

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS ESTADO DE MEXICO



**AHORRO DE ENERGÍA
EN LOS SISTEMAS NEUMÁTICOS INDUSTRIALES**

TESIS QUE PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DE MANUFACTURA
PRESENTA

HÉCTOR MANUEL CORONA GÓMEZ

Asesor: Dr. SADEGH BABAI KOCHEKSERAI

Comité de tesis: Dr. SADEGH BABAI KOCHEKSERAI
Dr. ULISES FIGUEROA LOPEZ
Dr. ARMANDO AMADO BRAVO ORTEGA

Jurado:	Dr. ARMANDO AMADO BRAVO ORTEGA	Presidente
	Dr. ULISES FIGUEROA LOPEZ	Secretario
	Dr. EMIL R. LIEBERMAN GALLEGILLOS	Vocal
	Dr. SADEGH BABAI KOCHEKSERAI	Vocal

Atizapán de Zaragoza, Edo. Méx., 23 de Noviembre de 2007.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres el apoyo que siempre me han brindado para la continuación de mis estudios, así como a mi esposa por las palabras de aliento y paciencia para la culminación de la maestría.

Así mismo, quiero agradecer a mis profesores por el apoyo y facilidades que siempre me brindaron para culminar el presente posgrado.

A Festo, empresa donde he podido desarrollar este proyecto y al personal que me brindó las facilidades para alcanzar los objetivos tanto de mi trabajo como de esta maestría.

RESUMEN

Durante muchos años el aire comprimido no ha tenido prioridad en el tema de optimización y mucho de esto se debe a que no se tiene la cultura de evaluar y tampoco se sabe el costo de este recurso en las aplicaciones neumáticas. Una de las reacciones por parte de las empresas cuando se comienza a desperdiciar el aire comprimido en los mismos usos o aplicaciones, es la adquisición de más compresores y esto impacta al costo de operación y a la competitividad que hoy en día deben de tener las empresas.

En estos tiempos es importante dirigir esfuerzos hacia la disminución de los consumos energéticos dentro de las industrias. Uno de los recursos caros que actualmente tiene la industria es la producción del aire comprimido. El costo se eleva por la cantidad y la magnitud de los compresores que existen en la industria, en promedio, los consumos de energía eléctrica de estas áreas son muy fuertes y muchas veces representan hasta las 2/3 partes del consumo total de energía en una planta.

Por lo cual en esta tesis se presentará una metodología para evaluar, diagnosticar y cuantificar el consumo de aire comprimido en los sistemas neumáticos, actividades y/o tecnologías para optimizar y/o corregirlo, incluyendo actividades para prevenir que los equipos o aplicaciones vuelvan a caer en situaciones críticas de desperdicios.

ABSTRACT

For many years the compressed air did not have an important place in the industrial optimization processes and much of this is partly cultural. The other part has been that the cost of this resource in the pneumatic applications also is not known. Companies' first reaction, when encountering the waste of the compressed air in their processes or applications, would be the acquisition of more compressors thus directly influencing operating costs and their market competitiveness.

The current trend within the industry, however, has been to reduce power consumption by eliminating the sources of waste. The production of compressed air has been becoming one of the major expenses of companies utilizing compressed air as other sources of waste being diminished. The cost rises by the number of compressors being used and their capacity. Their consumptions of electrical energy is high and often they could represent up to two thirds of the total energy consumption in a plant.

Thus in this thesis will develop a methodology to evaluate, to diagnose and to quantify the compressed air consumption in the pneumatic systems and like also activities and technologies to optimize and to correct its usage. The thesis will also present measures to prevent that the equipment or applications returns to their previous wasteful state.

CONTENIDO

Lista de figuras	9
Lista de tablas	11
Abreviaturas y símbolos	12

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes	13
1.2 Objetivos	13
1.2.1 General	14
1.2.2 Específicos	14
1.3 Justificación	15
1.3.1 Significado del problema	15
1.3.2 Análisis del problema	15
1.3.3 Pérdidas de Aire Comprimido en equipos neumáticos	19
1.3.4 Áreas de Ahorro en los sistemas neumáticos	20
1.4 Estructura de tesis	22
1.4.1 Marco teórico	22
1.4.2 Metodología para optimizar el uso del aire comprimido en los sistemas neumáticos	22
1.4.3 Caso de estudio	23
1.4.4 Conclusiones	23

Capítulo 2

Marco teórico

Generación de Aire Comprimido

2.1 Aire Comprimido	24
2.2 Principios termodinámicos	25
2.2.1 Ley de Boyle Mariotte	25
2.2.2 Ley de Charles - Gay Lussac	25
2.2.3 Ley de los gases ideales	26
2.3 Procesos termodinámicos	27
2.3.1 Primera ley de la termodinámica	27
2.3.2 Proceso isobárico	28
2.3.3 Proceso isotérmico	29
2.3.4 Proceso politrópico	30
2.3.5 Proceso isentrópico	31

2.4 Compresión	31
2.4.1 Compresión ideal	32
2.4.2 Compresión real	33
2.4.3 Compresión de una etapa	34
2.4.4 Compresión de dos etapas	35
2.5 Clasificación de compresores	36
2.5.1 Clasificación de compresores de desplazamiento	37
2.5.2 Compresores rotativos	39
2.5.3 Compresores dinámicos	40
2.6 Red de distribución de aire comprimido	42
2.6.1 Parámetros para la instalación de un sistema de aire comprimido	42
2.6.2 Componentes principales de una red de aire	42
2.6.3 Determinación del caudal	43
2.6.4 Pérdida de presión en una red de aire comprimido	47
2.6.5 Material para la tubería	47
Sistemas Neumáticos	
2.7 Elementos de un sistema neumáticos	48
2.7.1 Válvulas neumáticas	49
2.7.2 Actuadores neumáticos	50
2.7.2.1 Tipo de actuadores	50
2.7.2.2 Velocidad de accionamiento	52
2.7.2.3 Amortiguamiento	52
2.7.2.4 Trabajo mecánico	53
2.7.2.5 Fuerza de empuje	53
2.7.2.6 Diagrama presión-fuerza	54
2.7.2.7 Diagrama de pandeo	55
2.7.2.8 Diagrama de consumo de aire	56
Equipos para medición	
2.8 Instrumentos de medición	57
2.8.1 Medición de presión	57
2.8.1.1 Elemento mecánico	58
2.8.1.2 Elemento electromecánico	58
2.8.2 Medidores de caudal	58
2.8.2.1 Medidores volumétricos	58
2.8.3 Flujómetros	61
2.8.3.1 Descripción del flujómetro VSM3K	62
2.8.3.2 Equipo de apoyo para detección de fugas	64

Capítulo 3

Metodología para lograr ahorros en el aire comprimido

3.1 Detectar áreas de oportunidad	66
3.1.1 Seleccionar empresas y áreas	66
3.1.2 Seleccionara máquinas y/o procesos	67
3.2 Determinar el costo del aire comprimido	68

3.2.1	Calculo del costo del aire comprimido	71
3.3	Seleccionar equipo para análisis	76
3.3.1	Seleccionar hardware	77
3.3.2	Seleccionar software	78
3.3.3	Inversión para el equipo de medición	79
3.3.4	Capacitación para el equipo de medición	79
3.4	Medir a pie de máquina	79
3.4.1	Programar mediciones	79
3.4.2	Instalar equipo de medición en máquina	80
3.4.3	Tomar mediciones pie de máquina	80
3.4.4	Detectar mejoras en máquina seleccionada	81
3.4.5	Tomar datos de tiempo	80
3.5	Analizar ahorros y tomar decisiones	82
3.5.1	Introducción	82
3.5.2	Ubicar máquinas analizadas en un croquis	82
3.5.3	Promediar mediciones estáticas y dinámica	83
3.5.4	Calcular cantidad de desperdicios	85
3.5.5	Calcular el costo estimado del aire desperdiciado	86
3.5.6	Describir mejora	89
3.5.7	Inversión estimada	89
3.5.8	Retorno de inversión	90
3.5.9	Gráficas de consumo – presión	90
3.5.10	Toma de decisiones	91
3.6	Implementar mejoras	91
3.6.1	Seleccionar mano de obra calificada para mantenimiento	91
3.6.2	Adquirir equipo neumático para las mejoras	92
3.6.3	Eliminar fugas y optimizar consumos	92
3.6.3.1	Control en los sistemas de soplete o vacío por venturi	91
3.6.3.2	Desperdicios a máquina en reposo	92
3.6.3.3	Desperdicios de aire comprimido en sistemas neumáticos	93
3.6.3.4	Propuesta para optimizar toberas de aire	93
3.6.3.5	Tecnología obsoleta	94
3.6.3.6	Exceso en dimensiones de actuadores	95
3.6.3.7	Regulación de presión	95
3.6.3.8	Lubricación	96
3.6.3.9	Generadores de vacío por venturi	97
3.6.4	Puesta en marcha	97
3.6.5	Medición final	97
3.6.6	Verificar ahorros	97
3.7	Prevenir desperdicios	98
3.7.1	Capacitación en el área de mantenimiento	98
3.7.2	Diagnóstico	98
3.7.3	Calidad del aire comprimido	100

Capítulo 4

Caso en estudio

4.1 Reporte final	102
4.1.1 Introducción	102
4.1.2 Ubicación de máquinas optimizadas en croquis	103
4.1.3 Medición antes de mejoras	103
4.1.4 Medición después de mejoras	104
4.1.5 Actividades para lograr los ahorros	104
4.1.6 Ahorros reales	105
4.1.7 Análisis costo-beneficio	106
4.1.8 Inversión	108
4.1.9 Resultado final	109

Capítulo 5

Conclusiones	110
---------------------	-----

Bibliografía	112
---------------------	-----

Anexos	113
---------------	-----

LISTA DE FIGURAS

Número de figura		Páginas
Figura 1.1	Distribución del uso de aire comprimido en empresas manufactureras de los Estados Unidos de América	15
Figura 1.2	Causas más frecuentes de las pérdidas de aire comprimido	17
Figura 2.3	El trabajo de frontera será almacenada en el aire	27
Figura 2.4	Proceso isobárico	29
Figura 2.5	Proceso isotérmico	30
Figura 2.6	Proceso isentrópico	31
Figura 2.7	Diagrama volumen – presión	32
Figura 2.8	Compresión ideal	33
Figura 2.9	Ciclo de trabajo real	34
Figura 2.10	Diagrama de trabajo real y teórico de un compresor	34
Figura 2.11	Compresión de dos etapas	35
Figura 2.12	Clasificación de compresores	36
Figura 2.13	Compresor de una etapa	37
Figura 2.14	Compresor de dos etapas	38
Figura 2.15	Modos de trabajar de los pistones	39
Figura 2.16	Compresor de aletas	39
Figura 2.17	Compresor de tornillo	40
Figura 2.18	Compresor roots	40
Figura 2.19	Compresor radiales	41
Figura 2.20	Compresor axial	41
Figura 2.21	Distribución de aire	43
Figura 2.24	Nomograma de caída de presión	45
Figura 2.25	Longitudes de equivalentes	46
Figura 2.26	Nomograma para cálculo de caída de presión	47
Figura 2.29	Válvula manual 5 vías y 2 posiciones	49
Figura 2.30	Electroválvula 5 vías y 2 posiciones	49
Figura 2.30a	Válvula 3 vías y 2 posiciones accionamiento neumático	49
Figura 2.31	Válvula 3 vías y 2 posiciones con accionamiento de rodillo	50
Figura 2.32	Actuador neumático	50
Figura 2.33	Actuador doble efecto	50
Figura 2.34	Actuador doble vástago	51
Figura 2.35	Actuador multiposicional	51
Figura 2.36	Actuador tandem	51
Figura 2.37	Actuador giratorio	51
Figura 2.38	Actuador con detectores de proximidad	52
Figura 2.39	Actuador simple efecto	52
Figura 2.40	Sección esquemática de un actuador de doble efecto	53
Figura 2.41	Diagrama fuerza-presión	54
Figura 2.42	Diagrama de pandeo	56

Número de figura	Páginas
Figura 2.43 Diagrama de consumo de aire	57
Figura 2.44 Teorema de Bernoulli	59
Figura 2.45 Diferentes tipo de equipos de medición para altos flujos	61
Figura 2.46 Equipo de medición de consumos	62
Figura 2.47 Equipo de medición de aire comprimido de Festo	62
Figura 2.48 Sensor de medición del VSM3K	62
Figura 2.49 Marca del sentido de flujo del aire comprimido	63
Figura 2.50 Sensor de bajo flujo de aire comprimido en el equipo VSM3K	63
Figura 2.51 Sección del sensor de flujo para bajos flujos	63
Figura 2.52 Sensor de caudal alto por diferencia de presión en el equipo VSM3K	64
Figura 2.53 Sensor de ultrasonido para detectar fugas en lugares silenciosos	65
Figura 2.54 Elemento espumoso para detectar fugas	65
Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología de ahorro de energía Neumática	69
Figura 3.10 Sensor de flujo Festo tipo MS6	76
Figura 3.11 Programa para análisis de ahorros llamado “FESS”	78
Figura 3.13 Arreglo de válvulas y derivaciones en alimentaciones de aire comprimido “bypass”	80
Figura 3.15a Análisis de la eficiencia del uso del aire comprimido	84
Figura 3.20 Gráfica de caudal – presión	90
Figura 3.21 Corte eléctrico de la alimentación de aire en paros de máquinas	93
Figura 3.22 Sistemas intermitentes de uso de toberas por medio de detección de pieza	94
Figura 3.23 Tecnologías para optimizar el uso del aire	95
Figura 3.24 Actuador con carrera de 400 mm y diámetro de 63 mm. de émbolo	95
Figura 3.25 Unidades de mantenimiento para regular la presión y filtrar	96
Figura 3.26 Lubricador de aceite para equipos neumáticos	96
Figura 3.27 Metodología del diagnóstico	99
Figura 3.28 Proyecto de Diagnóstico	100
Figura 4.1 Croquis para ubicación de máquinas analizadas	104
Figura 4.7 Estimación de ahorros después de la inversión	108

LISTA DE TABLAS

Número de tabla	Páginas
Tabla 2.1 Gases que componen el aire	24
Tabla 2.2 Constantes físicas del aire	24
Tabla 2.22 Tiempo promedio de operación	43
Tabla 2.23 Factor de simultaneidad	44
Tabla 2.27 Rugosidad de material	48
Tabla 2.28 Comparación esquematizada entre los tubos metálicos y sintéticos por compresor	48
Tabla 3.2 Pasos principales de la metodología y sus acciones Correspondientes	70
Tabla 3.3 Costo energético anual	72
Tabla 3.4 Datos de costos y recuperación en compresores	62
Tabla 3.4a Valor de depreciación por compresor por año	72
Tabla 3.5 Gastos de mantenimiento anual en compresor de 50 HP	73
Tabla 3.6 Gastos de mantenimiento anual en compresor de 75 HP	73
Tabla 3.7 Gastos de mantenimiento anual en compresor de 100 HP	74
Tabla 3.8 Costo de producir 1 metro cúbico de aire comprimido	75
Tabla 3.9 Rangos de flujo en sensores de la marca VSM3K	76
Tabla 3.12 Inversión en equipos para realizar mediciones y monitoreo móvil	78
Tabla 3.14 Tabla de levantamiento de equipo dañado	81
Tabla 3.15 Consumos dinámicos, estáticos y eficiencia	83
Tabla 3.16 Consumos específicos en la máquina analizada	87
Tabla 3.17 Análisis de desperdicios	87
Tabla 3.18 Costo del desperdicio anual	88
Tabla 3.19 Inversión estimada en equipo de medición	89
Tabla 4.2 Máquinas “PT” analizadas	104
Tabla 4.3 Medición de aire comprimido antes de mejoras	105
Tabla 4.4 Medición de aire comprimido después de mejoras	106
Tabla 4.5 Ahorros reales de aire en 5 máquinas “PT”	107
Tabla 4.6 Costo del aire ahorrado en las 5 máquinas “PT”	107

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

EUA	Estados Unidos de Norteamérica
MPa	Megapascales
gr	Gramos
K	Grados Kelvin
Kg	Kilogramos de masa
m^3	Metros cúbicos
P	Presión
V	Volumen
T	Temperatura
η	Número de moles en volumen total (V)
R	Constante universal de los gases
m	Masa del sistema
u_2, u_1	Energías internas del sistema
z_2, z_1	Posiciones del centro de gravedad del sistema
u_2^2, u_1^2	Velocidades con que se mueve el sistema
Cp	Calor específico a presión constante expresado en (Kcal / kg* K)
PMI	Punto muerto inferior
PMS	Punto muerto superior
i	Variable de control
n	Cantidad de diversas unidades consumidoras
A	Cantidad en unidades
V	Tiempo de operación en porcentaje
FS	Factor de simultaneidad
A_r	Crecimiento a futuro (promedio 35%)
F_u	Consideración de fugas (promedio 10%)
L_L	Longitud real de la tubería
ISO	International Standards Organization
CETOP	Comité Européen des Transmissions Oléohydrauliques et Pneumatiques
D	Diámetro del émbolo
d	Diámetro del vástago
ρ_o	Densidad
VSM3K	Proveedor alemán de sensores de flujo
PC	Computadora personal
CFE	Comisión Federal de Electricidad
FESS	Festo energy saving service. Nombre dado al servicio de ahorro en Festo
CFM	Pies cúbicos por minuto (ft^3/min)
HP	Horse power. Potencia
MXP	Moneda nacional mexicana
OK	Todo bien
DNC	Descripción de actuador doble efecto de marca Festo
PLC	Controlador lógico programable

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Festo Pneumatic, empresa donde trabajo, forma parte del grupo de empresas Festo AG & Co. KG con sede en la ciudad de Esslingen, Alemania. Una de las actividades centrales del grupo es la creación, producción e instalación de sistemas de automatización industriales. En Festo Pneumatic nos dedicamos al suministro de servicios relacionados con la automatización neumática industrial. Los sistemas neumáticos de automatización son los más utilizados actualmente en la industria y representan cientos de diferentes aplicaciones de aire comprimido.

Actualmente me desempeño como coordinador de Servicios Operacionales y entre éstos, se ofrece el Servicio de ahorro de energía. Durante el período del 2003 al 2007, Festo México ha ocupado el primer lugar en ventas de proyectos de ahorro de energía entre las compañías Festo a nivel mundial.

Con la tendencia de ofrecer mejores servicios al cliente, Festo está desarrollando un servicio de medición y mejora en los procesos neumáticos industriales. Actualmente la situación financiera y de dura competencia que la mayoría de empresas enfrentan, las ha obligado a tomar acciones para optimizar sus consumos de energía, uno de los recursos más utilizados en los sistemas de automatización de las plantas es el aire comprimido. En los últimos años los costos para producir, preparar y distribuir dicho recurso con la calidad requerida se ha elevado día con día.

Por lo anotado, la problemática del ahorro de energía en las instalaciones de sistemas neumáticos de automatización a través del control de las pérdidas de aire comprimido, es de significativo interés no sólo para Festo Pneumatic sino, por razones económicas, para la industria en general. A esto se añade el hecho importante de que el ahorro de aire comprimido redundando directamente en ahorro de energía eléctrica, lo cual, a su vez, tiene un efecto positivo y de interés nacional en el consumo de combustibles fósiles y en la presión ecológica sobre el ambiente. Finalmente las fugas de aire comprimido provocan en mayor o menor grado un deterioramiento de la calidad del ambiente en la propia área de trabajo.

