiento en un mes resulta Q. 3 717,78. Los costos calculados en las fugas y en la caída de presión serán considerados como ahorro para la empresa, ya que de implementar las medidas descritas en el capítulo anterior, se estima que se puede dejar de gastar esa cantidad de dinero mensualmente.

5.1.2. Costos de inversión

Para complementar todas las consideraciones que se han tomado en cuenta en el presente informe, se debe además poner especial atención a los equipos y gastos que se deben hacer para poner en práctica la propuesta de mejora de eficiencia energética.

Teniendo en cuenta la implementación de los mantenimientos diarios y programados, se recomienda mantener un *stock* de repuestos; el costo asociado a esta propuesta se presenta en la siguiente tabla.

Tabla XXXV. **Costo de *stock* inicial**

No.	Repuesto	Cantidad	Costo	Total
1	Tee 1/2"	5	Q 5.15	Q 25.75
2	Codo 1/2"	5	Q 4.50	Q 22.50
3	Válvula de compuerta 1/2"	5	Q 79.48	Q 397.40
4	Tubo 1/2" (6 metros)	1	Q 82.48	Q 82.48
5	Tee 3/4"	15	Q 6.00	Q 90.00
6	Codo 3/4"	15	Q 5.32	Q 79.80
7	Válvula de compuerta 3/4"	15	Q 100.89	Q 1,513.35
8	Tubo 3/4" (6 metros)	2	Q 120.36	Q 240.72
9	Tee 1"	5	Q 9.55	Q 47.75
10	Codo 1"	5	Q 9.50	Q 47.50
11	Válvula de compuerta 1"	5	Q 140.54	Q 702.70
12	Tubo 1" (6 metros)	1	Q 172.28	Q 172.28
13	Tee 2"	5	Q 27.26	Q 136.30
14	Codo 2"	5	Q 26.21	Q 131.05
15	Válvula de compuerta 2"	5	Q 360.25	Q 1,801.25
16	Tubo 2" (6 metros)	1	Q 318.60	Q 318.60
TOTAL				Q 5,809.43

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, se recomienda comprar equipos para detectar fugas imperceptibles al oído y al tacto para minimizar el riesgo de operar con pérdidas excesivas, el dispositivo seleccionado para este fin se denomina detector acústico ultrasónico; a continuación se presenta una imagen del aparato seleccionado.

Figura 27. **Detector acústico ultrasónico**



Fuente: <http://www.reliabilitydirectstore.com/SKF-CMIN-400-K-Inspector-400-Ultrasonic-Probe-p/skf-cmin%20400-k.htm>. Consulta: 15 de diciembre de 2012.

El aparato de la figura anterior fue el seleccionado por el autor del presente trabajo por ser el que mejor cumple con las características requeridas para el control y administración de fugas.

El dispositivo se encarga de detectar las fugas y por medio de una pantalla señala la intensidad de ruido que se escucha; el costo de esta herramienta es de Q. 20 000,00 en Estados Unidos incluyendo sus impuestos; tomando en cuenta que el transporte de estos equipos es bastante delicado, se asigna un valor de Q. 3 500,00. Finalmente los impuestos para entrar a Guatemala se sabe que serán un 20% extra del precio total, incluyendo el transporte; se calcula que tener el dispositivo en la ciudad de Guatemala costará la cantidad de Q. 28 200,00.

Se recomienda adquirir 2 de estos equipos debido al gran tamaño de la planta de Durman Esquivel, la inversión en detectores de fugas será de Q 56 400,00.

5.2. Cálculo estimado de ahorro

El costo total descrito anteriormente se considera como la inversión inicial para la implementación de las mejoras al sistema de aire comprimido, y el ahorro teórico expuesto anteriormente, es aquel que se verá reflejado en el recibo del consumo eléctrico mes a mes, una vez se hayan implementado todas las propuestas.

El ahorro que se tiene previsto proviene de dos focos de pérdida que se encuentran en la empresa. Las fugas generarán una cantidad de ahorro que asciende a Q. 10 979,48 (ver inciso 5.1.1.1); por su parte el arreglo de la caída de presión dará como resultado Q. 1 683,96 de ahorro (ver inciso 5.1.1.2). La suma de los ahorros resulta un total de Q. 12 663,44.