El presente trabajo de tesis está orientado al establecimiento de una metodología para detectar pérdidas de aire comprimido, estimar el costo de las mismas y lograr reducirlas con el objetivo de servir como una base para el subsiguiente trabajo de Festo Pneumatic.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GENERAL

El objetivo de la tesis es hacer una metodología para remediar los problemas de desperdicios de aire comprimido y lograr despertar en los usuarios el interés en realizar las inversiones y acciones para lograrlo, reviste importancia económica, tecnológica y ecológica.

1.2.2 ESPECÍFICOS

Parte de la metodología es la descripción de las etapas del proyecto, las cuales son:

1. Tipo de empresas y áreas de oportunidad. Ubicar las empresas y áreas con mayor oportunidad.
2. Herramienta necesaria para el análisis de consumos. Determinar lo necesario para medir y analizar los desperdicios.
3. Medición de consumos en máquina. La forma de medir y analizar los desperdicios de aire comprimido en los sistemas neumáticos.
4. Reporte Escrito. Prepara un reporte escrito donde se analice consumos promedios, eficiencias, desperdicios estimados, ahorros estimados, propuesta de mejora, retorno de inversión y gráficas de consumo y presión.
5. Implementación de mejoras. Describir los tipos de propuestas de mejora en base al análisis de desperdicios que pueden tener algunos sistemas neumáticos.
6. Acciones preventivas. Actividades con el fin de mantener los consumos de aire comprimido en forma óptima.

Además de fomentar en las industrias el ahorro de energía en aire comprimido, la cual en estos días no se le da la importancia que merece.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El tema de pérdidas de energía en los equipos neumáticos toma cada día tanta fuerza dentro de las empresas, que algunas han creado programas de mantenimiento muy completos y con alta prioridad.

1.3.1 SIGNIFICADO DEL PROBLEMA

En los sistemas neumáticos se producen pérdidas de aire comprimido imputables a diversas causas, algunas de las principales son: fugas en equipos neumáticos dañados, aplicaciones incorrectas y mal uso.

En el departamento de servicio Técnico de Festo, se han realizado estudios de consumo de aire a pie de máquina en diferentes empresas mexicanas [1] y el resultado es que existe un desperdicio promedio del 25 – 30 % del aire comprimido general producido.

Según en la página en Internet del departamento de Energía de los EUA, que es de dominio público, muestran que más del 30 % de la energía eléctrica que se consume en una empresa manufacturera promedio es a causa de la generación de aire comprimido.

Distribución promedio del uso del aire comprimido

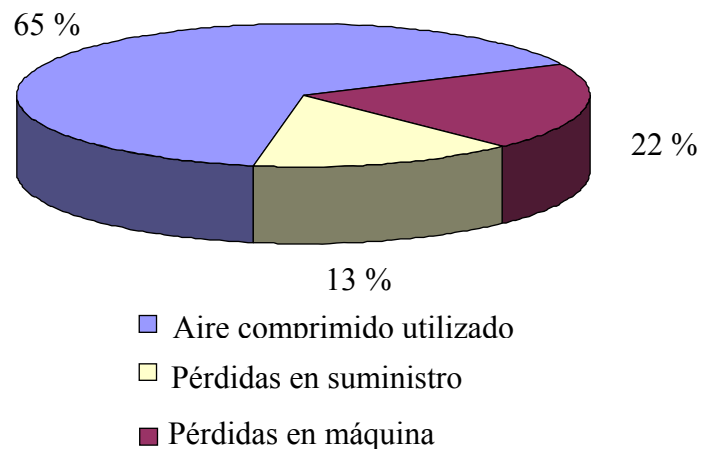


Figura 1.1 Distribución del uso de aire comprimido en empresas manufactureras de los Estados Unidos de América [2]

Por otro lado, se estima que en México operan alrededor de 20,000 empresas según base de datos de Festo México, entre grandes y medianas, las cuales utilizan sistemas neumáticos en la automatización de sus procesos. Esto ilustra el significado cuantitativo que tiene el

problema en nuestro país y sus efectos en el consumo de energía eléctrica, costos de producción y el impacto directo e indirecto en el ambiente.

El aumento en el consumo de energía eléctrica significa mayor consumo de combustibles fósiles en las plantas generadoras eléctricas, lo cual a su vez tiene un impacto económico y ecológico.

Otra desventaja de tener fugas en los equipos neumáticos, es el alto nivel de ruido que se genera, deteriorando así el ambiente de trabajo y provocando contaminación por ruido.

Una situación que favorece el desperdicio de aire comprimido es que en las empresas no siempre se toma conciencia del hecho que los desperdicios de aire tienen un costo y de que fugas aparentemente pequeñas pueden provocar considerables pérdidas por su acción ininterrumpida. Como un contraste con esto, no se tiene la misma actitud indiferente, por ejemplo con fugas de aceite o de gas. Esto señala una oportunidad para profundizar la cultura de ahorro de aire comprimido dentro de las empresas.

Finalmente se ha constatado que la mayoría de los casos de desperdicio de aire en los sistemas neumáticos tiene solución y muchas veces muy simple.

Las consideraciones presentadas hasta aquí muestran que un trabajo de investigación aplicada que proporcione un método para remediar los problemas de desperdicios de aire comprimido y que logre interesar a los usuarios en realizar las inversiones y acciones para lograrlo, reviste importancia económica, tecnológica y ecológica.

1.3.2 ANÁLISIS DEL PROBLEMA

A continuación se presentarán consideraciones personales sustentadas por la experiencia y por el estudio de fuentes bibliográficas en desperdicios de aire comprimido. [1].

Los estudios de Festo permiten anotar las siguientes observaciones relacionadas con el problema de pérdidas de aire comprimido en empresas mexicanas:

- A causa del desconocimiento del costo para producir aire comprimido, el usuario no toma las debidas acciones de mantenimiento a los equipos neumáticos.
- El usuario no siempre es consciente del hecho que aún pequeñas fugas, aparentemente despreciables, tienen un efecto considerable en los costos de energía debido a su presencia constante en los equipos neumáticos.
- Los sistemas neumáticos desperdician en promedio entre el 20 y 30 % del aire que producen las fábricas en sus cuartos de compresión. (cantidad muy alta como para no tomar medidas)
- Los responsables de mantenimiento deben tomar decisiones con mayor rapidez por los desperdicios tan altos en aire comprimido.
- Falta de capacitación para evaluar las inversiones y poder justificar el proyecto de mejoras.
- Las fugas de aire provocan altos niveles de ruido en las áreas de trabajo.

- Los consumos de energía en el compresor son directamente proporcionales a los consumos de aire en los procesos.
- Las pérdidas de aire comprimido deterioran el medio ambiente de forma directa e indirecta
- Las fugas o mal uso del aire provocan caídas de presión que pueden afectar la calidad del producto.
- No existe una cultura de ahorro de energía bien asentada en la actitud de los operarios.
- La presencia de muchas fugas, por lo general es síntoma de que no se aplican programas de mantenimiento correctivos, mucho menos un programa preventivo.
- El tiempo de vida del equipo generador se ve drásticamente disminuido a causa de las fugas.
- En muchos casos las pérdidas de aire pueden reducirse considerablemente mediante acciones bastante simples y no costosas, de modo que el retorno de la inversión puede representar tiempos atractivamente cortos.

Por otra parte, los citados estudios y la observación de diversos casos en la práctica industrial que me tocaron atender, permiten establecer como causas más comunes de las pérdidas de aire comprimido las que aparecen representadas en la figura 1.2 mediante un diagrama de Ishikawa.

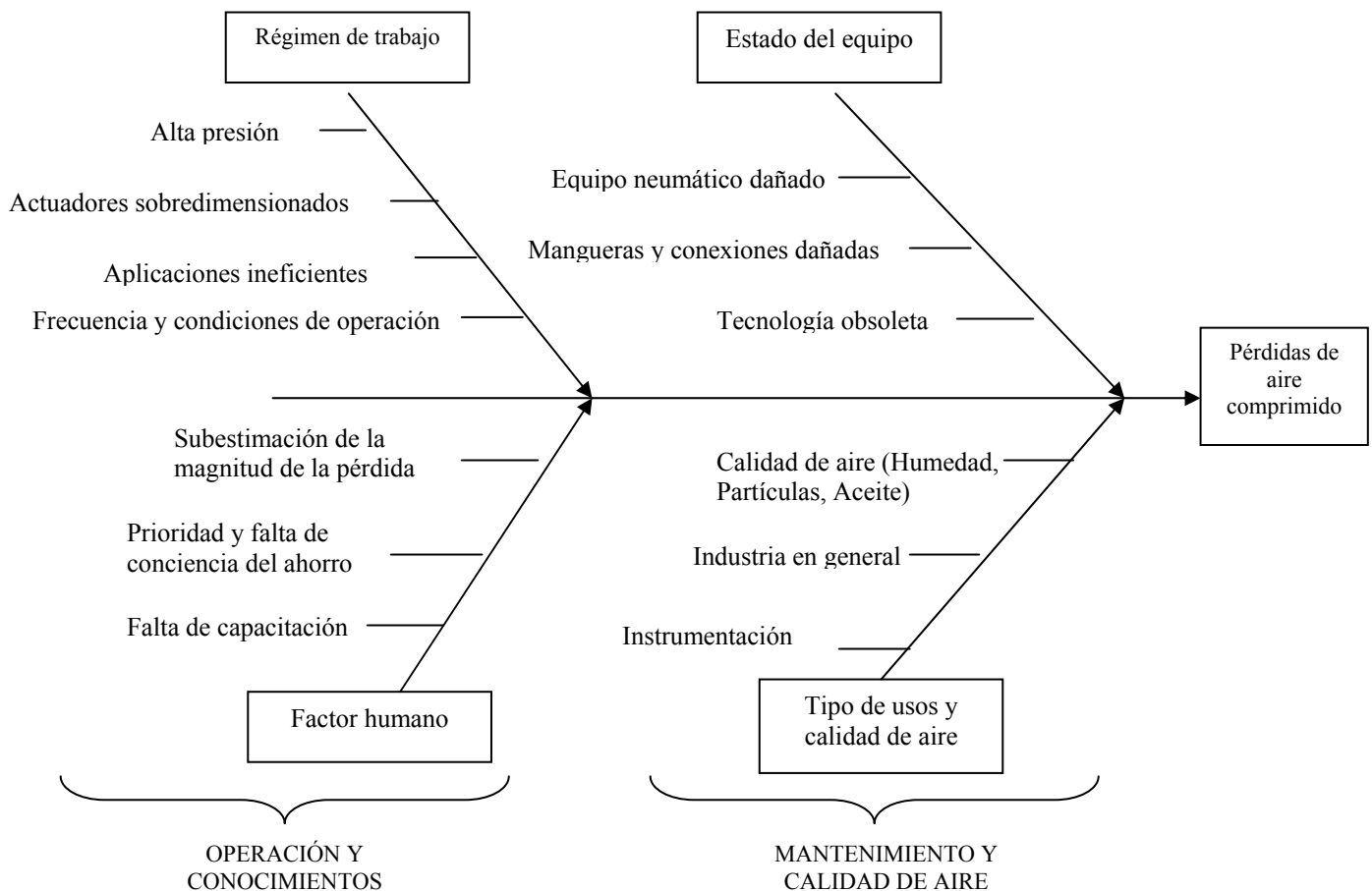


Figura 1.2 Causas más frecuentes de las pérdidas de aire comprimido

Estado del Equipo Neumático

- a) Equipos neumáticos dañados a causa del desgaste en la operación, la contaminación del aire comprimido con humedad, aceite y partículas.
- b) Conexiones y mangueras dañadas. Los conductos por donde circula el aire llegan a deteriorarse con mayor velocidad que los demás equipos a causa de vibraciones de operación, tiempos de uso, aprietes excesivos, estos factores provocan fugas constantes y de gran volumen.
- c) Tecnología obsoleta. La selección incorrecta y/o la antigüedad de los equipos, provocan ineficiencia en relación con el aprovechamiento del aire comprimido.

Régimen de trabajo

- a) Actuadores sobredimensionados. Utilizar actuadores con un diámetro y carrera mayores que los requeridos provoca un consumo excesivo de aire comprimido.
- b) Alta presión. Mantener los equipos en un nivel excesivamente alto de presión, disminuye su tiempo de vida y además incrementa los consumos de energía.
- c) Usos inadecuados. El uso permanente como ocurre en chorros de aire o en la producción de vacío por venturi provocan altos consumos de aire y caídas de presión. El objetivo es controlar el consumo por medio de cortes durante los tiempos de operación o tiempos muertos en que no se requiere este insumo. Por ejemplo en un paro de proceso, mantenimiento, horas de comida, fines de semana o por otras causas.
- d) Frecuencia y condiciones de operación. Las frecuencias altas de operación en los equipos neumáticos y además si se agregan condiciones desfavorables de trabajo como son temperaturas altas, agentes agresivos, polvos, etc. aumentan la probabilidad de fugas y deterioro prematuro.

Factor Humano

- a) Cultura de prevenir. Debido a la falta de medios para monitorear la cantidad de aire que se pierde, el usuario percibe, erróneamente, que dichas pérdidas no son importantes por lo cual no toma acciones decisivas para eliminarlas.
- b) Prioridad y falta de conciencia del ahorro. La falta de información y conocimiento para evaluar el costo del aire utilizado, hace que el usuario no pueda determinar si es viable hacer inversiones para reducir los consumos y obtener ahorros.
- c) Capacitación. La falta de información técnica hace que el operario ignore el problema. La falta de programas de mantenimiento para corregir fallas o aplicar sistemas que

optimicen los consumos de aire en los equipos neumáticos son también causa de fuertes pérdidas.

Tipo de Proceso y Calidad de Aire

a) Calidad del aire comprimido. Para aplicaciones o usos donde el aire comprimido entra en contacto con alimentos, medicamentos o productos sensibles a la humedad, aceite del compresor y partículas, debe ser estrictamente filtrado y secado. Las fugas de aire en este tipo de industrias son muy costosas por el tipo de preparación exigido.

b) Industria en General. La calidad de aire no es tan estricta como las empresas de alimentos o electrónicas, pero debe llevar un secado y filtrado medio para protección de los equipos neumáticos. En general no se llevan a cabo programas de detección y corrección, por lo que se desperdicia de manera indiscriminada.

c) Aplicaciones especiales. Utilizaciones de aire como cuartos de pintura, instrumentación muy especializada y otros, requieren un tratamiento y cuidado especial del aire comprimido.

Se puede concluir que las pérdidas de aire comprimido en los sistemas neumáticos industriales dependen de cuatro grupos de causas:

1. Estado del equipo
2. Régimen de trabajo de los sistemas
3. Factor humano
4. Tipo de proceso automatizado y calidad del aire exigido

1.3.3 PÉRDIDAS DE AIRE COMPRIMIDO EN EQUIPOS NEUMÁTICOS

Una de las causas principales de pérdidas en aire comprimido es la falta de información y valorización que actualmente tiene el usuario del aire comprimido, además de la falta de cultura de un mantenimiento preventivo en muchas de las empresas en México.

En muchos de los casos el usuario cae en una ceguera de taller, la cual provoca que el ruido de las fugas se considere como parte del proceso. Anexo a esta actitud se suma la desventaja de que las fugas en los equipos neumáticos en muchos de los casos no provocan paros del proceso.

Por lo anotado arriba los puntos críticos a resolver en la tesis se relacionan con la búsqueda de metodología para:

- Determinar si existen pérdidas de aire comprimido en los equipos neumáticos de un proceso cualquiera.

- Cuantificar la cantidad de pérdidas de aire comprimido en los equipos neumáticos.
- Calcular el costo de estas pérdidas de aire comprimido.
- Presentar propuestas para solucionar y/o evitar estas pérdidas de aire comprimido.

1.3.4 ÁREAS DE AHORRO EN LOS SISTEMAS NEUMÁTICOS

Las áreas de oportunidad en ahorro de energía neumática en los sistemas neumáticos más comunes se describen a continuación. Además se darán a conocer los efectos técnicos y operacionales más comunes que provocan las pérdidas o desperdicios de aire comprimido en los sistemas neumáticos dentro de las áreas de producción, calidad del producto, costos de mantenimiento y consumos de energía.

Tecnología neumática obsoleta

Por el uso de tecnología neumática ineficiente, anticuada, no estandarizada, que provoca desperdicios como:

- a) Paros continuos en máquina por daños frecuentes
- b) Altos consumo de aire en equipos dañados
- c) Costos altos por refacciones
- d) Bobinas eléctricas sobredimensionadas
- e) Baja eficiencia en actuadores y válvulas neumáticas

Actuadores sobredimensionados

La utilización de actuadores con un diámetro de émbolo mayor a lo requerido en fuerza y carreras de desplazamiento excesivas provocan consumos y caídas de presión innecesarios.

Usos inadecuados en sopleteo y limpieza por aire

Usos inadecuados de aire que pueden ser sustituidos por otras tecnologías u optimizados con el fin de ahorro de energía.

- a) Desperdicios altos de aire comprimido
- b) Caídas de presión en la red
- c) Niveles de ruido alto
- d) Riesgo para la salud por contacto en la piel

Mantenimiento inadecuado

Falta de mantenimiento preventivo para detectar y eliminar fugas en los equipos neumáticos.

- a) Altos consumos de aire comprimido
- b) Caídas de presión en la red de aire
- c) Alto nivel de ruido
- d) Paros de máquina o línea

Presiones óptimas de uso

Se recomienda para los equipos neumáticos una presión de 5 a 6 Bar (0.5 – 0.6 MPa), pero muchas aplicaciones pueden utilizar menor presión, posiblemente de de 3 a 4 Bar (0.3 – 0.4 MPa), con esto se obtendrán ahorros y tiempos de vida más largos para los equipos. Evitando

- a) Altos consumos de aire comprimido
- b) Grandes caídas de presión en la red
- c) Disminución de tiempos de vida del equipo neumático
- d) Disminución de tiempos de vida del equipo generador
- e) Incremento del riesgo de accidente por el exceso de presión en los equipos neumáticos
- f) Afectar la calidad del producto final

Falta de cortes de aire comprimido en automático

Por medio de estos cortes se condicionan los suministros de aire en base a los paros y arranques de forma automática.

- a) Consumos innecesarios de energía en el equipo generador
- b) Caídas de presión en la red
- c) Niveles de ruido altos

Distancia entre la válvula y el actuador

Optimizar las distancias de tuberías que provocan consumos innecesarios y además en situaciones de frecuencias altas de operación se incrementa la eficiencia del accionamiento.

Efecto:

Diseño de la red principal de aire comprimido

Dimensiones inadecuadas o insuficientes en los diseños y tamaños de las tuberías provocan caídas de presión.

- a) Caída de presión en ramales por falta de un anillo principal
- b) Humedad en la red por falta de trampas de condensado

1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La siguiente tesis contiene 5 capítulos, posterior a este capítulo se tiene el marco teórico, donde se presentan los temas de generación de aire comprimido, los elementos neumáticos industriales y los equipos de medición para aire comprimido. Posterior se presenta la metodología, donde se calcula el costo de un metro cúbico de aire comprimido, el cálculo de desperdicios de aire comprimido y su cuantificación en dinero así también se presenta una serie de soluciones para poder optimizarlo. Además se presenta un caso de estudio real en una empresa de bujías, donde se realizaron actividades medición de consumos, mejoras y los logros que se obtuvieron al disminuir la cantidad de aire comprimido utilizado en las máquinas de ensamble. Por último se presentan las conclusiones principales de esta tesis.

1.4.1 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta la parte teórica de los principales puntos como son: la generación de aire comprimido, la descripción de los elementos neumáticos que más comúnmente se encuentran en las industrias y por último toda la teoría de los principios de medición más comunes en aire comprimido y los tipos de equipos de medición utilizados actualmente para este fin.

1.4.2 METODOLOGÍA PARA OPTIMIZAR EL USO DEL AIRE COMPRIMIDO EN LOS SISTEMAS NEUMÁTICOS

Primeramente se tiene el cálculo para obtener el costo promedio de la producción del aire comprimido en la unidad utilizada para evaluar los desperdicios de aire comprimido en los diferentes tipos de procesos en la industria. Se presenta un cálculo donde se puede evaluar el costo de aire comprimido según datos como: tamaño de compresor, costo de la energía eléctrica, costos de mantenimiento y depreciación.

Después se presentan algunos criterios para la detección y ubicación de las áreas representativas. Posteriormente se miden y evalúan los consumos y desperdicios de aire comprimido encontrados principalmente en los sistemas neumáticos y aplicaciones. Además se prepara un reporte donde se presenta en dinero los desperdicios de aire comprimido e información importante como: análisis costo-beneficio, tiempo de amortización, propuesta de mejora y gráficas de consumo-presión.

Después de tener el costo del desperdicio, el análisis del retorno de la inversión y su propuesta de mejora viene la parte importante que es la toma de decisiones para eliminar y optimizar el desperdicio de aire comprimido. En esta parte se describen las actividades y tecnologías para disminuir los consumos de aire en los sistemas neumáticos y por último se describen algunas actividades orientadas a prevenir desperdicios de aire comprimido en los sistemas neumáticos ya optimizados.

1.4.3 CASO DE ESTUDIO

Es un proyecto exitoso que se realizó con una empresa que produce bujías, donde se lograron ahorros hasta del 50 % del consumo de aire comprimido inicial. Este proyecto comenzó con la detección de áreas de oportunidad y posteriormente detectada una máquina piloto se realizaron las mediciones de consumo y desperdicios que tenían sus equipos neumáticos. Posteriormente se entregó un reporte donde se presentaba un estimado de los desperdicios de aire comprimido, retorno de inversión y una propuesta descrita de las mejoras y los beneficios que se lograría al momento de realizar las mejoras. El cliente autorizó el trabajo y al final de las actividades se evaluaron los consumos de aire comprimido nuevamente y de esta manera se pudo comparar el antes y después de mejoras. Este trabajo se realizó en 30 máquinas, pero en el caso de estudio de la tesis solo se presentan los resultados de 5 máquinas llamadas "PT". Al final del proyecto se comprobó los ahorros de aire comprimido que cada una de las máquinas había tenido.

1.4.4 CONCLUSIONES

Se describen las conclusiones principales de esta tesis. Algo importante que se concluyó es que el aire comprimido es uno de los recursos más caros que tiene las industrias y muchas empresas no están haciendo un uso adecuado y mucho de esto es por la falta de conciencia y conocimientos en los usuarios u operarios de los procesos.

CAPÍTULO 2

MARCO TEORICO

GENERACIÓN DE AIRE COMPRIMIDO

2.1 AIRE COMPRIMIDO

El aire es una mezcla de gases incoloros, insípidos e inodoros. La composición del aire seco es como se muestra en la tabla 2.1

Componente	Porcentaje (Volumen)	Porcentaje (Peso)
Nitrógeno	78.08	75.51
Oxígeno	20.95	23.15
Argón	0.93	1.28
Dióxido de Carbono	0.03	0.046
Otros Gases	0.01	0.014

Tabla 2.1 Gases que componen el aire

Los valores de las constantes físicas más importantes del aire son: Ver tabla 2.2

Peso molecular	28.96 gr / mol
Densidad a 15 °C y 1 bar (0.1 MPa)	1.208 kg/m ³
Temperatura ebullición a 1 bar (0.1 MPa)	78.8 K
Temperatura congelación a 1 bar (0.1 MPa)	57-61 K
Constante de gas	287 J / kg K
Presión crítica	3.77 MPa
Temperatura crítica	132.5 K

Tabla 2.2 Constantes físicas del aire

El aire comprimido es uno de los energéticos más utilizados en la industria. Es empleado como elemento transportador, activador de herramientas neumáticas y de diversos sistemas de control. Comentarios de un cliente de una empresa importante a nivel internacional: “el aire comprimido representa las 2/3 partes del consumo total de energía eléctrica en la planta”.

El aire comprimido se usa en forma intensiva en las empresas como alimentos, textil, vestido, manufactura, ensamble, química, automotriz, entre otros.

2.2 PRINCIPIOS TERMODINÁMICOS

Para un estudio de los principios de funcionamiento de los compresores de aire, el fluido lo podemos considerar como un gas que satisface las condiciones de un gas ideal.

Las leyes de los gases relacionan las tres variables: presión (P), volumen (V) y temperatura (T), las cuales están implicadas en la compresión y expansión del aire. Se puede decir que en los gases el volumen V es función de la presión P y de la temperatura T, lo cual nos lleva a escribir implícitamente $f(P, V, T) = 0$.

El aire cumple con ecuaciones, definiciones y leyes que a continuación se describen. Para las fórmulas siguientes, los volúmenes se toman en metros cúbicos, y las temperaturas y presiones en valores absolutos.

2.2.1 LEY DE BOYLE-MARIOTTE

A condiciones de temperatura constante, el producto de la presión por el volumen de gas es constante.

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = \text{Constante} \quad \text{Siempre que } T_1 = T_2 \quad \text{Ec. 2.1}$$

2.2.2 LEY DE CHARLES – GAY LUSSAC

A presión constante, el volumen ocupado por una masa de gas es directamente proporcional a su temperatura absoluta.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ con } P = \text{Constante} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Todos los gases tienen, a presión constante, el mismo coeficiente de dilatación, al contrario de los sólidos y los líquidos, que tienen cada uno su valor propio.

2.2.3 LEY DE LOS GASES IDEALES

Los gases ideales son los que cumplen con las ecuaciones, definiciones y leyes anteriores. El aire puede considerarse como gas ideal a presiones no demasiado altas y temperaturas no demasiado bajas. La ley de los gases ideales aplica a gases puros y a mezcla sin ser justamente ideal.

La ley de los gases ideales se obtiene si se aplican las leyes de Boyle - Mariotte y de Charles - Gay Lussac a una transformación que parte del estado arbitrario P_1, V_1, T_1 y llega al estado P_2, V_2, T_2

La transformación se hace en dos pasos: primero de P_1, V_1, T_1 , a P_1, V', T_2 aplica:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V'}{T_2} \text{ con } P = \text{cte} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Segundo: de P_1, V', T_2 a P_2, V_2, T_2

$$\text{Aplica } P_1, V' = P_2, V_2 \text{ (a } T_2 = \text{ constante)} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Sustituyendo V' ;

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \text{Constante} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Para 1 mol de gas la constante

$R = 847.7 \text{ Kg}\cdot\text{m} / \text{Kgmol K} = 1.986 \text{ Kcal/Kgmol K}$ y finalmente

$$PV = \eta RT \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde:

P es la presión absoluta (kg_f/m^2) absolutos o MPa

V es el volumen (m^3)
 n es el número de moles en volumen total V
 R es la constante universal de los gases
 T es la temperatura (K)

Donde la ecuación 2.6 es la ecuación de los gases ideales.

2.3 PROCESOS TERMODINÁMICOS

Para estudiar un sistema termodinámico es necesario establecer los límites del mismo. Cuando un sistema está en equilibrio en relación con cualquier posible cambio de estado, el sistema se encuentra en equilibrio termodinámico.

2.3.1 PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La primera ley de la termodinámica establece que “el calor es una forma de energía la cual puede ser generada por trabajo o convertida a trabajo”.

Analizando el proceso de compresión del aire como un proceso adiabático se puede concluir que la energía transferida al aire en forma de trabajo de frontera, será almacenada en este como parte de su energía interna. La temperatura del aire sube y aumenta su presión. En este caso el incremento de la energía del aire será igual al trabajo de la frontera efectuado sobre él. Ver figura 2.3

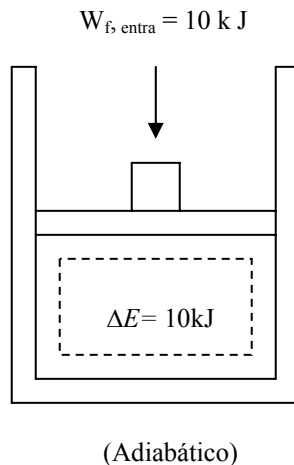


Figura 2.3 El trabajo de frontera será almacenada en el aire

Si se desea determinar el cambio de energía de un sistema durante un proceso se requiere evaluar la energía del sistema al inicio y al final del proceso. Esto es:

$$\Delta E_{sistema} = E_{final} - E_{inicial} = E_2 - E_1 \quad \text{Ec. 2.7}$$

En la ausencia de efectos eléctricos, magnéticos y de tensión superficial, el cambio en la energía total del sistema durante un proceso es la suma de los cambios en sus energías interna, cinética y potencial.

$$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde:

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$\Delta EP = mg(z_2 - z_1) \quad \text{Ec. 2.10}$$

$$\Delta EC = \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2) \quad \text{Ec.2.11}$$

Donde:

m Masa del sistema

u_2, u_1 Energías internas del sistema

z_2, z_1 Posiciones del centro de gravedad del sistema

v_2^2, v_1^2 Velocidades con que se mueve el sistema

La mayoría de los sistemas no involucran cambios en su velocidad o en sus posiciones durante un proceso. Los cambios en las energías cinética y potencial son cero para este tipo de sistemas (esto es, $\Delta EC = \Delta EP = 0$), y la relación $\Delta E = \Delta U$ para el cambio de energía total se reduce a $\Delta E = m(u_2 - u_1)$

2.3.2 PROCESO ISOBÁRICO

El proceso isobárico, es un proceso donde el volumen, cambia a presión constante.

$P = \text{constante}$, $V_1 \neq V_2$, $T_1 \neq T_2$. Por lo tanto el cambio en la temperatura es proporcional a la razón de los volúmenes. Figura 2.4

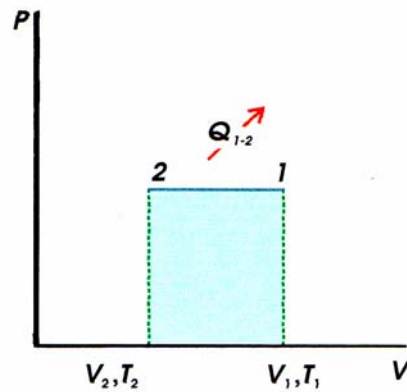


Figura 2.4 Proceso isobárico

$$T_2 - T_1 = T_1 * [(V_2 / V_1) - 1] \quad \text{Ec. 2.12}$$

La cantidad de calor que debe ser removido es:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = C_p * m * (T_1 - T_2) \quad \text{Ec. 2.13}$$

Donde:

C_p es el calor específico a presión constante expresado en (Kcal / kg* K)

m es la masa (kg)

T es la temperatura (K)

2.3.3 PROCESO ISOTÉRMICO

Es un proceso donde el volumen, y la presión cambian a temperatura constante.

$$T = \text{constante}, P_2 \neq P_1, V_1 \neq V_2$$

Por lo tanto el cambio de la presión es proporcional a la razón de los volúmenes.

$$P_2 - P_1 = P_1 * [(V_1 / V_2) - 1] \quad \text{Ec 2.14}$$

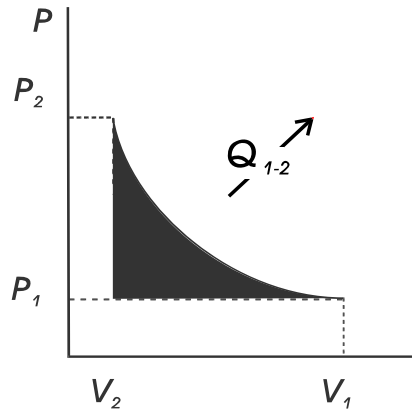


Figura 2.5 Proceso isotérmico

La cantidad de calor que debe ser removido es igual al trabajo de compresión.

$$Q_{1 \rightarrow 2} = P_1 \cdot V_1 \cdot \ln(V_1 / V_2)$$

$$W = - Q_{1 \rightarrow 2}$$

Ec. 2.15

$$Q_{1 \rightarrow 2} = R \cdot T_1 \cdot m \cdot \ln(P_2 / P_1)$$

2.3.4 PROCESO POLITRÓPICO

El proceso isotérmico es un proceso basado en un completo cambio de calor con sus alrededores; el proceso isentrópico, por el contrario es un proceso en el cual no hay ningún intercambio de calor con sus alrededores. El proceso politrópico, es un proceso que se encuentra entre los dos procesos mencionados anteriormente.

Todos los procesos de compresión reales caen dentro de estas dos categorías. Por lo tanto el proceso politrópico sigue la siguiente ley:

$$P \cdot V^n = \text{constante}$$

Ec. 2.16

Dándole a **n** valores adecuados el proceso Politrópico incluirá todos los cuatro procesos básicos.

$n = 0$ representa al proceso isobárico $P = \text{constante}$

$n = 1$ representa al proceso isotérmico $T = \text{constante}$

$n = k$ representa al proceso isentrópico $Q_{1-2} = 0$

$n = \infty$ representa al proceso isométrico $V = \text{constante}$

2.3.5 PROCESO ISENTRÓPICO

El proceso isentrópico, es aquel donde no hay intercambio de calor con sus alrededores. (Adiabático y Reversible)

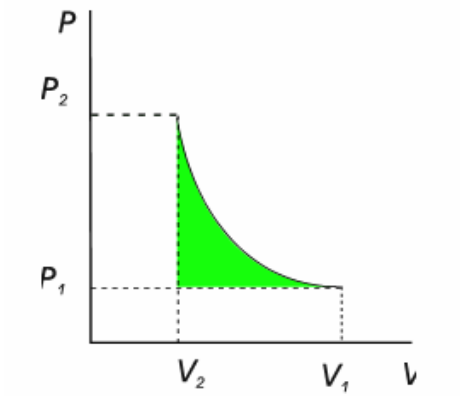


Figura 2.6 Proceso isentrópico

$$Q_{12} = 0, P_2 \neq P_1, T_1 \neq T_2$$

Ec. 2.17

$$V_1 \neq V_2$$

$$P_2 / P_1 = (V_1 / V_2)^k$$

$$P_2 / P_1 = (T_2 / T_1)^{(k / (k-1))}$$

$$k = C_p / C_v$$

$$P * V^k = \text{constante}$$

$$W = H_1 - H_2 = C_p * (T_1 - T_2)$$

$$W = [(k * R) / (k-1)] * (T_1 - T_2)$$

$$W = [(P_1 * V_1) - (P_2 * V_2)]^{k / (k-1)}$$

$$W = (T_2 - T_1) * m * R / (1-k)$$

$$W = [(P_2 * V_2) - (P_1 * V_1)] / (1-k)$$

2.4 COMPRESIÓN

La compresión es el proceso mediante el cual se eleva la presión de un fluido compresible, ejemplo aire, por una disminución de su volumen específico. El compresor es el equipo que se utiliza para hacer esta disminución de volumen, el cual aspira aire a la presión atmosférica y lo comprime a una presión más elevada.

El diagrama de la figura 2.7 representa la forma ideal para los compresores de una sola etapa.

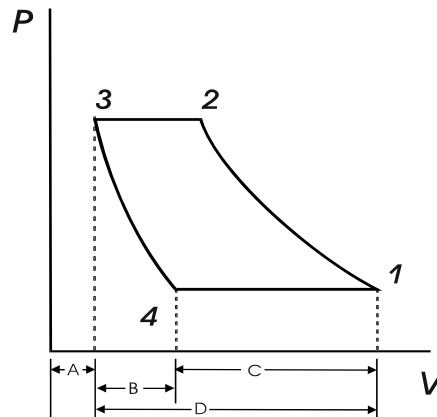


Figura 2.7 Diagrama volumen – presión

Referencia. Manual sobre Aire Comprimido y su aplicación en la Industria. Atlas Copco. Venezuela.

Donde:

A = Espacio muerto

B = Volumen expandido

C = Volumen real aspirado

D = Desplazamiento del pistón

2.4.1 COMPRESIÓN IDEAL

Teniendo el diagrama P-V de un compresor ideal ver figura 2.7, el compresor aspira aire a la presión atmosférica, según la curva 4-1, llegando a su posición extrema en el punto 1 de la figura 2.8. Al principio de compresión del punto 1 el pistón comienza a moverse en el cilindro, aumentando su presión, ciclo de compresión, conforme la línea 1-2 1-2, compresión isoterma; 1-5, compresión adiabática y alcanza la presión final que se supone existe en la tubería de distribución cuando el pistón llega al punto 3. El aire se descarga en los citados medios mediante el movimiento del pistón de 2 a 3 a presión constante. Al retornar el pistón, la presión baja a presión atmosférica en el punto 4, y el aire atmosférico vuelve a entrar por la aspiración de punto 4 –1, dando comienzo a un nuevo ciclo, todo ello conforme a la figura 2.8.

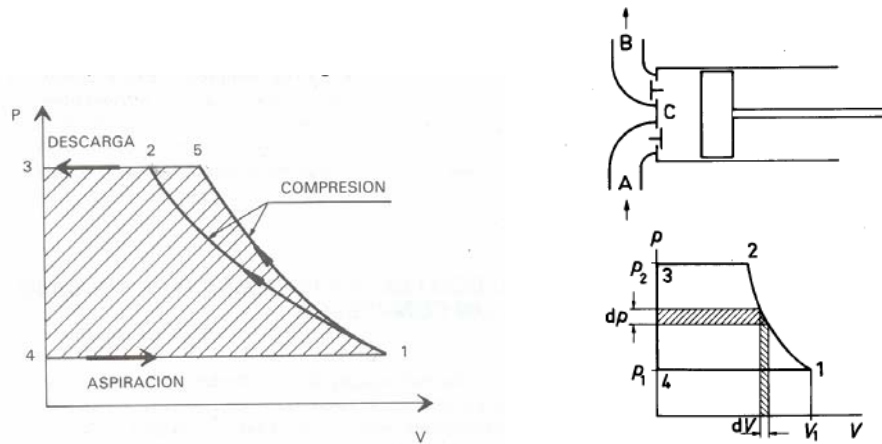


Figura 2.8 Compresión ideal.

Referencia. Manual sobre Aire Comprimido y su aplicación en la Industria. Atlas Copco. Venezuela.

Se han efectuados las transformaciones que se mencionan a continuación:

- de 4 a 1, aumento de volumen a presión constante
- de 1 a 2, aumento de presión por reducción de volumen
- de 2 a 3, disminución de volumen a presión constante
- de 3 a 4, disminución de presión a volumen constante.

El trabajo total será igual al trabajo de descarga más el trabajo de compresión más el trabajo de aspiración.