Además de esto, se tiene previsto en el inciso 5.1.1.3 que el costo mensual de mantenimiento preventivo será de Q. 3 717,78 asignado para acciones que eviten que las fugas salgan de sus límites.

Adicionalmente se sabe que el desembolso de efectivo inicial para la inversión será de Q. 56 400,00; el costo del primer inventario es de Q. 5 809,43. Todos los costos y ahorros descritos anteriormente se detallan en la siguiente tabla.

Tabla XXXVI. **Resumen de ahorros y costos**

Costo asociado para la implementación de mejoras:	Costo total	Ahorro percibido de la implementación de mejoras:	Ahorro total
Inversión inicial	Q 56 400,00	Consumo de energía eléctrica (mensual)	Q 12 663,44
<i>Stock</i> de piezas inicial	Q 5 809,43		
Mantenimiento diario	Q 1 722,90		
Mantenimiento programado	Q 1 994,88		
Mantenimiento de inventario	Q 2 500,15		
TOTAL	Q 68 427,36	TOTAL	Q 12 663,44

Fuente: elaboración propia.

5.3. Cálculo de índices financieros

Los índices financieros son herramientas que permiten evaluar la rentabilidad de un proyecto y analizar el comportamiento de las inversiones, de los gastos y/o ahorros a lo largo del tiempo.

Es necesario evaluar la rentabilidad de un proyecto, los beneficios y los costos se ven afectados por una tasa de interés; en este caso la tasa mínima atractiva de rendimiento (TMAR), la cual, es el porcentaje que como mínimo

desea trabajar el inversionista para un proyecto, y está compuesta por la suma de una tasa pasiva, una de ganancia y una de inflación como se muestra a continuación.

$$\text{Tasa del proyecto} = i + i_g + i_f$$

Donde:

i = tasa pasiva, tasa mínima que se puede ganar por el uso del dinero

i_f = tasa de inflación interanual

i_g = tasa de ganancia

La tasa pasiva es el porcentaje que paga un banco a quien deposita dinero en una cuenta, generalmente el porcentaje está entre un 2% y 6%; dependiendo de la cantidad, se usará el porcentaje de tasa pasiva de 5% que aparece en los datos del Banco de Guatemala a febrero de 2013.

La inflación determina la variación de los precios de los materiales que se utilizarán para la propuesta de mejora del sistema de aire comprimido; este valor se aproximará a un 4,5% del valor original de 4,18% a febrero de 2013 reportado por el banco de Guatemala.

El beneficio representa la oportunidad que se tiene de invertir en otros proyectos, generalmente se adopta un valor de entre 10% a 15%. Para esta propuesta se manejará el 12,5%. De lo anterior se tiene el siguiente dato:

$$\text{Tasa del proyecto} = 4,5\% + 12,5\% + 5\% = 22\%$$

La tasa de interés anual que se utilizará para evaluar la rentabilidad del proyecto será del 22% anual o su equivalente 1,83% mensual.

5.3.1. Valor Presente Neto

El Valor Presente Neto es una medida del beneficio que rinde un proyecto de inversión a través de su vida útil; se define como el valor presente de su flujo de ingresos futuros menos el valor presente de su flujo de costos. Es un monto de dinero equivalente a la suma de los flujos de ingresos netos que generará el proyecto en el futuro.

El método del valor presente neto proporciona un criterio de decisión preciso y sencillo. Se deben realizar solo aquellos proyectos de inversión que actualizados a la tasa de descuento relevante, tengan un valor presente neto igual o superior a cero. Para hacer el cálculo del VPN se utiliza la siguiente relación:

$$\text{VPN} = \text{VPB} - \text{VPC}$$

Donde:

VPN = valor presente neto

VPB = valor presente de beneficios

VPC = valor presente de costos

Es necesario utilizar factores de anualidad para poder calcular el valor del dinero en el presente, como se muestra a continuación:

$$P = A(P/A, i, n)$$

$$(P/A, i, n) = \frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n}$$

Donde:

$(P/A, i, n)$ = factor de multiplicación

P = valor presente

A = valor de la anualidad

i = tasa de interés

n = número de periodos del proyecto

Se calcula del valor presente neto para la implementación de las mejoras al sistema de generación y distribución del aire comprimido de la siguiente manera:

Calculando el VPB:

$$VPB = A * (P/A, i, n)$$

$$VPB = A * \left[\frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n} \right]$$

$$VPB = (12\ 663,44) * \left[\frac{(1 + 1,83)^{12} - 1}{1,83 * (1 + 1,83)^{12}} \right]$$

$$VPB = (12\ 663,44) * (10,71)$$

$$VPB = Q.135\ 615,96$$

Calculando el VPC:

$$\text{VPC} = \text{Inversion inicial} + A * \left[\frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n} \right]$$

$$\text{VPC} = 62\,209,43 + (6\,217,93) * \left[\frac{(1 + 1,83)^{12} - 1}{1,83 * (1 + 1,83)^{12}} \right]$$

$$\text{VPC} = 62\,209,43 + (6\,217,93) * (10,71)$$

$$\text{VPC} = \text{Q. } 128\,803,46$$

De acuerdo con los cálculos anteriores y las ecuaciones mostradas anteriormente, se tiene lo siguiente:

$$\text{VPN} = \text{VPB} - \text{VPC}$$

$$\text{VPN} = \text{Q. } 135\,615,96 - \text{Q. } 128\,803,46$$

$$\text{VPN} = \text{Q. } 6\,812,50$$

El valor del VPN es positivo, lo que indica que si se implementara la propuesta de mejora de eficiencia energética se obtendría un beneficio económico, es decir, la implementación del proyecto es rentable.

5.3.2. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno es el criterio preferido para distribuir recursos limitados proporcionalmente a proyectos prioritarios y para comparar con la tasa

de oportunidad y ver si el rendimiento de la inversión es suficientemente alto para justificar el proyecto.

Para encontrar este porcentaje, se determina el interés con el que se obtiene un valor presente neto positivo y un valor presente neto negativo, y mediante la siguiente ecuación, se define aquel en el que el proyecto estará en equilibrio.

$$TIR = \frac{(\%Mayor - \%Menor) \times VPN(-)}{VPN(+) + |VPN(-)|} + \%Mayor$$

La ecuación que se debería resolver para encontrar el valor de la tasa de interés que matemáticamente hace cero el valor presente neto es la siguiente:

$$VPN = 12\,663,44 * \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] - \left[62\,209,43 + 6\,217,93 * \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \right]$$

Calculando con tasa de interés de 3.5%:

$$VPN = 12\,663,44 * \left[\frac{(1+0,035)^{12} - 1}{0,035 * (1+0,035)^{12}} \right] - \left[62\,209,43 + 6\,217,93 * \left[\frac{(1+0,035)^{12} - 1}{0,035 * (1+0,035)^{12}} \right] \right]$$

$$VPN = Q. 54,20$$

Calculando con tasa de interés de 4.5%:

$$VPN = 12\,663,44 * \left[\frac{(1+0,045)^{12} - 1}{0,045 * (1+0,045)^{12}} \right] - \left[62\,209,43 + 6\,217,93 * \left[\frac{(1+0,045)^{12} - 1}{0,045 * (1+0,045)^{12}} \right] \right]$$

$$VPN = Q. -1\,750,55$$

Con los valores obtenidos anteriormente se procede a calcular la Tasa Interna de Retorno (TIR) de la siguiente manera:

$$TIR = \frac{(4,0 - 3,5) \times (-1\,750,55)}{54,20 + |-1\,750,55|} + 4$$

$$TIR = 3,52\%$$

Este valor es la Tasa Interna de Retorno; esto quiere decir que la tasa mínima con la que la empresa debe trabajar para que sus flujos de beneficios no sean menores que los flujos de costo en la implementación de las mejoras al sistema de aire comprimido es de 42,24%, equivalente a multiplicar el porcentaje encontrado anteriormente de 3,52% por 12 meses, que sería el porcentaje de interés anual.