2.4.2 COMPRESIÓN REAL

La capacidad real de un compresor es menor que el volumen desplazado del mismo debido a razones tales como:

- a) Caída de presión en la succión
- b) Calentamiento del aire de entrada
- c) Expansión del gas retenido en el volumen muerto
- d) Fugas internas y externas

Al desplazarse el pistón causa una depresión en el cilindro, que abre la válvula de aspiración llenando de gas al cilindro. Una vez alcanzado el Punto Muerto Inferior (PMI) el pistón inicia su retorno, provocando un aumento de la presión que obliga a cerrarse a la válvula de aspiración. Lograda la presión de descarga, se facilita la apertura de la válvula de impulsión y la salida de aire comprimido. Al llegar al Punto Muerto Superior (PMS) el pistón vuelve a desplazarse en el sentido inicial, dando lugar a la expansión del gas

acumulado en el espacio muerto, hasta conseguir la presión de aspiración y reemplazar el inicio de un nuevo ciclo. Figura 2.9

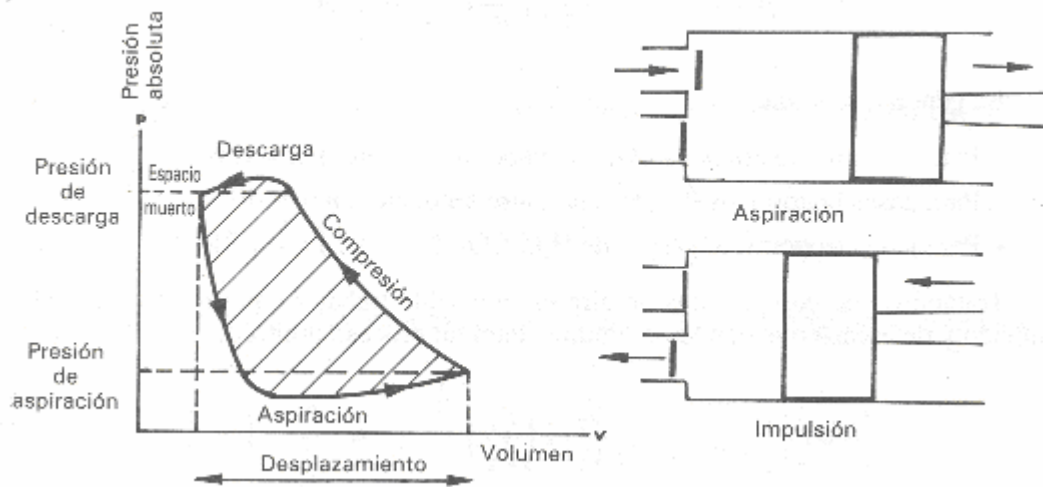


Figura 2.9 Ciclo de trabajo real

Referencia. Manual sobre Aire Comprimido y su aplicación en la Industria. Atlas Copco. Venezuela.

2.4.3 COMPRESION DE UNA ETAPA

La figura 2.10 representa un estudio comparativo entre los diagramas de trabajo real y el diagrama teórico.

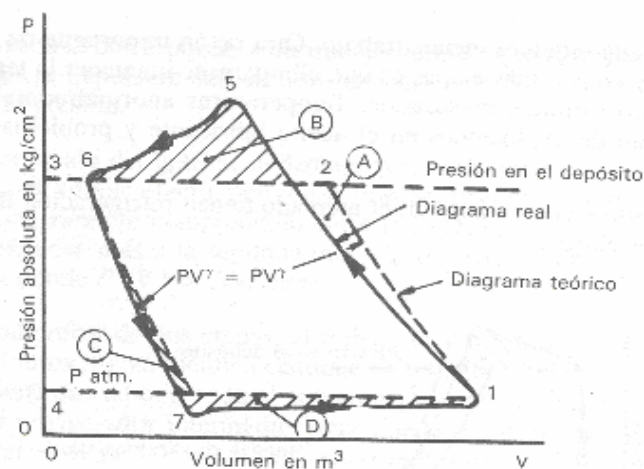


Figura 2.10 Diagrama de trabajo real y teórico de un compresor

Referencia. Manual sobre Aire Comprimido y su aplicación en la Industria. Atlas Copco. Venezuela.

El diagrama teórico está constituido por los puntos 1-2-3-4 y los puntos 1-5-6-7 delimitan el diagrama real. El volumen perjudicial es un espacio muerto que queda representado en el diagrama por el punto número 6. Lo que representan estas áreas con las letras A, B, C y D es motivado por:

- Falta de refrigeración o por un calentamiento excesivo a causa de rozamiento, dicha área puede desaparecer
- Trabajo necesario para efectuar la descarga del cilindro
- Trabajo que el volumen perjudicial no devuelve al expandirse y que es absorbido en la compresión
- Trabajo perdido en el ciclo de aspiración

Las áreas rayadas y con las letras B, C, D expresan las diferencias de trabajo efectuado en cada etapa del ciclo, entre el diagrama teórico y el diagrama real. El diagrama corresponde a un compresor de una etapa, cuyo ciclo de compresión se realiza rápidamente, sin dar tiempo a que el calor derivado de la compresión del aire pueda disiparse en un refrigerante o intercambiador de calor, pudiendo decirse que el aire durante su compresión sigue una evolución adiabática.

2.4.4 COMPRESIÓN DE DOS ETAPAS

Los compresores más usuales en el mercado industrial son de dos etapas. La refrigeración intermedia perfecta se consigue cuando la temperatura del aire que sale del refrigerador intermedio es igual a la temperatura del aire de aspiración del compresor. Si aumentamos el número de etapas, la compresión se acerca a la isoterma, que es la transformación de compresión que requiere menos trabajo. Temperaturas anormalmente altas llevan consigo el riesgo de explosiones en el aceite lubricante y problemas en las válvulas. Figura 2.11

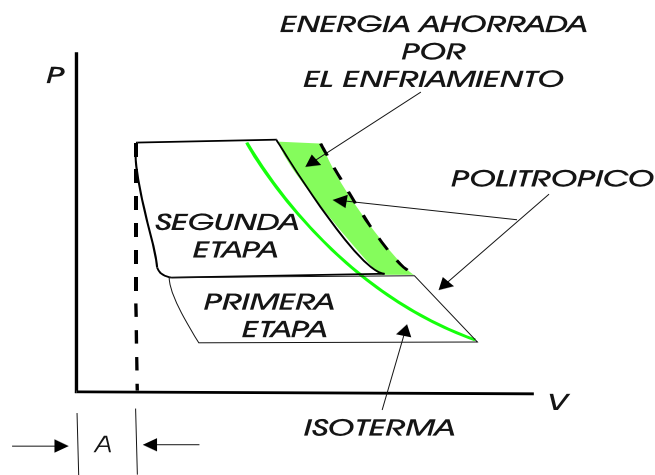


Figura 2.11 Compresión de dos etapas

Referencia. Manual sobre Aire Comprimido y su aplicación en la Industria. Atlas Copco. Venezuela.

Para comprimir aire hasta una presión efectiva de 0.7 MPa, necesitamos teóricamente 37 % más de potencia para un proceso isentrópico que para uno isotérmico.

La compresión por etapas se aproximará al proceso isotérmico a medida que se aumenten el número de etapas. Sin embargo, a medida que se incrementa el número de etapas, el compresor se hace cada vez más costoso y complicado.

2.5 CLASIFICACIÓN DE COMPRESORES

Un compresor volumétrico de pistón alternativo hace la compresión por desplazamiento y un compresor rotativo lo hace por un movimiento rotativo y continuo.

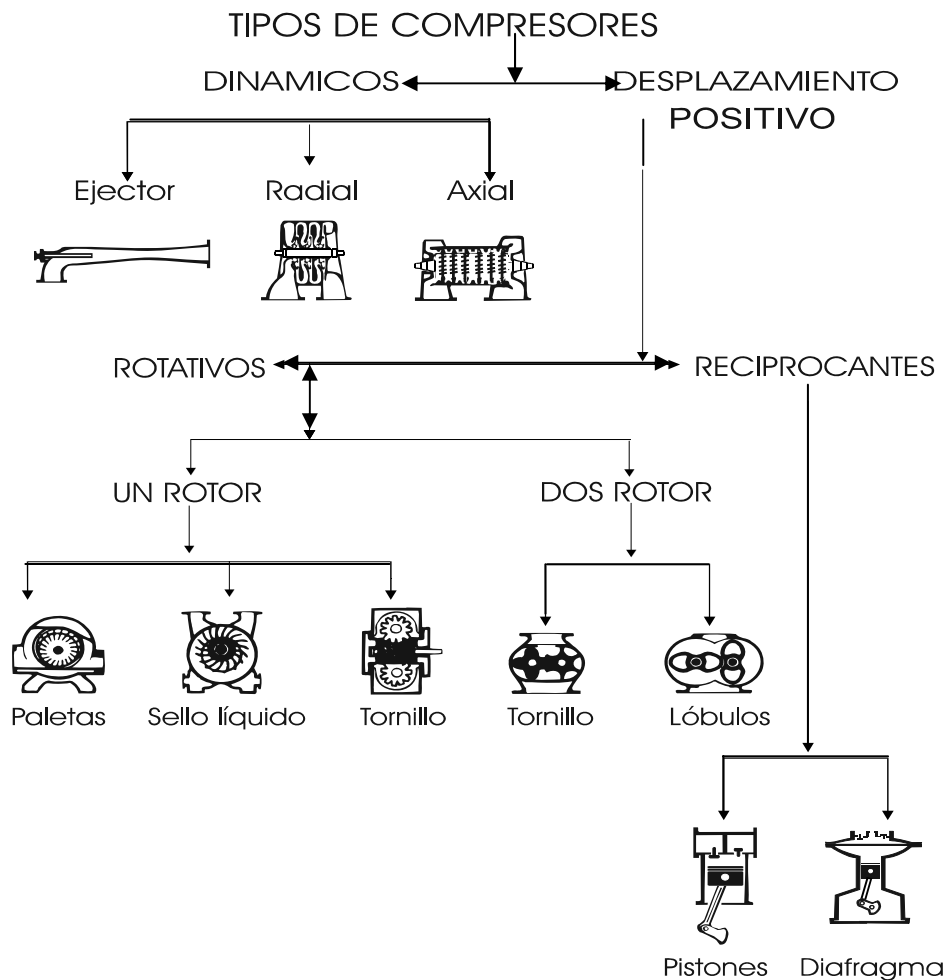


Figura 2.12 Clasificación de compresores
Referencia. Manuales de Teoría de Compresores. Atlas Copco Mexicana.

2.5.1 CLASIFICACIÓN DE COMPRESORES DE DESPLAZAMIENTO

Los compresores alternativos de pistón pueden clasificarse según el número de etapas y por el modo de trabajar el pistón.

1. Por el número de etapas:

En el caso de los compresores de pistón de una etapa, por su alta temperatura de operación, deben operar en ciclos intermitentes. Por lo tanto su aproximación a la curva del proceso Isotérmico esta muy distante de alcanzarse.

Se componen de un carter con cigüeñal, pistón y cilindro. Para su refrigeración lleva, en la parte exterior, aletas que evacuan el calor por convección (figura 2.13) y son utilizados para aplicaciones en donde el caudal sea limitado y en condiciones de servicio intermitente, pues son compresores de pequeñas potencias.

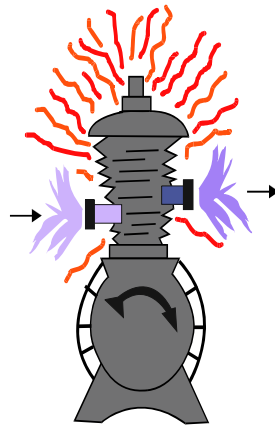


Figura 2.13 Compresor de una etapa

Referencia. Manuales de Teoría de Compresores. Atlas Copco Mexicana.

Compresores de dos etapas. Son compresores que tienen como característica principal que el aire es comprimido en dos etapas en la primera etapa (baja presión) se comprime hasta una presión de 2 a 3 Bar, (0.2 a 0.3 MPa) y en la segunda etapa (alta presión), se comprime hasta una presión de 8 Bar (0.8 MPa). Estos compresores son los más empleados en la industria cubriendo sus caudales una extensísima gama de necesidades. Ver figura 2.14

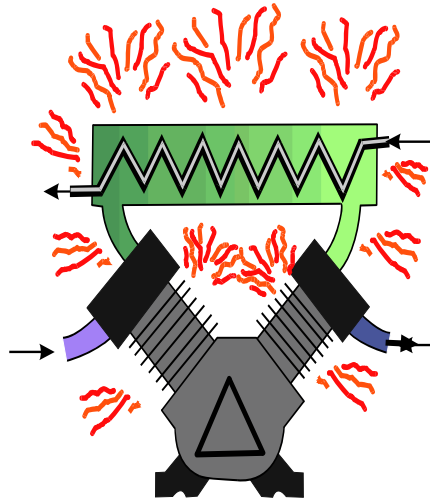


Figura 2.14 Compresor de dos etapas
Referencia. Manuales de Teoría de Compresores. Atlas Copco Mexicana.

2. Por el modo de trabajar el pistón

Un compresor de pistón de simple efecto es cuando trabaja sobre una sola cara del mismo (figura 2.15 a) y precisamente aquella dirigida hacia la cabeza del cilindro. La cantidad de aire desplazado es igual a la carrera por la sección del pistón.

El compresor de pistón de doble efecto de figura 2.15 b es cuando trabaja sobre sus dos caras y delimita dos cámaras de compresión en el cilindro. El volumen entregado es igual a dos veces el producto de la sección del pistón por la carrera. Hay que tener en cuenta el vástago, que ocupa un espacio obviamente no disponible para el aire y como consecuencia, los volúmenes creados por las dos caras del pistón no son iguales.

El compresor de pistón de etapas múltiples o tandem es cuando tiene elementos superpuestos de diámetros diferentes que se desplazan en cilindros concéntricos de la figura 2.15 c. El pistón de mayor diámetro puede trabajar en simple o doble efecto, no así los otros pistones que lo harán en simple efecto. Esta disposición es muy utilizada por los compresores de alta presión.

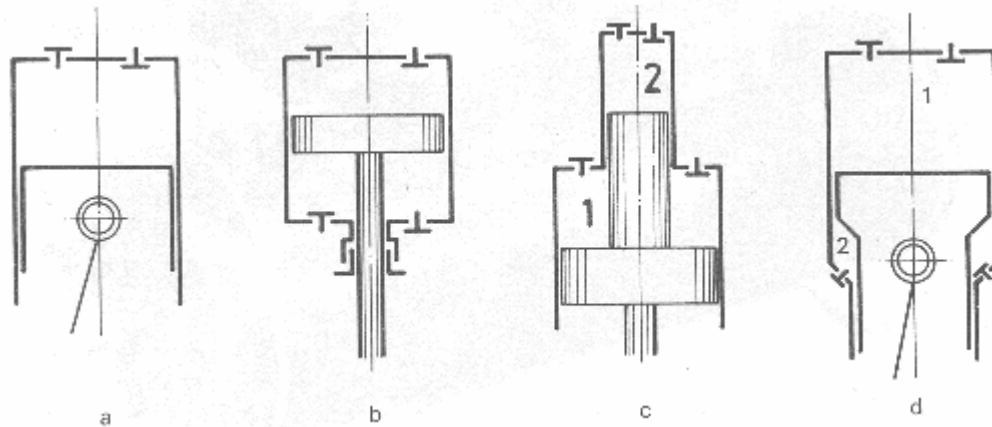


Figura 2.15 Modos de trabajar de los pistones

Explicación de letras a, b, c en el texto anterior y letra d en el texto siguiente. Referencia Manual de Atlas Copco. Venezuela

El pistón se llama diferencial, de la figura 2.15 d, si trabaja a doble efecto pero con diámetros diferentes para conseguir la compresión en dos etapas. Tiene limitada la utilidad y dicha posición de los pistones está cayendo en desuso.

2.5.2 COMPRESORES ROTATIVOS

Los compresores rotativos son las máquinas que producen aire comprimido por un procedimiento rotatorio y continuo esto significa, que empujan el aire desde la aspiración hacia la descarga comprimiéndolo. Se clasifican:

El compresor de aletas tiene el rotor excéntrico en relación al estator y lleva una serie de paletas que se ajustan contra la pared interior del estator por la acción de la fuerza centrífuga. Ver figura 2.16

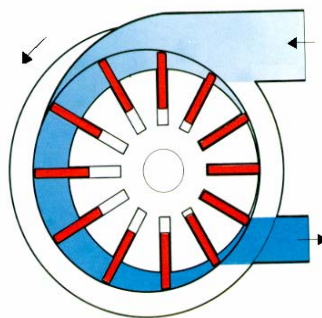


Figura 2.16 Compresor de aletas

Referencia. Información interna de Atlas Copco.

El compresor de Tornillo se compone de un par de rotores que tiene lóbulos helicoidales de engranaje constante. Ver la figura 2.17

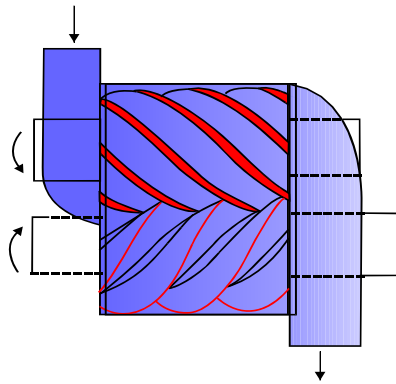


Figura 2.17 Compresor de tornillo
Referencia. Información interna de Atlas Copco.

Compresor roots es una envolvente elíptica con una rueda de paleta giratoria. Ver la figura 2.18

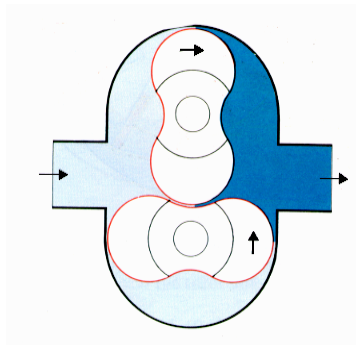


Figura 2.18 Compresor roots
Referencia. Información interna de Atlas Copco.

2.5.3 COMPRESORES DINÁMICOS

Son máquinas de flujo continuo en donde se transforma la energía cinética (velocidad) en presión.

Eyectores. Podemos mencionar que el principal uso de los eyectores se ha dirigido hacia la compresión de gases desde una presión inferior a la atmosférica hasta un valor ligeramente superior a ésta.

Compresores centrífugos radiales. Estos componentes están constituidos por uno o más rodetes y un número de pasajes divergentes fijos a la carcasa denominados difusores, en donde el fluido es desacelerado. El gas a ser comprimido entra por el centro de una rueda giratoria provista con alabes radiales, rodete o impulsor, los cuales lanzan el gas hacia la periferia mediante la fuerza centrífuga. Ver figura 2.19

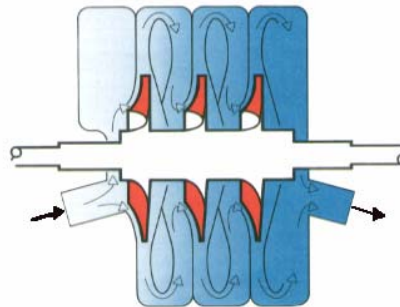


Figura 2.19 Compresor radiales
Referencia. Información interna de Atlas Copco.

Compresores axiales. Los alabes móviles imparten velocidad y presión al fluido al girar el rotor, luego en los alabes fijos la velocidad es convertida en presión por expansión, de manera similar a como ocurre en los compresores radiales. Ver figura 2.20

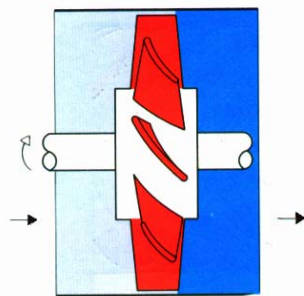


Figura 2.20 Compresor axial
Referencia. Información interna de Atlas Copco.

2.6 RED DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO

El objetivo del sistema de distribución es transportar el aire comprimido desde el depósito de almacenamiento hasta la herramienta o cualquier otro equipo neumático, con una pérdida de carga limitada.