5.3.3. Período de recuperación

El tiempo en el que la inversión realizada en el desarrollo del proyecto se recupera y comienza finalmente a generar ganancias es denominado periodo de recuperación y es aquel momento en el que los costos son menores que los beneficios.

A continuación se presenta una tabla que muestra el detalle de lo que pasa con el dinero cada mensualidad, el momento en que el VPN deja de ser negativo es el tiempo necesario para recuperar el dinero invertido.

Tabla XXXVII. **Periodo de recuperación**

Anualidad	Inversión inicial	VPB	VPC	VPN
0	-62 209,43	0,00	0,00	-62 209,43
1	-62 209,43	12 435,86	6 106,19	-55 879,75
2	-62 209,43	24 648,24	12 102,64	-49 663,83
3	-62 209,43	36 641,15	17 991,33	-43 559,61
4	-62 209,43	48 418,53	23 774,19	-37 565,09
5	-62 209,43	59 984,26	29 453,13	-31 678,30
6	-62 209,43	71 342,14	35 030,01	-25 897,30
7	-62 209,43	82 495,90	40 506,67	-20 220,20
8	-62 209,43	93 449,22	45 884,90	-14 645,11
9	-62 209,43	104 205,70	51 166,49	-9 170,22
10	-62 209,43	114 768,87	56 353,15	-3 793,72
11	-62 209,43	125 142,20	61 446,61	1 486,16
12	-62 209,43	135 329,12	66 448,53	6 671,16

Fuente: elaboración propia.

El décimo mes, luego de la inversión inicial, es el último en el que se tiene pérdida, después se puede observar que en el onceavo mes la propuesta obtiene una utilidad de Q. 1 486,16, es decir, que si se continúa con los cambios adaptados en la propuesta, se obtendrá un retorno aún mayor.

CONCLUSIONES

1. Por medio del diagnóstico del sistema de aire comprimido, se determinaron las condiciones actuales a las que se encuentra trabajando el sistema, entre las que se enumeran las siguientes: la pérdida de aire comprimido en fugas es de un 16,52 % y el valor aceptable para fugas no debe sobrepasar un 10%; el porcentaje de pérdida de presión promedio que existe entre el sistema de generación y la red de distribución es de 14,9%, lo cual muestra que se encuentra en un rango aceptable muy cerca de la condición ideal de entre 5% y 10%.
2. Cuando se hace la entrega de los compresores el consumo eléctrico respecto de la demanda y potencia específica, corresponde al valor promedio de 0,2955 kw/cfm y para que un equipo trabaje eficientemente se debe mantener entre 0,18 y 0,20 kw/cfm; por lo tanto el sistema de aire comprimido actualmente trabaja ineficientemente.
3. La metodología para un diagnóstico energético no está siempre definida, sin embargo, los puntos estratégicos que siempre son utilizados para determinar los potenciales de ahorro de energía son los siguientes: trabajos previos, recopilación de la información, evaluación del estado energético, determinación del potencial de ahorro, evaluación económica de las medidas, selección de las medidas y aplicación de las acciones.

4. Las herramientas necesarias para la evaluación energética de los equipos de aire comprimido son instrumentos mecánicos y electrónicos para tomar las lecturas de las variables, pero cabe resaltar que la herramienta más importante es la correcta documentación e interpretación de la información para el éxito de un estudio de consumo de energía.
5. Es de suma importancia para el sistema de aire comprimido que los mantenimientos programados se lleven a cabo en los periodos y fechas establecidas por el proveedor de estos equipos, ya que son vitales para el proceso productivo. La metodología fue determinada por la empresa ajena a las operaciones de Durman Esquivel y especializada en el manejo de estos equipos
6. Económicamente se puede observar en el último capítulo del presente trabajo que se obtiene beneficio, ya que el costo mensual asociado a la propuesta suma un total de Q. 6 217,93, el beneficio mensual calculado al implementar todas las mejoras, resulta de la suma del ahorro generado por el control de fugas y el control de la caída de presión que asciende a Q. 12 663,44; es decir, que si se obtiene la diferencia entre el costo y el beneficio, cada mes se tendría un ahorro de Q. 6 445,51.
7. Desde el punto de vista financiero se puede afirmar que también se obtuvo un beneficio, ya que luego de la evaluación del proyecto por medio del método del Valor Presente Neto o VPN, resultó un valor positivo del mismo, el cual corresponde a la cantidad de Q. 6 812,50, luego de una inversión inicial que asciende a Q. 62 209,43.