Al proyectar una red de distribución de aire comprimido es necesario, primero estudiar todas las aplicaciones del aire comprimido y pasarlas a un plano y analizar el máximo consumo de aire pico.

2.6.1 PARÁMETROS PARA LA INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

Los parámetros para una instalación de aire comprimido son:

- a) Presión. La presión a la cual se desea trabajar tanto para el caudal entregado por el compresor como para el de utilización en la red. Al hablar de presiones serán siempre presiones efectivas, que se cuentan a partir de la presión atmosférica.
- b) Caudal. El caudal de aire comprimido que debe circular por cada zona de trabajo o ramal de distribución y su magnitud dependerá del planteamiento particular a que pueda ser sometido cada proyecto.
- c) Pérdida de presión. Se refiere a la pérdida de energía que se va originando en el aire comprimido ante los diferentes obstáculos que encuentran en su desplazamiento hacia los puntos de utilización, como son: secador, filtros, tuberías, etc.

2.6.2 COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA RED DE AIRE

- 1. Tubería Principal. A través de esta tubería se transporta al aire comprimido desde el compresor hasta la zona de trabajo.
- 2. Tubería de Distribución. Es la que se encarga de llevar el aire comprimido desde la tubería principal hasta los diversos puestos de trabajo.
- 3. Tubería de unión. Une la tubería de distribución con cada uno de los puestos de trabajo. Los tubos de unión con frecuencia son tubos flexibles.
- 4. Derivación. Se trata de un tubo que sale de la tubería de distribución hasta un determinado lugar de la planta; no es circular y termina en un punto muerto.

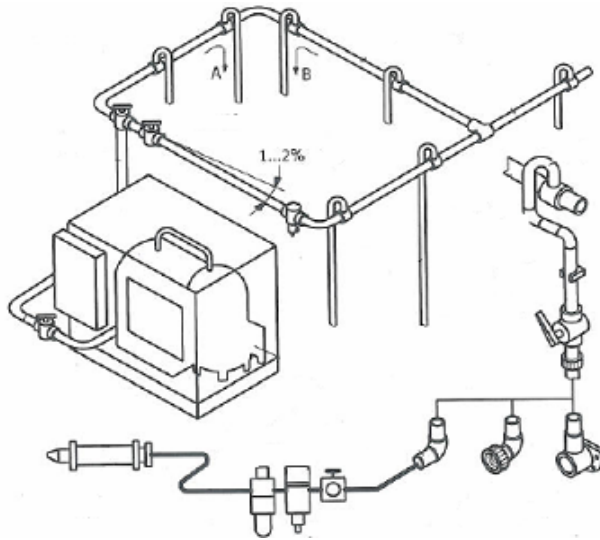


Figura 2.21 Distribución de aire

Referencia. Manual Aire Comprimido, Festo, Serie Blue Digest on Automation Pag. 61

2.6.3 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL

El caudal depende de los siguientes factores:

1. Cantidad de herramientas y/o máquinas consumidoras y el consumo de aire de cada una.
2. Factor de simultaneidad ya que no siempre todas las unidades consumidoras funcionan al mismo tiempo, ver tabla 2.23
3. Pérdidas por desgaste de las herramientas y/o máquinas consumidoras
4. Tiempo promedio de operación durante un día de las herramientas y/o máquinas consumidoras, ver tabla 2.22

El tiempo promedio de operación se expresa en porcentaje. Este criterio tiene en cuenta que la mayoría de las herramientas y/o máquinas consumidoras no está en funcionamiento constantemente.

Herramientas y/o máquinas consumidoras	Tiempo Promedio de Operación
Taladradora	30%
Lijadora	40%
Martillo cincelador	30%
Moldeadora	20%
Pistola Neumática	10%
Máquina para alimentar piezas	80%

Tabla 2.22 Tiempo promedio de operación

Referencia. Manual Aire Comprimido, Festo, Serie Blue Digest on Automation Pag. 56

Las máquinas que no funcionan de modo continuo suelen conectarse en diversos momentos, con lo que no todas funcionan al mismo tiempo.

Cantidad de unidades consumidoras	Factor simultaneidad	Cantidad de unidades consumidoras	Factor simultaneidad
1	1	9	0.73
2	0.94	10	0.71
3	0.89	11	0.69
4	0.86	12	0.68
5	0.83	13	0.67
6	0.80	14	0.66
7	0.77	15	0.65
8	0.75	100	0.20

Tabla 2.23 Factor de simultaneidad

Referencia. Manual Aire Comprimido, Festo, Serie Blue Digest on Automation Pag. 65

Es posible calcular el caudal $\overset{0}{V}_m$ utilizando la siguiente ecuación:

$$\overset{0}{V}_m = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot V_i \cdot \frac{D_i}{100} \cdot FS_i) \quad \text{Ec. 2.18}$$

i Variable de control

n Cantidad de diversas unidades consumidoras

A Cantidad en unidades

V Tiempo de operación en porcentaje. Tabla 2.22

D Duración de la conexión en porcentaje

FS Factor de simultaneidad. Tabla 2.23

Este valor $\overset{0}{V}_m$ se tiene que corregir una vez más de la siguiente manera:

$$\overset{0}{V} = \left[\overset{0}{V}_m + \left[\overset{0}{V}_m \cdot \frac{A_r}{100} \right] + \left[\overset{0}{V}_m \cdot \frac{A_r}{100} \cdot \frac{F_u}{100} \right] \right] \cdot 2 \quad \text{Ec. 2.19}$$

Donde:

A_r = Crecimiento a futuro (promedio 35%)

F_u = Consideración de fugas (promedio 10%)

La duplicación del caudal $\overset{0}{V}$ tiene la finalidad de compensar picos de consumo (que superan el consumo medio).

Considerando que las redes de aire comprimido se pueden utilizar durante mucho tiempo es recomendable prever el montaje posterior de unidades consumidoras adicionales, por lo que la red debe disponer de las reservas correspondientes. Este criterio está incluido en la fórmula anterior (Factor A_r).

2.6.4 PÉRDIDA DE PRESIÓN EN UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO

Cuánto más largos son los tubos tanto mayor es la pérdida de presión en el punto de toma para las unidades consumidoras. Esto se explica por la rugosidad de la pared interior de los tubos y por la velocidad del caudal. En el nomograma de la figura 2.24 se puede leer la pérdida de presión en función del diámetro y de la longitud de los tubos.

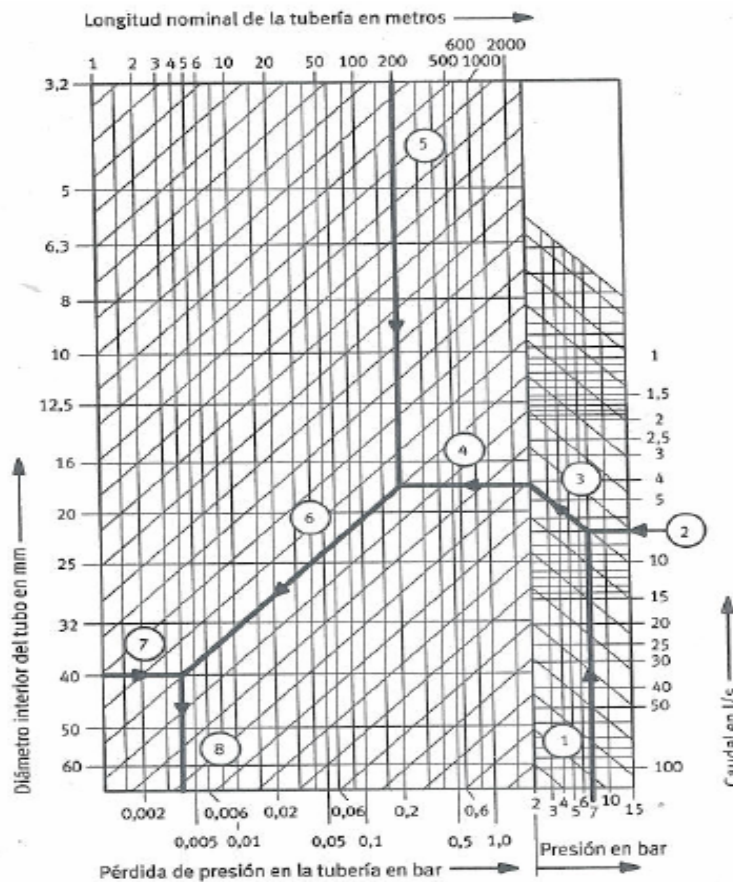


Figura 2.24 Nomograma de caída de presión

Referencia. Manual Aire Comprimido, Festo, Serie Blue Digest on Automation Pag. 69

Las accesorios como: válvulas, codos ofrecen una resistencia mucho mayor al caudal. Para tener en cuenta estos componentes, se calcula con una longitud equivalente de la tubería y el resultado se suma a la longitud real de los tubos antes de calcular o determinar gráficamente el diámetro interior necesario de los tubos. En la figura 5.4 incluyen longitudes equivalentes.



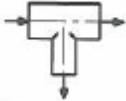
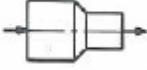
Denominación	Accesorio	Longitudes equivalentes en metros									
		Diámetro interior d del tubo en milímetros									
		9	12	14	18	23	40	50	80	100	
Válvula esférica		0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,6	1,0	1,3	
Codo		0,6	0,7	1,0	1,3	1,5	2,5	3,5	4,5	6,5	
Pieza en T		0,7	0,85	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	7,0	10	
Reductor de 2d a d		0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,9	1,0	2,0	2,5	

Figura 2.25 Longitudes de equivalentes

Referencia. Manual Aire Comprimido, Festo, Serie Blue Digest on Automation Pag. 70

Ello significa que la longitud definitiva de los tubos que debe incluirse en el cálculo es la siguiente:

$$L_{Total} = L_L + \sum_{i=1}^n L_{equivalente} \quad \text{Ec. 2.20}$$

Donde:

n es la cantidad de accesorios

L_L es la longitud real de la tubería

Para ello puede utilizarse el nomograma de la Figura 2.26 incluyendo los puntos 1 hasta 7. El punto de intersección con la escala D en 8 indica el diámetro interior del tubo.

Conociendo el dato de la longitud estimada en punto 1 y el consumo estimado en planta en punto 2 se cruza una línea por estos dos puntos y se hace llegar hasta el eje 1.

Después con los datos de la caída máxima de presión permitida en punto 4 y la presión de trabajo en punto 5 se unen y se tiene un cruce con el eje 2. Ahora para encontrar el diámetro interior de la tubería se unen los puntos encontrados entre el eje 1 y el eje 2 y en el cruce con el eje D se ubica el dato de diámetro interior de la tubería sugerida.

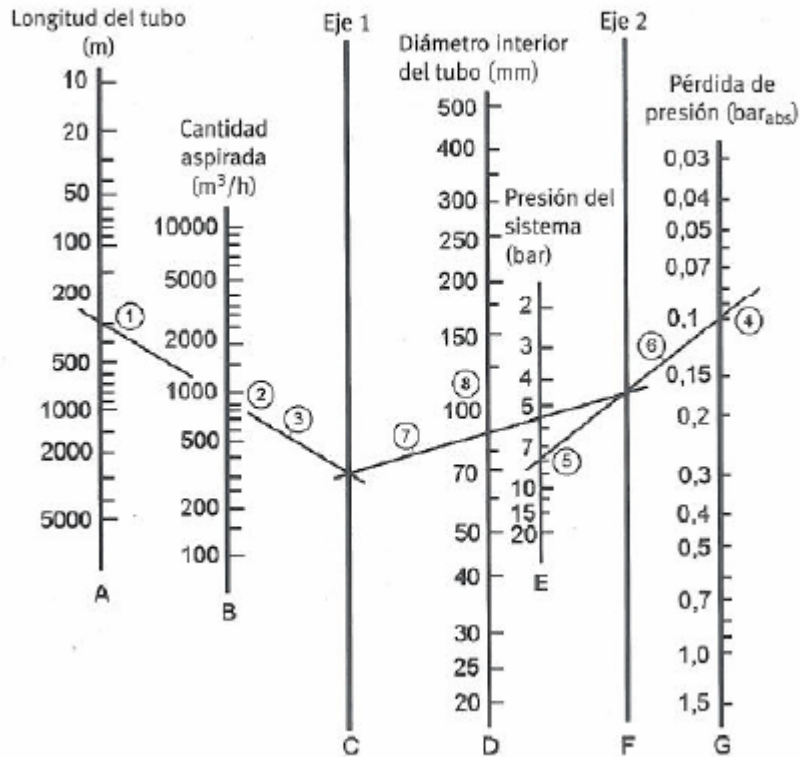


Figura 2.26 Nomograma para cálculo de caída de presión
Referencia. Manual Aire Comprimido, Festo, Serie Blue Digest on Automation Pag. 71

2.6.5 MATERIAL PARA LA TUBERÍA

Finalmente tiene que determinarse el material de los tubos. Para elegir el material de los tubos utilizados en redes de aire comprimido, hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- Calidad de aire comprimido
- Dimensiones de los tubos
- Presión
- Condiciones del clima
- Trabajo de montaje
- Costos del material
- Rigidez de los materiales
- Coeficiente de dilatación térmica del material
- Experiencias y conocimientos en materia de las técnicas necesarias

Los tubos de metal suelen ser más baratos, pero hay que soldarlos o unirlos con conexiones roscadas, por lo que es posible que el interior de los tubos contenga residuos. La pérdida de presión también depende de la rugosidad de la pared interior de los tubos. En la tabla 2.27 se ofrecen datos resumidos sobre la rugosidad de diversos tipos de tubos.

Material	Rugosidad (µm)
Tubo de cobre	Menos de 1.5
Tubo de material sintético	Menos de 1.5
Tubo de acero estirado	10 hasta 50
Tubo de acero soldado	50 hasta 100
Tubo de hierro cincado	120 hasta 150

Tabla 2.27 Rugosidad de material

Referencia. Manual Aire Comprimido, Festo, Serie Blue Digest on Automation Pag. 73

En la tabla 2.28 contiene una comparación más esquematizada entre los tipos de tuberías.

Material	Acero	Cobre	Acero Inox.	Plástico
Presión superior a 12 bar	M.A.	M.A.	M.A.	S
Corrosión, calidad del aire	L	S	M.A.	MA
Temperatura hasta 20 °C	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.
Temperatura hasta 50 °C	M.A.	M.A.	M.A.	S
Características de flujo	S	M.A.	M.A.	MA
Trabajo de montaje	L	S	S	MA
Masa por unidad de longitud	L	L	L	M.A.
Trabajo de mantenimiento	L	M.A.	M.A.	M.A.
Diámetro en 100 metros	S	S	M.A.	M.A.
Disponibilidad de válvulas y racores	M.A.	S	L	M.A.

Donde:

M.A. = Muy Adecuado

S = Suficiente

L = Limitaciones

Tabla 2.28 Comparación esquematizada entre los tubos metálicos y sintéticos

Referencia. Manual Aire Comprimido, Festo, Serie Blue Digest on Automation Pag. 76

2.7 ELEMENTOS DE UN SISTEMA NEUMÁTICO

Como sucede en otras ramas como la eléctrica o la hidráulica, etc., los sistemas neumáticos se simbolizan con elementos según un determinado código para hacer los sistemas más fáciles de comprender.

Actualmente la difusión de los símbolos ISO como revalidación de los símbolos CETOP, parece que definitivamente ha conseguido una definición clara y están introducidos en la

industria, siendo dominados por todos los técnicos que manejan estos sistemas. Los símbolos ISO-CETOP están reunidos en la norma ISO 1219-1 (1991).

2.7.1 VÁLVULAS NEUMÁTICAS

Las válvulas neumáticas son los elementos que dan las señales neumáticas y conducen el aire comprimido a los actuadores neumáticos para que operen.

1. Válvula neumática con 5 vías y 2 posicionamientos con accionamiento manual y regreso por retorno. Normalmente son utilizadas para operación de actuadores doble efecto de manera manual.

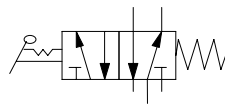


Figura 2.29 Válvula manual 5 vías 2 posiciones

2. Válvula eléctrica neumática con 5 vías y 2 posiciones con accionamiento eléctrico en ambos lados. Se utilizan con mucha frecuencia en máquinas con computadoras industriales para accionar actuadores de doble efecto con señales eléctricas.

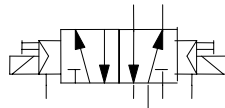


Figura 2.30 Electroválvula 5 vías 2 posiciones

3. Válvula neumática con 3 vías y 2 posiciones con accionamiento neumático y regreso por resorte. Este tipo de válvulas se utilizan con mucha frecuencia en actuadores de simple efecto y también en ambientes donde se previene antiexplosivos.

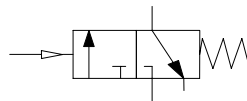


Figura 2.30a Válvula 3 vías 2 posiciones accionamiento neumático

4. Válvula neumática de 3 vías y 2 posiciones con accionamiento mecánico por rodillo y regreso por resorte. Algunas de sus aplicaciones principales son como sensor de señales en sistemas de levas o finales de carrera en actuadores.

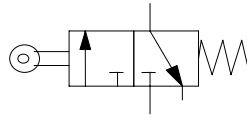


Figura 2.31 Válvula 3 vías 2 posiciones de accionamiento con rodillo

2.7.2 ACTUADORES NEUMÁTICOS

Los actuadores neumáticos son aquellos componentes capaces de transformar la energía potencial del aire comprimido en trabajo mecánico con la función de accionar máquinas o mecanismos.

Los actuadores lineales entregan el trabajo en forma rectilínea de empuje-tracción. Los actuadores de giro proporcionan movimientos angulares. Con los actuadores neumáticos se logra un movimiento lineal de forma sencilla y económica.

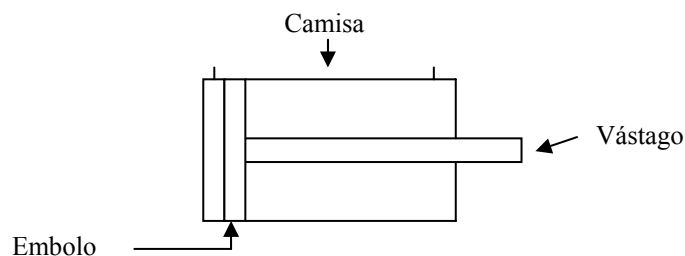


Figura 2.32 Actuador neumático

2.7.2.1 Tipo de Actuadores

1. Actuador Doble Efecto. Con estos cilindros el avance y retorno del émbolo se efectúa con aire comprimido. La fuerza del vástago es menor en el retroceso que en el movimiento de avance, debido a la diferencia de superficies del émbolo.

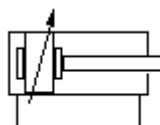


Figura 2.33 Actuador doble efecto

2. Actuator Doble Vástago. En estos cilindros la fuerza del vástago es igual en ambas direcciones. Esto se debe a la misma área en el émbolo por ambas caras.

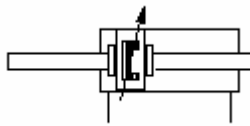


Figura 2.34 Actuador doble vástago

3. Actuator Multiposicional. Con dos o más actuadores se logran varias posiciones. El número de posiciones finales de un actuador es el exponente del número de cilindros acoplados (por ejemplo con dos cilindros $2^2 = 4$ posiciones finales)

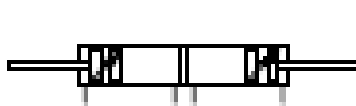


Figura 2.35 Actuador multiposicional

4. Actuator Tandem. Con dos o más actuadores unidos en un mismo cuerpo se logra con un mismo diámetro doblar la fuerza.

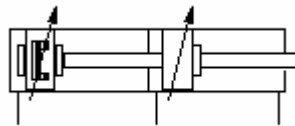


Figura 2.36 Actuador tandem

5. Actuator Giratorio. Con estos actuadores se convierte el movimiento lineal en circular oscilante por medio de un dispositivo mecánico.

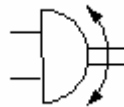


Figura 2.37 Actuador giratorio

6. Actuator con detectores de proximidad magnéticos. Estos actuadores pueden ser de simple o doble efecto. El émbolo del actuador lleva acoplado un imán permanente cuyo

campo magnético acciona los detectores. Con estos interruptores se pueden detectar las posiciones finales o intermedias de los actuadores neumáticos.

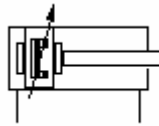


Figura 2.38 Actuador con detectores de proximidad

7. Actuador Simple Efecto. En este actuador se aplica el aire comprimido por una sola cámara. Una vez expulsado el aire de la cámara el vástago vuelve a su posición inicial por medio de un muelle de retroceso incorporado.



Figura 2.39 Actuador simple efecto

2.7.2.2 Velocidad de Accionamiento

Una de las principales ventajas de la utilización del aire comprimido es la velocidad de desplazamiento y depende de:

- La presión del aire
- La longitud de las tuberías y del tamaño de las conexiones
- La fuerza que ha de vencerse

La velocidad de los actuadores neumáticos puede oscilar entre 0.1 y 1 m/s. Por debajo de la velocidad de 0.1 m/s puede producirse un funcionamiento irregular. Por encima de 1 m/s debe cuidarse la vida del actuador en las llegadas de los fines de carrera. Ejemplo: utilizando frenos hidráulicos para amortiguar la llegada del émbolo a las tapas finales.

2.7.2.3 Amortiguamiento

Cuando el émbolo llega al final de su recorrido, golpea y si este golpeteo es repetitivo, entonces se producen deformaciones que acaban destruyendo el actuador. Por lo cual se utilizan elementos hidráulicos o sistemas de amortiguamiento neumático.

2.7.2.4 Trabajo Mecánico

El actuador neumático tiene una acción lineal que transforma la energía del aire comprimido en trabajo mecánico definido por:

$$T = F e = P S L \quad \text{Ec. 2.21}$$

Donde:

P = presión

S = superficie

L = carrera

Por su morfología los actuadores tienen dos constantes principales: la sección del émbolo y la carrera del vástago.

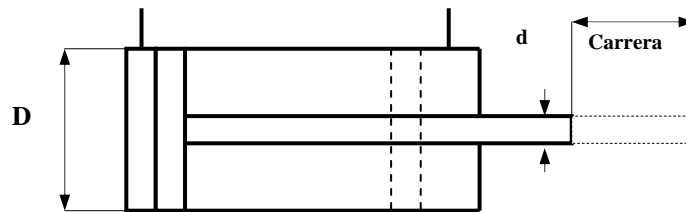


Figura 2.40 Sección esquemática de un actuador de doble efecto.

La sección activa de un actuador con émbolo circular, es:

$$S = \pi \cdot R^2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad \text{Ec. 2.22}$$

Donde:

D es el diámetro del émbolo

2.7.2.5 Fuerza de empuje

La fuerza teórica que es capaz de ejercer un actuador viene dada

$$F = p \cdot 10 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad \text{Ec. 2.23}$$

p = presión (Bar)

D = diámetro del émbolo (cm)

F = fuerza teórica (N)

Para obtener la fuerza efectiva se reduce en promedio el 10% de la fuerza teórica calculada en la ecuación 2.23 por razones de rozamiento o fricción del émbolo.

2.7.2.6 Diagrama Presión –Fuerza

El primer dato para la elección del diámetro de un actuador es la fuerza en relación con la presión de servicio.

Se utilizan valores de fuerza cercanos al calculado, puesto que la fuerza de fricción o rozamiento altera los datos de fuerza calculados y depende de muchos factores como: lubricación, presión de trabajo, contrapresión, forma de la junta, etc. En el diagrama se tiene en cuenta una fuerza de fricción empírica del 10 % aproximadamente.

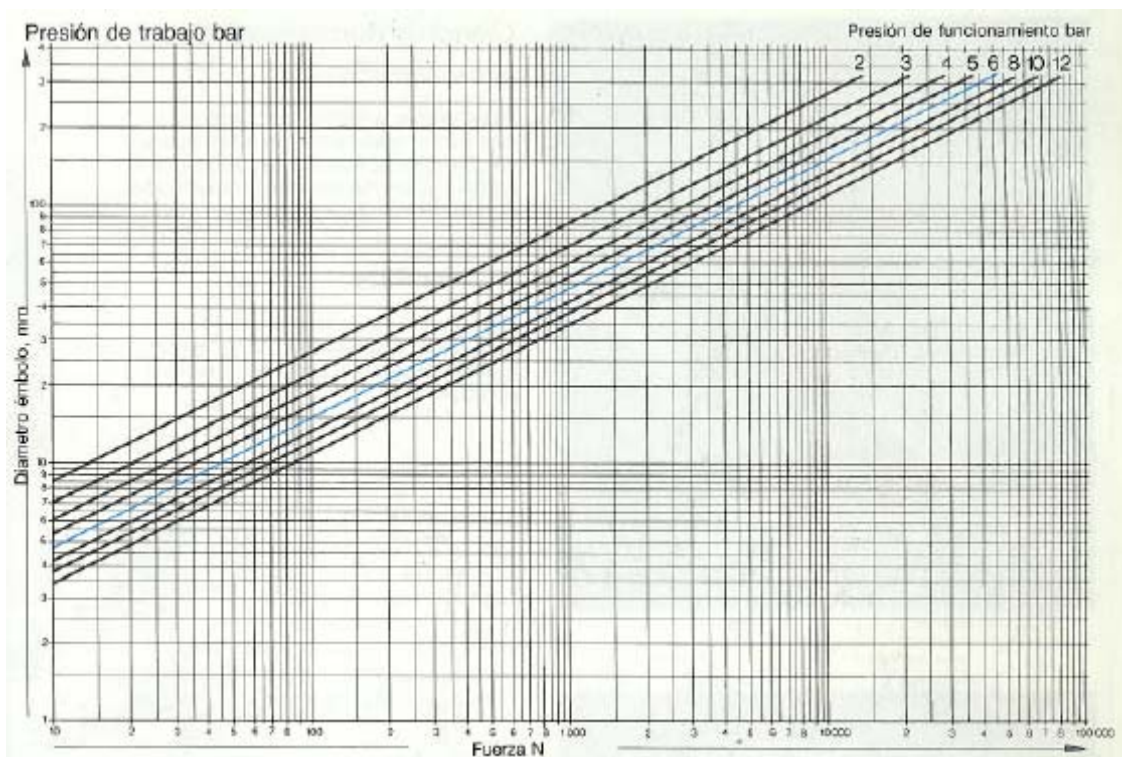


Figura 2.41 Diagrama fuerza-presión
Referencia, Programa de Fabricación, Festo Pneumatic, Pag. 3

La manera de utilizar el diagrama anterior para obtener la fuerza de un actuador es: se une el dato del eje de diámetro del actuador con la presión de operación del mismo, que normalmente es 6 Bar (0.6 MPa) y en el punto que se unan se desplaza hasta llegar al eje de las “X”, donde se va a encontrar el dato de fuerza del actuador en Newton. Ver figura 2.41

Fuerza en avance y en retroceso en actuador. La carrera viene definida por la diferencia de posición entre las dos situaciones extremas del émbolo. Al efectuar los cálculos de esfuerzos deben tenerse en cuenta que en el sentido de salida del vástago, hemos tomado la superficie total del embolo. En el sentido de entrada del vástago la superficie es más pequeña, puesto que es preciso descontar la superficie del vástago. La superficie activa viene dada por:

$$S_1 = \pi \frac{D^2 - d^2}{4} \quad \text{Ec. 2.24}$$

Donde:

D es el diámetro del embolo
 d es el diámetro del vástago

La fuerza teórica que efectúa el actuador en el sentido de entrada del vástago es:

$$F_1 = p \cdot \pi \frac{D^2 - d^2}{4} \quad \text{Ec. 2.25}$$

2.7.2.7 Diagrama de Pandeo

La carga no debe sobrepasar los valores máximos que dependen de la carrera y del diámetro del vástago. El diagrama muestra esta dependencia según la fórmula:

$$F_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{\ell^2 \cdot S} \quad \text{Ec. 2.26}$$

F_K = fuerza de pandeo admisible (N)
 E = módulo de elasticidad (N/mm²)
 J = momento de inercia (cm⁴)
 ℓ = longitud de pandeo, 2 x carrera (cm)
 S = coeficiente de seguridad (elegido 5)

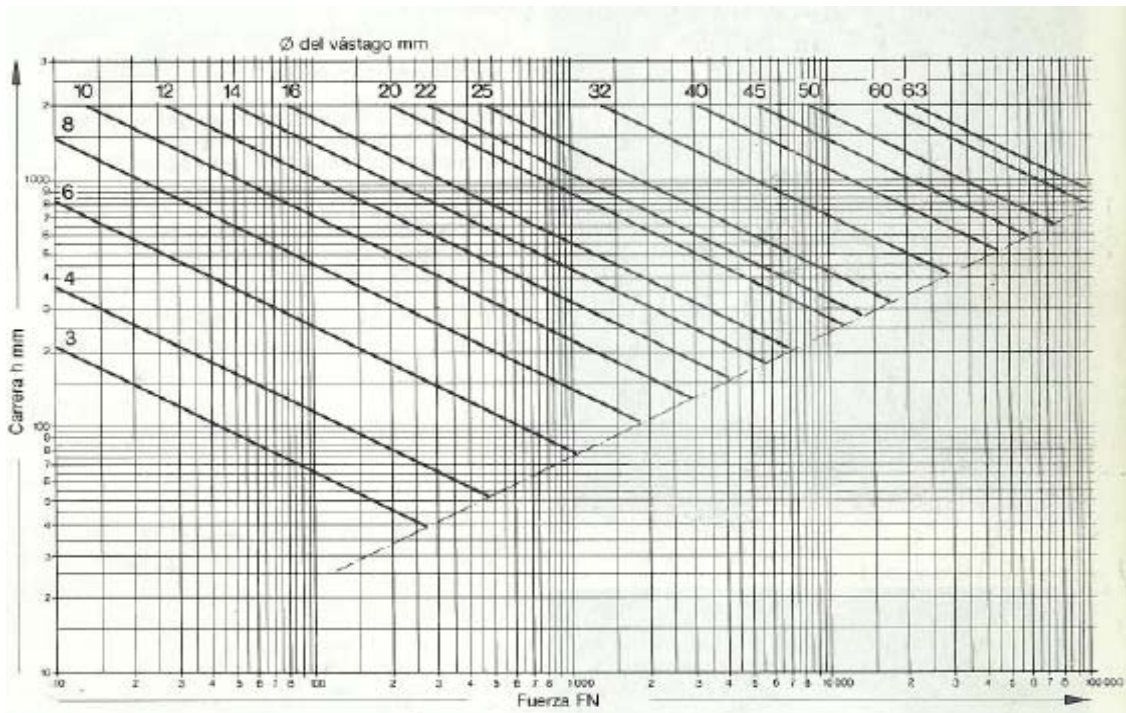


Figura 2.42 Diagrama de pandeo
Referencia, Programa de Fabricación, Festo Pneumatic, Pag. 3

2.7.2.8 Diagrama de Consumo de Aire

El diagrama de la figura 2.43 da el consumo según la fórmula:

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot h \cdot p \cdot 10^{-6} \tag{Ec. 2.27}$$

Q = volumen de aire por cm de carrera (ℓ)

d = diámetro de émbolo o vástago (mm)

h = carrera (constante = 10 mm)

p = presión de trabajo (Bar)

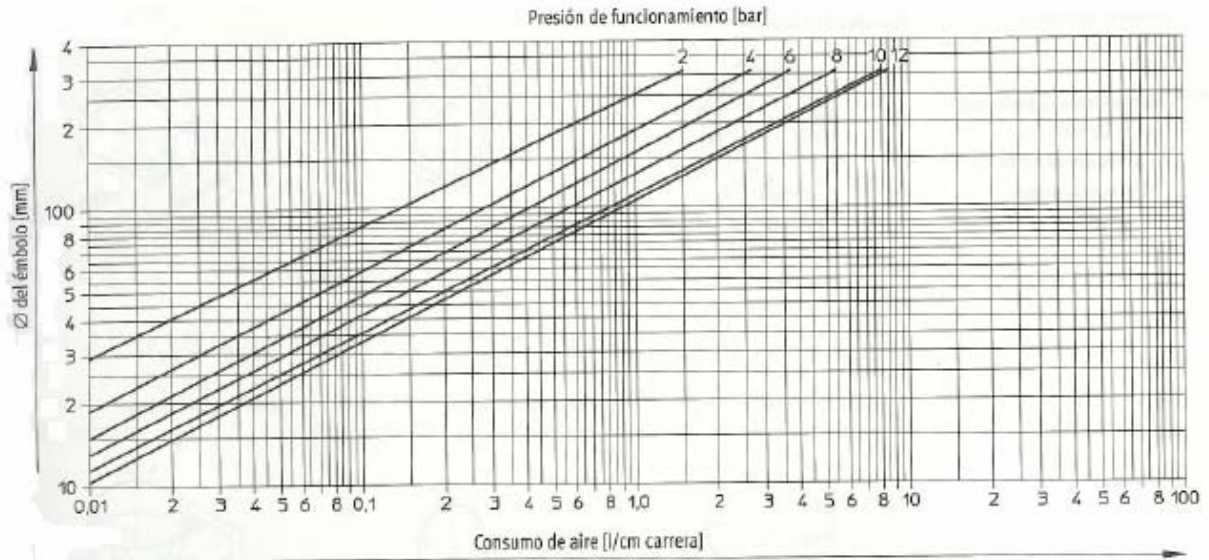


Figura 2.43 Diagrama de consumo de aire
(Referencia, Programa de Fabricación, Festo Pneumatic, Pag. 3)

Los valores determinados de este modo solo representan valores orientativos, puesto que cuando el número de ciclos es elevado, las cámaras no son completamente vaciadas, de manera que el consumo total de aire puede ser considerablemente menor.

2.8 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

2.8.1 MEDICIÓN DE PRESIÓN

La presión se define, como la componente normal de una fuerza, sobre un área determinada.

$$P = \frac{Fn}{S} \quad \text{Ec. 2.28}$$

Donde:

Fn Componente normal de la fuerza

S Superficie donde es aplicada la fuerza

Los elementos de medición de presión se clasifican en tres grupos: mecánicos, electromecánicos y electrónicos.

2.8.1.1 Elemento Mecánico

El tubo de Bourdon es un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, éste tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, por un sector dentado y un piñón.

2.8.1.2 Elemento Electromecánico

Los elementos electromecánicos de presión utilizan un elemento mecánico elástico combinado con un transductor eléctrico que genera la señal eléctrica correspondiente. El elemento mecánico consiste en un tubo Bourdon, espiral, hélice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos que, a través de un sistema de palancas convierte la presión en una fuerza o en un desplazamiento mecánico.

Los elementos electromecánicos de presión se clasifican en los siguientes tipos:

- Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas
- Resistivos
- Magnéticos
- Capacitivos
- Extensiométricos
- Piezoeléctricos.

2.8.2 MEDIDORES DE CAUDAL

2.8.2.1 Medidores Volumétricos.

Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen del fluido, bien sea directamente (desplazamiento) o indirectamente por deducción (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida, torbellino).

Hay que señalar que la medida del caudal volumétrico en la industria se efectúa principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido.

La fórmula de caudal obtenida con los elementos de presión diferencial se basa en la aplicación del teorema de Bernoulli (altura cinética + altura del presión + altura potencial = constante) a una tubería horizontal.

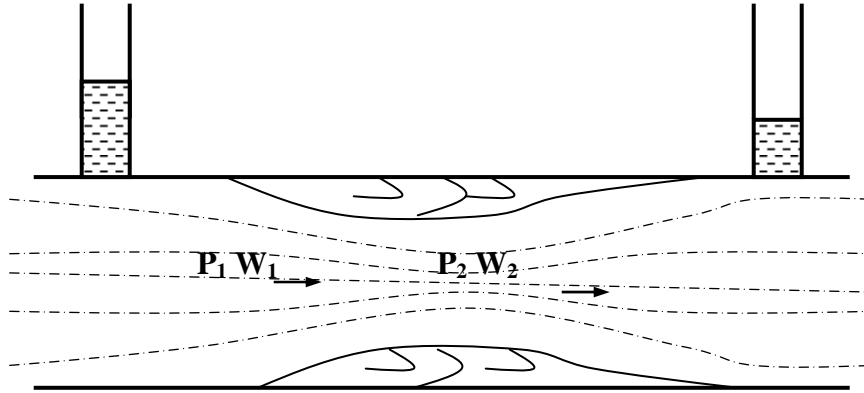


Figura 2.44 Teorema de Bernoulli

$$A_1, D_1, P_1, Z_1, \rho_1$$

$$A_2, D_2, P_2, Z_2, \rho_2$$

$$g\rho_1 Z_1 + P_1 + \frac{\rho_1 w_1^2}{2} = g\rho_2 Z_2 + P_2 + \frac{\rho_2 w_2^2}{2} \quad \text{Ecuación de Bernoulli}$$

Si P_1 , P_2 y w_1 , w_2 son las presiones absolutas y velocidades en la zona anterior a la placa donde el fluido llena todo el conducto y en la vena contracta respectivamente, y A_1 , A_2 son las áreas correspondientes, resulta:

$$\frac{w_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho_o} = \frac{w_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho_o} \quad \text{y} \quad A_1 w_1 = A_2 w_2 \quad \text{Ec. 2.29}$$

Siendo ρ_o la densidad (masa por unidad de volumen) del fluido, habiendo supuesto que ρ_o no varía en toda la longitud estudiada de la vena.

Se obtiene:

$$w_2^2 - \frac{A_2^2 w_2^2}{A_1^2} = 2 \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho_o} \right) \quad \text{Ec. 2.30}$$

Donde:

d = diámetro del orificio (m)

D = diámetro interior de la tubería (m)

$$w_2 = \sqrt{\frac{2\left(\frac{P_1 - P_2}{\rho_o}\right)}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \quad \text{Ec. 2.31}$$

Llamando β a la relación de diámetros $\beta = d/D$, resulta:

$$w_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2 \frac{P_1 - P_2}{\rho_o}} \quad \text{Ec. 2.32}$$

Llamando $E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$ resultando:

$$w_2 = E \sqrt{2 \frac{P_1 - P_2}{\rho_o}} \quad \text{Ec. 2.33}$$

Y el caudal en volumen será:

$$Q_v = S_2 \cdot w_2 = E \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{P_1 - P_2}{\rho_o}} m^3 / s = K \sqrt{\frac{h}{\rho_o}} m^3 / s \quad \text{Ec. 2.34}$$

Y el caudal en peso:

$$Q_m = E \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2(P_1 - P_2) \cdot \rho_o} kg / s \quad \text{Ec. 2.35}$$

Expresando d en m; h , P_1 y P_2 en pascal y ρ_o en kg/m^3 ; y siendo K una constante, d el diámetro del orificio y h la presión diferencial producida por el elemento.