8. Existe una gran cantidad de equipos que hacen eficiente el funcionamiento de los sistemas neumáticos, sin embargo, no todos los dispositivos son aptos para determinado sistema de aire comprimido; es decir, no es posible identificar una lista específica de dispositivos que mejore a todas las instalaciones neumáticas. En el caso de la empresa estudiada, se encontró que un sistema de control (variador de frecuencia, PLC, panel de control, etc.) no era el más adecuado pero sí implementar un programa de control de fugas incluyendo los dispositivos denominados detectores acústicos ultrasónicos para minimizar la pérdida de aire.

RECOMENDACIONES

1. Asignar una persona que se dedique a controlar y dirigir todas las acciones relacionadas con el ahorro de energía, que sea encargada de promover y concientizar a todo el personal de la importancia de adoptar este tipo de cultura en una empresa.
2. Invertir en capacitación sobre ahorro energético a los mandos gerenciales de la empresa, ya que serán los encargados de dar el ejemplo a todo el personal operativo.
3. Continuar con estudios de ahorro de energía, debido al crecimiento desmedido de la demanda de energética y el aumento de precios en las tarifas eléctricas.
4. Realizar un estudio integral que incluya todas las áreas que consumen energía en la empresa (iluminación, aire acondicionado, sistema hidráulico, etc.).
5. Analizar y comparar periódicamente los índices de eficiencia (potencia específica, nivel de fugas, caída de presión) que se utilizaron para el presente informe ya que es en el control riguroso que se encuentra gran parte del ahorro.

6. Analizar todas las modificaciones que se deseen aplicar al sistema de aire comprimido antes de realizarlas, debido a que una carga que no aparece en el diseño inicial de la instalación generará mayores pérdidas; se recomienda planificar todas las modificaciones que se deseen implementar.

BIBLIOGRAFÍA

1. AROCHA RECINOS, Rodolfo René. *Análisis de riesgos y propuesta de mejora del sistema de generación y distribución de aire comprimido aplicado en la industria de la elaboración de premezclas para la nutrición animal*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería, 2011. 193 p.
2. ÁVILA, Alvaro. *Manual del profesional del aire comprimido*. [Manual de clase]. Guatemala: USAC, 2011. 90 p.
3. BLANK, Leland; TARQUIN, Anthony. *Ingeniería económica*. Enríquez Brito, Javier (trad.). 6a ed. México: McGraw-Hill, 2006. ISBN: 9789701056080. 816 p.
4. CARNICER ROYO, Enrique. *Aire comprimido: teoría y cálculo de las instalaciones*. Madrid: Paraninfo, 1991. 320 p.
5. CENGEL, Yunus; BOLES, Michael. *Termodinámica*. Cordero Pedraza, Carlos Roberto; Moreno Chávez, Norma Angélica (trads.). 5a ed. México: McGraw-Hill, 2006. 988 p. ISBN: 9789701056110.
6. CHAPMAN, Stephen. *Máquinas eléctricas*. De Robina Cordera, Carla (trad.). 4a ed. México: McGraw-Hill, 2004. 746 p. ISBN: 9701049470.

7. CROWE, Clayton; ELGER, Donald; ROBERTSON, John. *Mecánica de fluidos*. Romo, Jorge H., (trad.). 7a ed. México: CECSA, 2002. 711 p. ISBN: 9702403278.
8. FIDE. *Seminario de promotores de ahorro y eficiencia de energía eléctrica*. [Curso-taller]. Guatemala: CNEE, 2010. 158 p.
9. GUERRERO SPÍNOLA, Alba Maritza. *Formulación y evaluación de proyectos*. Guatemala: USAC, 2004. 110 p.
10. HELLRIEGEL, Don; JACKSON, Susan; SLOCUM, John. *Administración, un enfoque basado en competencias*. Mascaró Sacristán, Pilar (trad.). 11a ed. México: Cengage, 2010. 627 p. ISBN: 9789708300674.
11. MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2a ed. México: Alfaomega, 2011. 660 p. ISBN: 9789701510575.
12. MÉNDEZ MARTÍNEZ, Víctor Manuel. *Mejoramiento de la red de aire comprimido en la planta de clavos y alambre de la empresa Aceros de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 108 p.
13. RODAS ARREAGA, Edwin Estuardo. *Estudio de aire comprimido de Henkel La Luz S.A.* Trabajo de graduación de Magister en Artes de Ingeniería de Mantenimiento. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Estudios de Posgrado, 2007. 43 p.

14. RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ, Ervin Joel. *Diseño de la línea de aire comprimido para herramienta neumática en la empresa Turboservicios de C.A., S.A.* Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 81 p.
15. SERVENS, William Harrison.; DEGLER, H.E.; MILES, J.C. *La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases.* Batlle Gayán, José (trad.). 5a ed. México: Reverté, 1992. 503 p. ISBN: 9686708227.
16. SOTO VÁSQUEZ, Ana Andrea. *Propuesta de rediseño de la red de aire comprimido de industrias Ceresita S.A.* Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de Talca de Chile, Facultad de Ingeniería, 2005. 217 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos recopilados de presión, primera toma

Fecha: 02/03/2012		Hora: 7:00 a.m
DATO	Presión suministro (in Hg)	Presión planta (psi)
1	235	98
2	227	89
3	239	94
4	237	97
5	228	99
6	243	90
7	227	96
8	232	94
9	241	98
10	244	86
11	224	94
12	240	91
13	240	98
14	244	89
15	226	98
16	243	94
17	240	86
18	226	98
19	229	98
20	226	89
21	243	100
22	231	93
23	235	88
24	236	95
25	225	94

Continuación del anexo 1.

26	238	92
27	237	86
28	228	103
29	236	99
30	238	102
31	237	93
32	242	90
33	228	101
34	228	95
35	239	93
36	236	87
37	242	101
38	230	94
39	232	85
40	233	87
41	243	96
42	225	95
43	233	97
44	242	91
45	232	90
46	239	102
47	230	103
48	241	93
49	231	85
50	243	97

Fuente: recolección de datos.

Anexo 2. Datos recopilados de presión, segunda toma

Fecha: 02/03/2012		Hora: 12:00 p.m
DATO	Presión suministro (in Hg)	Presión planta (psi)
1	234	100
2	243	97
3	233	94
4	240	96
5	231	101
6	242	91
7	243	99
8	231	93
9	238	97
10	229	105
11	237	100
12	239	92
13	238	96
14	243	98
15	229	92
16	227	99
17	238	100
18	235	95
19	231	100
20	232	101
21	242	96
22	224	91
23	230	95
24	242	97
25	234	96
26	226	93
27	238	97
28	236	98
29	227	96
30	242	95
31	226	92

Continuación de apéndice 2.

32	231	99
33	240	92
34	243	99
35	223	98
36	239	92
37	239	101
38	243	98
39	225	98
40	242	91
41	241	93
42	227	94
43	230	96
44	227	93
45	244	96
46	232	100
47	236	94
48	237	96
49	226	94
50	239	102

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Datos recopilados de presión, tercera toma

Fecha: 02/03/2012		Hora: 5:00 p.m
DATO	Presión suministro (in Hg)	Presión planta (psi)
1	242	94
2	241	98
3	227	86
4	230	101
5	227	95
6	244	93
7	237	98
8	239	100
9	238	93
10	242	88
11	226	95
12	231	98
13	240	89
14	243	100
15	223	93
16	239	88
17	239	95
18	231	98
19	235	93
20	236	90
21	225	101
22	243	95
23	225	97
24	242	95
25	241	96
26	227	95
27	230	97
28	227	91
29	244	99
30	232	85
31	236	87

Continuación de apéndice 3.

32	237	96
33	226	95
34	239	97
35	242	91
36	230	87
37	232	95
38	233	93
39	243	87
40	225	93
41	233	96
42	236	95
43	227	95
44	242	94
45	226	92
46	231	86
47	240	103
48	243	99
49	237	90
50	240	95

Fuente: recolección de datos