La placa-orificio o diafragma consiste en una placa perforada instalada en la tubería. Dos tomas conectadas en la parte anterior y posterior de la placa, captan esta presión diferencial la cual es proporcional al cuadrado del caudal.

La tobera está situada en la tubería con dos tomas una anterior y la otra en el centro de la sección más pequeña. La tobera permite caudales 60 % superiores a los de la placa-orificio

en las mismas condiciones de servicio. Su pérdida de carga es de 30 a 80 % de la presión diferencial.

El tubo Venturi permite la medición de caudales de 60 % superiores a los de la placa orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga de sólo 10 a 20 % de la presión diferencial. El costo del tubo Venturi es elevado, del orden de 20 veces el de un diafragma y su precisión es del orden de ± 0.75 %.

2.8.3 FLUJOMETROS

En el caso de Festo se requiere que la medición sea fiable, al instante, y fácil de manejar. Las características de maniobra del equipo es que debe ser de poco peso y soportar el uso rudo. Tipos de medidores de flujo.

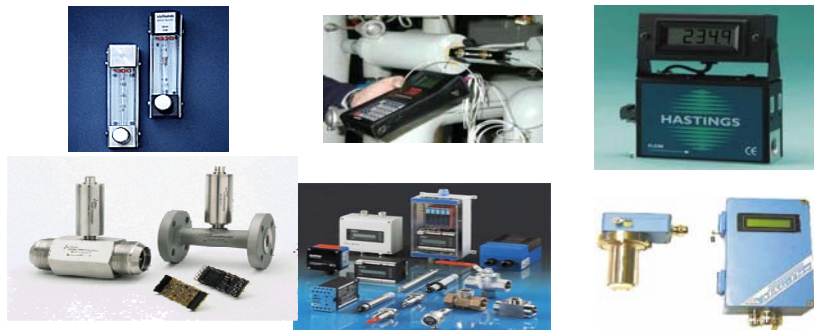


Figura 2.45 Diferentes tipo de equipos de medición de aire comprimido
Referencia. Información Interna de Festo

Flujometro VSM3K

En este caso se explicará el equipo de medición que Festo ha utilizado para este tipo de servicio. Del año 2003 al 2005 se utilizó el VSM3K del proveedor Alemán Postberg ver Figura 2.46. Del 2006 a la fecha Festo Alemania ha desarrollado un nuevo equipo de monitoreo de consumo de aire comprimido con productos Festo como; sensores, válvulas de paso y un sistema para almacenar datos ver Figura 2.47.



Figura 2.46 Equipo de medición de consumos para altos flujos
Referencia. Información Interna de Festo



Figura 2.47 Equipo de medición Festo
Referencia. Información Interna de Festo

2.8.3.1 Descripción del flujometro VSM3K

El principio de funcionamiento del flujometro VSM3K es el del tubo de venturi. En la figura 2.48 se puede observar partes de este equipo de medición como: el sensor de temperatura y el sensor diferencial de presión. El sensor de flujo tiene marcado el sentido del flujo del aire. El rango de flujo para un sensor de 1/2" es de 1 a 3,300 l/min y para el sensor de 1" es de 1 a 8,300 l/min.



Figura 2.48 Sensor de medición del VSM3K
Referencia. Información Interna de Festo

Para realizar la medición es necesario hacer fluir el aire comprimido según la flecha que viene indicada en el sensor como se muestra en la figura 2.49



Figura 2.49 Marca del sentido de flujo del aire comprimido
Referencia. Información Interna de Festo

El sensor de bajo flujo utiliza para su medición 2 galgas piezoeléctricas, ver figura 2.50. El principio de funcionamiento de este sensor es por medio del contacto del aire en las galgas, las cuales producen un calor y al momento de contacto con el aire comprimido existe un cambio de calor en ellas y ese cambio de calor se traduce a medición o flujo de aire comprimido. Este tipo de sensores son sensible humedad en el aire por lo cual se propone utilizar aire filtrado a 5 micrones. En la figura 2.51 se observa un corte transversal donde se coloca el sensor de bajo flujo y se observan las galgas eléctricas que tienen contacto con el aire comprimido y así poder medirlo



Figura 2.50 Sensor de bajo flujo de aire comprimido en el equipo VSM3K
Referencia. Información Interna de Festo

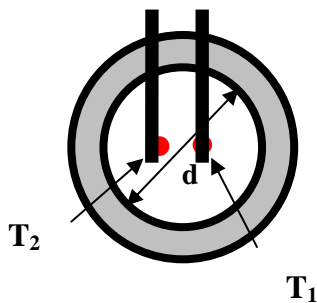


Figura 2.51 Sección del sensor de flujo para bajo flujos
Referencia. Información Interna de Festo

En el sensor de caudal se mide el alto flujo, el cual se calcula registrando la diferencia de presión antes y después del tubo ventura. Para el cálculo del flujo además de la presión, son necesarios los datos de la tobera como son los diámetros, presión, etc. Estos datos se introducen en el programa de visualización y medición en tiempo real.



Figura 2.52 Sensor de caudal alto por diferencia de presión en el equipo VSM3K
Referencia. Información Interna de Festo

2.8.3.2 Equipo de apoyo para la detección de fugas

Para la detección puntual en los elementos neumáticos de las fugas es necesario apoyarse con elementos como sensor ultrasónico y jabones espumantes.

Sensor Ultrasónico

El sensor ultrasónico manual que detecta el ruido que provocan las fugas de aire comprimido en los equipos neumáticos, utiliza un sensor como se ve en la figura 2.53 y con la ayuda de unos micrófonos el técnico puede ir revisando las conexiones y equipos neumáticos de manera puntual.

Ventajas:

- Simplifica el uso cuando se utiliza en máquinas con poco espacio
- Es fácil de operar
- Práctico
- Aplicación limpia

Desventajas:

- Equipo costoso
- Requiere de experiencia para su uso
- No es conveniente su uso en ambientes con ruido
- Poca precisión en la detección



Figura 2.53 Sensor de ultrasonido para detectar fugas en lugares silenciosos
Referencia. Información Interna de Festo

Elemento espumoso

Se utilizan líquidos o spray que se rocían sobre las partes sospechosas del equipo neumático y se observa si se produce burbujeo provocado por eventuales fugas de aire comprimido. Ver figura 2.54. Actualmente por cuestiones ambientales muchos de los spray están siendo retirados del mercado.

Ventajas:

- Es un producto económico
- Fácil de usar
- Apropiado en ambientes ruidosos
- Posibilidad de una rápida detección

Desventajas:

- No es apropiado para ambientes de la industria alimenticia
- Se dificulta su uso en maquinas con poco espacio
- No profesional.



Figura 2.54 Elemento espumoso para detectar fugas
Referencia. Información Interna de Festo

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA PARA LOGRAR AHORROS EN EL AIRE COMPRIMIDO

3.1 DETECTAR ÁREAS DE OPORTUNIDAD

3.1.1 SELECCIONAR EMPRESAS Y ÁREAS

Las empresas que usan el aire comprimido para aplicaciones con equipo neumático, tiene la oportunidad de buscar áreas de mejora para este recurso. Las empresas con mayor posibilidad de encontrar ahorros en aire comprimido son:

- Automotriz
- Autopartes
- Metalmecánica
- Alimenticia
- Plásticos
- Electrónica
- Bebidas
- Electrodomésticos
- Farmacéutica

Y las áreas dentro de las empresas con las áreas de mayor oportunidad son:

Áreas de Ensamble
Áreas de Manufactura
Áreas de Producción

Además del área, otro criterio importante que ayuda a ubicar posibles ahorros en aire comprimido son las empresas que tienen un nivel de mantenimiento deficiente hacia los equipos neumáticos.

Los montos de ahorro van a depender de la cantidad de aire comprimido que se utiliza en las empresas y de los desperdicios del aire comprimido que se tienen.

3.1.2 SELECCIONAR MÁQUINAS Y/O PROCESOS

Las máquinas o proceso con mayor área de oportunidad de encontrar desperdicios de aire comprimido son principalmente:

- Procesos automáticos
- Manipulación
- Herramientas neumáticas
- Uso de aire comprimido como:
 - sopleteo
 - enfriamiento
 - desplazamiento
 - expulsión

Si bien es cierto que hacer los estudios de aire comprimido en cada uno de los consumidores dentro de las empresas es una tarea grande y costosa, no deja de ser interesante e importante. Si el objetivo es lograr ahorros, entonces se va a buscar la forma de hacer la mínima cantidad posible de mediciones pero efectivas dentro del área seleccionada; se necesita también definir los criterios para buscar la cantidad de mediciones en los procesos o máquinas de mayor consumo.

Hacer un recorrido en el área seleccionada para ubicar los mayores consumidores. Se puede apoyar en los siguientes puntos para localizar las áreas con mayor oportunidad de ahorro:

1. Cantidad y tamaño de actuadores
2. Ciclos de operación y frecuencia de actuadores. (Mayor a 10 golpes por minuto)
3. Usos de limpieza o expulsión del aire comprimido en manera constante
4. Generación de vacío por venturi
5. Mantenimiento deficiente a equipo neumático
6. Ruido por fugas de aire comprimido en operación
7. Ruido por fugas en conexiones, uniones en reposo
8. Detección de equipo neumático obsoleto
9. Presiones altas de operación
10. Tipo y cantidad de máquinas similares.

Después de ubicar los tipos de consumidores grandes ahora se va a determinar la cantidad de mediciones y se pueden seguir los siguientes criterios:

- a) Muestra representativa de un grupo de máquinas o procesos similares.

Para dimensionar el tamaño de la muestra es importante hacer una selección muy diversa y se divide en tres criterios: primero los equipos con fugas o mal uso muy notable y desperdicios críticos; segundo los equipos o máquinas que tengan condiciones en términos medios de desperdicios no tan críticos; y tercero en procesos o máquinas en condiciones buenas de mantenimiento o máquinas más recientes.

b) Cuando existe una variedad y cantidad alta de procesos y tipo de maquinaria sería difícil buscar un grupo para iniciar las mediciones pero se pueden tomar como criterios:

Disponibilidad de paro del proceso y/o máquina
Importancia en el proceso de la máquina o proceso
Tiempo de paro máximo

En el diagrama de flujo se describe los procesos necesarios para optimizar los consumos de aire comprimido y justificar la inversión. Ver figura 3.1

3.2 DETERMINAR EL COSTO DEL AIRE COMPRIMIDO

El costo del aire comprimido varía de empresa a empresa y esto se debe a los diferentes gastos y costos por ejemplo, el costo de la energía eléctrica varía por zonas del país y por la hora del día, la relación de consumo de energía eléctrica y la producción de aire en los compresores varía dependiendo los tamaños de motores, las horas de operación de los compresores al año, los gastos en mantenimiento y servicios son gastos que hacen que el costo de aire comprimido cambie en cada empresa. Por lo cual es importante realizar el cálculo del costo de producción de 1 m^3 de aire comprimido en cada planta. A partir de esto comienza la siguiente etapa que es el análisis de la cantidad de aire que se está desperdiciando en los procesos neumáticos y la toma de decisiones en cuestión de ahorros.

Dado que las fugas de aire no constituyen actualmente una contaminación del medio ambiente de forma directa o un peligro latente para la salud del usuario, no suele tomarse muy en serio la solución de este problema. Sin embargo, la estimación del costo del aire comprimido en función de una unidad de referencia permitirá hacer estimaciones del costo que significan dichas pérdidas de aire.

Uno de los gastos importantes para producir aire comprimido es la energía eléctrica que consumen los motores eléctricos de los compresores. Para evaluar el costo del aire comprimido generado, se tomarán como base los consumos de energía eléctrica, costos de mantenimiento y mantenimiento a los compresores y su producción de aire. Para estimar el valor de los desperdicios de aire comprimido se tomará como base el costo por volumen de un 1 m^3 de aire comprimido a 6 Bar (0.6 MPa).

El precio promedio del kWh en alta tensión y media tensión de la energía eléctrica fue obtenido de la base de datos en Internet de CFE para la zona centro durante el año 2007 y se utilizó para calcular el costo del aire comprimido en la tabla 3.3

El precio se promedió con los 3 costos de la energía por día y el promedio es de 1.2 \$/kWh.

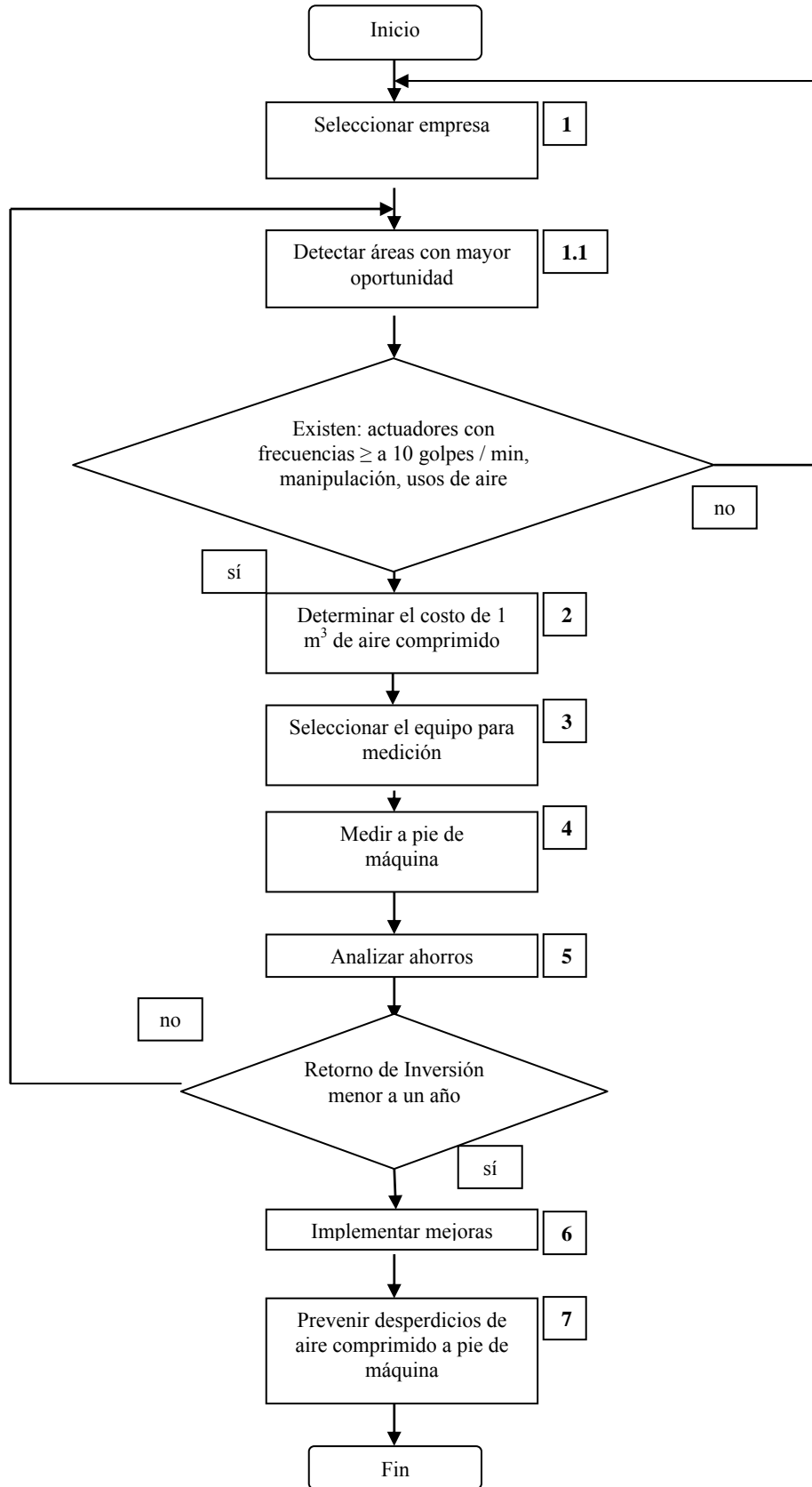


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología para ahorro de energía neumática

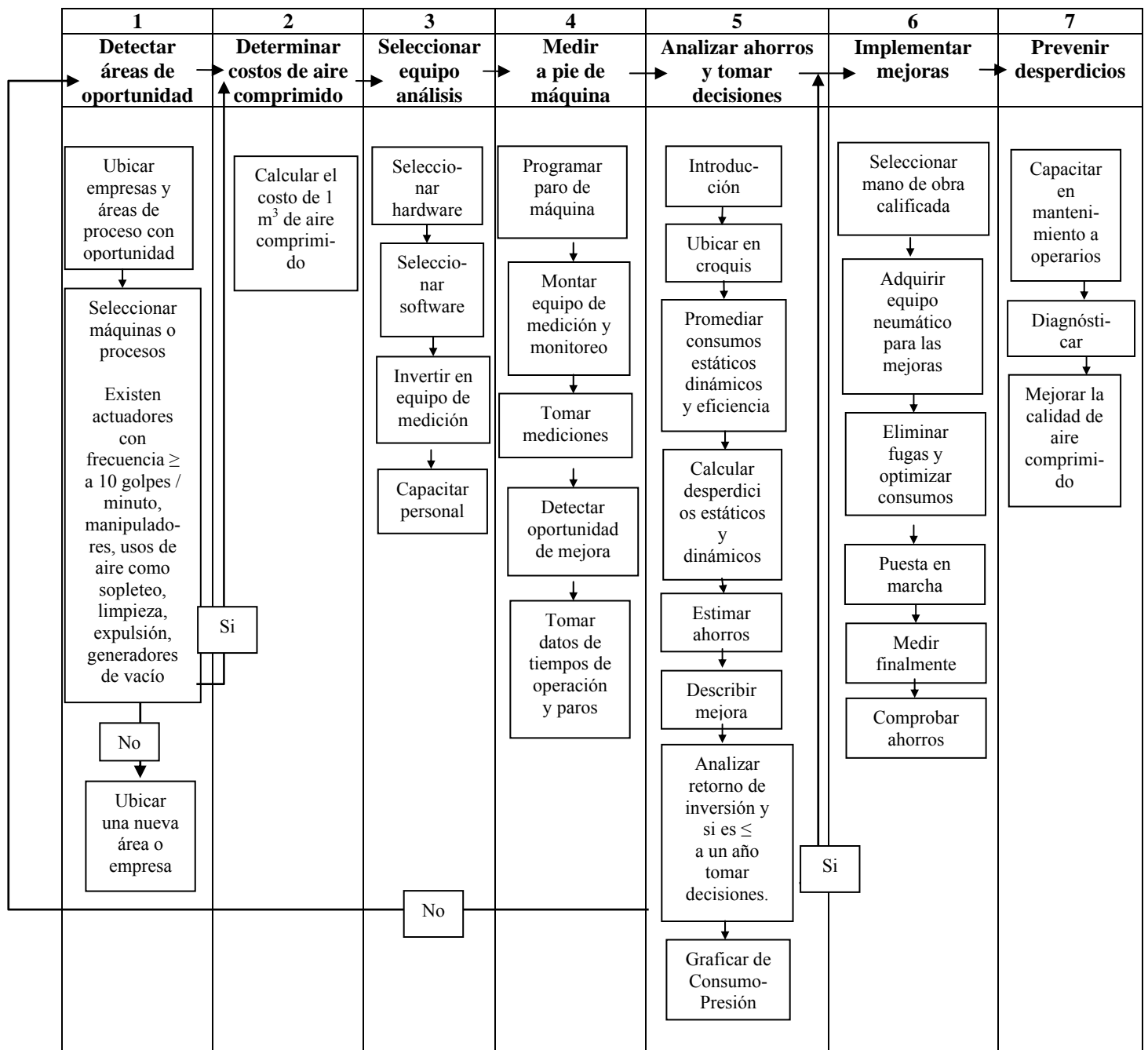


Tabla 3.2 Pasos principales de la metodología y sus acciones correspondientes.

3.2.1 CÁLCULAR EL COSTO DEL AIRE COMPRIMIDO POR 1 M³

Para el cálculo del costo del de aire comprimido entregado por compresores se consideran los siguientes costos como se observa en la formula siguiente

- a) Costo de energía
- b) Depreciación
- d) Costo de mantenimiento (Mano de obra, refacciones y servicios)

$$C = (E + M + D) \quad \text{Ec 3.1}$$

Donde:

C = costo anual por compresor

E = costo de energía

M = refacciones, mano de obra y servicios

D = depreciación

- a) Costo de energía (E)

Se refiere a los gastos promedio anual en consumo de energía eléctrica en los motores eléctricos de los compresores. Para es cálculo se utiliza la fórmula 3.1 y para su cálculo es necesario: el tiempo de operación anual de cada uno de los compresores, potencia específica de los motores, la eficiencia de los motores, el costo promedio del kWh y la capacidad de volumen de cada compresor.

$$E = \frac{(P \cdot I \cdot W \cdot A \cdot Q)}{F} = \frac{\left(\frac{1.1G \cdot 100}{Q} \cdot I \cdot W \cdot A \cdot Q \right)}{F} = \frac{(1.1G \cdot 100 \cdot I \cdot W \cdot A)}{F} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde:

E = costo de energía (\$/año)

P = potencia específica (HP/ ft³/min)

W = 0.746 (kW/HP)

I = costo promedio del kWh(\$/kWh)

A = horas de operación por año (h/año)

Q = capacidad en volumen del compresor (ft³/min)

F = eficiencia de motor (%)

G = potencia nominal del motor (HP)

$$P = (BHP / Q) \cdot 100 \quad \text{Ec. 3.2a}$$

Donde: BHP = 1.1(G), sustituir en ecuación 3.2a

“Brake horse power”. Potencia tomada en el eje de entrada del compresor.

Para este ejemplo se realizará el cálculo del costo energético con 3 tamaños diferentes de compresores. En este caso se tomará como dato de operación de los compresores un tiempo

de 8,000 horas por compresor; esto equivale a operar 24 horas por día de lunes a sábado y algunos domingos; el costo promedio de kilowatts utilizado para el centro del país y este caso es de 1.2 \$/kWh. La eficiencia en motores fue de 91 %. La tabla 3.3 muestra el cálculo del consumo energético anual con base a la ecuación 3.2

MODELO	CAPACIDAD (CFM)	POTENCIA ESPECIFICA	HORAS ANUAL	COSTO ENERGIA ANUAL (MXP)
50 HP	235	23.40	8,000	\$ 432,843.95
75 HP	370	22.30	8,000	\$ 649,265.93
100 HP	500	22.00	8,000	\$ 866,268.13

Tabla 3.3 Costo de energía anual

b) Depreciación

Se calculó el valor de la depreciación utilizando el método de línea recta, que se basa en los años de vida útil de activo. Considerando una vida útil de los compresores de tornillo lubricado de 10 años y un monto de recuperación de cero pesos al final de su vida útil ver tabla 3.4. El cálculo de depreciación esta en la tabla 3.4a. La ecuación 3.3 de la depreciación.

MODELO	COSTO (MXP)	MONTO DE RECUPERACIÓN
50 HP	\$ 199,540.0	\$ 0.0
75 HP	\$ 235,180.0	\$ 0.0
100 HP	\$ 337,700.0	\$ 0.0

Tabla 3.4 Datos de costos y recuperación en compresores

$$Depreciación = \left(\frac{Costo - Recuperación}{Vida_Util} \right) \quad \text{Ec. 3.3}$$

Modelo	50 (HP)	75 (HP)	100 (HP)
DEPRECIACIÓN POR AÑO (MXP)	\$ 19,954.0	\$ 23,518.0	\$ 33,770.0

Tabla 3.4a Valor de depreciación por compresor por año

c) Costos de Mantenimiento

Para el cálculo de mantenimiento es necesario considerar todos los gastos como: las refacciones, servicios y la mano de obra que se utiliza anualmente en cada uno de los compresores. En este caso se va a describir el costo del mantenimiento anual en un compresor de 50, 75 y 100 HP. Se considerarán un tiempo de vida similar en compresores. El cálculo es mostrado en la tabla 3.5, 3.6 y 3.7 respectivamente.

COSTOS DE MANTENIMIENTO ANUAL PARA UN COMPRESOR DE 50 HP			
DESCRIPCION	COSTO (MXP)	CANTIDAD	COSTO TOTAL(MXP)
Filtro de aire primario	\$600.00	6	\$ 3,600.00
Filtro de aire secundario	\$517.00	3	\$ 1,552.50
Filtro de aceite	\$547.50	8	\$ 4,380.00
Aceite hidrocarburo	\$90.00	70	\$ 6,300.00
Regulador de presión	\$1,845.00	1	\$ 1,845.00
Switch de presión	\$2,850.00	1	\$ 2,850.00
Separador primario	\$3,480.00	2	\$ 6,960.00
Separador secundario	\$3,210.00	2	\$ 6,420.00
Mano de obra	\$26,000.00	1	\$ 26,000.00
TOTAL (MXP) \$			\$ 59,907.50

Tabla 3.5 Gastos de mantenimiento anual en compresor de 50 HP

COSTOS DE MANTENIMIENTO ANUAL PARA UN COMPRESOR DE 75 HP			
DESCRIPCION	COSTO (MXP)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (MXP)
Filtro de aire primario	\$600.00	6	\$ 3,600.00
Filtro de aire secundario	\$517.00	3	\$ 1,552.50
Filtro de aceite	\$547.50	8	\$ 4,380.00
Aceite hidrocarburo	\$90.00	80	\$ 7,200.00
Regulador de presión	\$2,145.00	1	\$ 2,145.00
Switch de presión	\$2,850.00	1	\$ 2,850.00
Separador primario	\$3,480.00	2	\$ 6,960.00
Separador secundario	\$3,210.00	2	\$ 6,420.00
Mano de obra	\$26,000.00	1	\$ 26,000.00
TOTAL (MXP) \$			\$ 61,107.50

Tabla 3.6 Gastos de mantenimiento anual en compresor de 75 HP

COSTOS DE MANTENIMIENTO ANUAL PARA UN COMPRESORE DE 100 HP			
DESCRIPCION	COSTO (MXP)	CANTIDAD	COSTO TOTAL(MXP)
Filtro de aire primario	\$800.00	6	\$ 4,800.00
Filtro de aire secundario	\$517.00	3	\$ 1,552.50
Filtro de aceite	\$547.50	8	\$ 4,380.00
Aceite hidrocarburo	\$90.00	85	\$ 7,650.00
Regulador de presión	\$2,145.00	1	\$ 2,145.00
Switch de presión	\$2,850.00	1	\$ 2,850.00
Separador primario	\$3,480.00	2	\$ 6,960.00
Separador secundario	\$3,210.00	2	\$ 6,420.00
Mano de obra	\$28,000.00	1	\$ 28,000.00
TOTAL (MXP) \$			\$ 64,757.50

Tabla 3.7 Gastos de mantenimiento anual en compresor de 100 HP

Después de calcular los 3 rubros principales de gastos en cada uno de los compresores, se evalúa el costo para producir 1,000 ℓ de aire a 6 Bar (0.6 MPa) en cada uno de los compresores. Utilizando la ecuación 3.1 en cada uno de los compresores se obtendrá el costo total anual, ver tabla 3.8

Por ejemplo en el compresor de 50 HP el costo total anual es:

$$C = \$ 432,843.95 + \$ 59,907.5 + \$ 19,954.0 = \mathbf{\$ 512,705.4 \text{ (Costo total anual en 50 HP)}}$$

El siguiente paso es calcular el costo total por hora,

$$D = C / A \tag{Ec 3.4}$$

Donde:

C= costo anual

A = tiempo de operación anual

$$D = 512,705.4 \text{ \$/año} / 8,000 \text{ horas/año} = 64.1 \text{ \$/hora}$$

El dato de la capacidad de producción de aire del compresor en (Q) y el costo por hora de esa producción de aire comprimido (D) se obtiene el costo de 1 m³ con la ecuación 3.5.

$$Y = D/Q \tag{Ec. 3.5}$$

Donde:

Y = Costo por metro cúbico (\$/m³)

D = Costo por hora de aire comprimido (\$/hora)

Q = Cantidad de aire comprimido producida en una hora (m³/hora)

Ejemplo:

$$64.11 \text{ \$/hora} / 399 \text{ m}^3/\text{hora} = 0.16 \text{ \$/m}^3$$

De esta manera se obtiene el costo para generar 1 m³ de aire comprimido del compresor de 50 HP. Después de calcular el costo de generación de aire comprimido en 1 m³ para cada compresor, es necesario obtener un costo promedio de todos los compresores que operan en la planta.

Encontrar el promedio del costo de 1 m³ en estos tres compresores:

Ejemplo:

Sumar los 3 datos y dividirlos entre el número de compresores

$$(\$ 0.16 + \$ 0.145 + \$ 0.142) / 3 = \mathbf{0.15 \text{ \$/m}^3}$$

MODELO	COSTO ENERGIA ANUAL	MANTTO ANUAL	DEPRECIACIÓN ANUAL	TOTAL ANUAL	CAUDAL (m ³ /h)	\$/ HORA	\$/m ³ (0.6 MPa)
50 HP	\$432,843.95	\$ 59,907.50	\$ 19,954.00	\$ 512,705.4	399	\$ 64.1	\$ 0.16
75 HP	\$649,265.93	\$ 61,107.50	\$ 23,518.00	\$ 733,891.4	628.2	\$ 91.7	\$ 0.145
100 HP	\$ 866,268.1	\$ 64,757.50	\$ 33,770.00	\$ 964,795.1	849.6	\$ 120.6	\$ 0.142

Tabla 3.8 Costo de producir 1 metro cúbico de aire comprimido por compresor

Algo importante que resalta en el cálculo del costo de un metro cúbico de aire comprimido es que a mayor tamaño de compresor el costo del aire comprimido es más económico.

Para los cálculos de los desperdicios de aire comprimido en los sistemas neumáticos en la metodología siguiente se va a utilizar el dato promedio de \$ 0.15 MXP por metro cúbico de aire comprimido como ejemplo.

Después de obtener el costo promedio de 1 m³ de aire comprimido dentro de la planta sigue la etapa de medición y toma de decisiones.

3.3 SELECCIONAR EQUIPO PARA ANÁLISIS

3.3.1 SELECCIONAR HARDWARE

Para las mediciones de flujo de aire comprimido a pie de máquina se utiliza sensores de flujo con principios de medición tipo diferencia de presión (venturi) o principio de medición térmico ver figura 3.10. El tipo de sensor requerido son aquellos que el fluido pasa por el sensor. Debe de existir un rango de medición en el sensor o sensores de 3 a 5,000 l/min. Este caudal es un valor promedio de consumo para cubrir la mayoría de aplicaciones industriales a pie de máquina. Si no fuera posible obtener este rango completo de flujo en un solo sensor, es necesario adquirir los sensores hasta lograr abarcar el rango mencionado. Puede dividirse en dos tipos.

1. Sensor de bajo flujo. Rango de flujo de 3 a 200 l/min. Tipo de sensor para realizar las mediciones en reposo o estáticas. Con conexiones roscadas de 1/4".
2. Sensor de alto flujo. Rango de flujo de 100 a 5,000 l/min. Tipo de sensor para realizar las mediciones dinámicas o en operación.

Otra característica necesaria en los sensores de flujo es que puedan enviar datos de flujo, presión y tiempo con un programa para crear una base de datos con está información.

Por ejemplo la marca Alemana VSM3K (Postberg) con sensores de flujo tipo venturi maneja los siguientes rangos de flujo, como se observa en la tabla 3.9

Tamaño de Sensor (Ø)	Rangos de Flujo (l/min)
1/2"	3 - 3,300
1"	5 - 8,200
2"	20 - 20,000

Tabla 3.9 Rangos de flujo en sensores de la marca VSM3K



Figura 3.10 Sensor de flujo Festo tipo MS6
Referencia. Cortesía Festo México

Se requiere que los sensores cuenten con la característica de almacenar las mediciones de forma electrónica. Existen ya equipos completos que pueden mandar la información a una PC en tiempo real y/o almacenar cantidad de datos de manera electrónica.

En el reporte final se tienen que presentar y manejar consumos promedios, por lo cual es necesario utilizar las herramientas de Excel.

Laptop o PC

Es una herramienta necesaria para almacenar de forma directa los datos de flujo, presión y tiempo principalmente. Tan bien se utiliza para ver en tiempo real los comportamientos de consumo presión durante la medición.

Herramientas y conexiones

Antes de comenzar cualquier medición es necesario visitar la máquina para conocer el tamaño de tubería de alimentación de aire comprimido y ubicar el punto donde se va a montar el equipo de medición. Esto con el fin de prevenir toda la herramienta y conexiones necesarias para el montaje como: llaves estilson, llaves tipo perico, tramos de manguera, coples, uniones, etc. Un sensor de ultrasonido para detectar fugas en lugares con muy poco ruido.

3.3.2 SELECCIONAR SOFTWARE

Para administrar y almacenar las mediciones es necesaria la utilización de programas. Los sensores de flujo con la característica de almacenar datos, utilizan programas para el procesado de la información y visualización en tiempo real. En el caso de Festo se utiliza el programa llamado “MSR” para almacenar y visualizar la información durante la medición en planta.

Otro tipo de programa que tiene gran utilidad para utilizar las mediciones y visualizar de forma automática diferentes tipos gráficas, promedios, costos.

Como ejemplo, un programa desarrollado por Festo Alemania llamado “energy saving service” con las siglas “FESS” para obtener de forma automática datos como: consumos promedios, estimado de desperdicios, cálculo de ahorros y gráficas. La imagen de este programa se ve en la figura 3.11

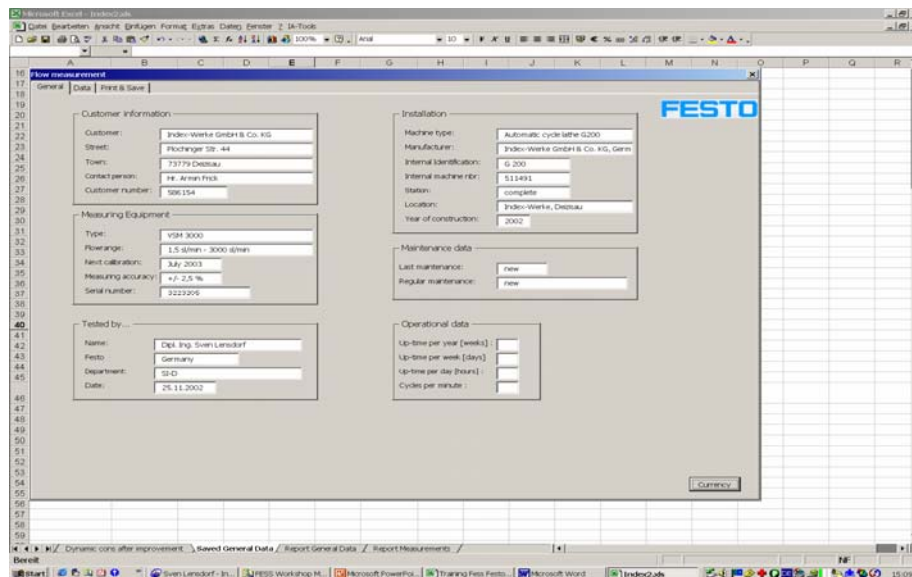


Figura 3.11 Programa para análisis de ahorros llamado FESS
Referencia. Cortesía Festo AG & Co KG

3.3.3 INVERSIÓN EN EQUIPO PARA MEDICIÓN

La inversión necesaria en herramientas, sensores y PC estimada para realizar este tipo de mediciones es de:

Elementos	Inversión (MXP)
3 Sensores con capacidad de enviar o almacenar datos	\$ 100,000.00
1 sensor ultrasonido	\$ 25,000.00
Herramientas	\$ 1,500.00
PC portátil	\$ 15,000.00
COSTO TOTAL	\$ 141,500.00

Tabla 3.12 Inversión en equipos para realizar mediciones y monitoreo móvil

Es importante que los equipos de medición sean móviles, esto le da la ventaja de poder medir diferentes puntos de la empresa.

Nota: tomar en cuenta que la mayoría de los sensores de este tipo son sensibles a la mala calidad del aire comprimido, por lo cual se sugiere tomar las medidas necesarias y evitar por medio de filtros la humedad y partículas.

Depreciación del equipo de medición y análisis

Ya que es un activo fijo y tiene una vida útil limitada ya sea por el desgaste resultante de su uso, el deterioro físico o la pérdida de utilidad respecto a nuevos equipos se va a calcular su depreciación para usos e inversión necesaria para hacer mejoras. Este valor se utiliza en el capítulo 3.5.5.

El tiempo de vida para estos equipos es de 3 años. Se piensa realizar con ellos un promedio de 30 mediciones por año y su recuperación al final de su vida útil será de \$ 10,000.00 MN. El método utilizado para este caso es el método unidades producidas.

$$\text{Depreciación/Unidad} = \left(\frac{\text{Costo} - \text{Recuperación}}{\text{Unidades.de.uso}} \right) \quad \text{Ec. 3.6}$$

$$\text{Depreciación/Unidad} = \left(\frac{\$141,500.0 - \$10,000}{90\text{mediciones}} \right) = \$1,462.00\text{MN}$$

En el capítulo 3.5.7 se va a utilizar el valor de la depreciación obtenido para calcular el estimado de la inversión para mejoras total.

3.3.4 CAPACITACIÓN PARA LA MEDICIÓN

Para este tipo de análisis en consumos de aire comprimido a pie de máquina es importante que la persona responsable tenga conocimientos en neumática, preparación de aire, software de medición, equipo de medición y del manejo de paqueterías de computación para el manejo de la información.

3.4 MEDIR A PIE DE MÁQUINA

3.4.1 PROGRAMAR MEDICIONES

Coordinar y programar la medición o mediciones en la máquina seleccionada con los departamentos involucrados como son: producción, mantenimiento y operación. Hacer mediciones en operación normal (dinámica) es necesario que exista producto en las máquinas para hacer este tipo de medición, si no se hiciera la medición real se tendría un dato erróneo. También se requieren tiempos de paro de maquinaria para hacer las mediciones en reposo (estática) y el montaje de sensores. El tiempo promedio para un análisis de una toma de aire comprimido se lleva a cabo en un tiempo promedio de 1.5* horas, incluyendo montaje de equipos de medición y pruebas de medición.

3.4.2 INSTALAR EQUIPO DE MEDICIÓN EN MÁQUINA

En muchas industrias se trabaja interrumidamente 24 horas por día durante meses sin detener la producción, por lo cual es necesario coordinar las actividades de medición con los paros programados. Para evitar que se interrumpa por mucho tiempo la producción se recomienda hacer en la bajada de aire un conexión llamada “bypass” ver figura 3.13, que es un arreglo de válvulas de globo manuales y derivaciones con el objetivo de disminuir el tiempo de paro en las máquinas y poder monitorear el consumo de forma periódica.

Es importante revisar que el sensor de flujo se instalo con la dirección de flujo correcta. La mayoría de veces los sensores tienen grabado el sentido de flujo.

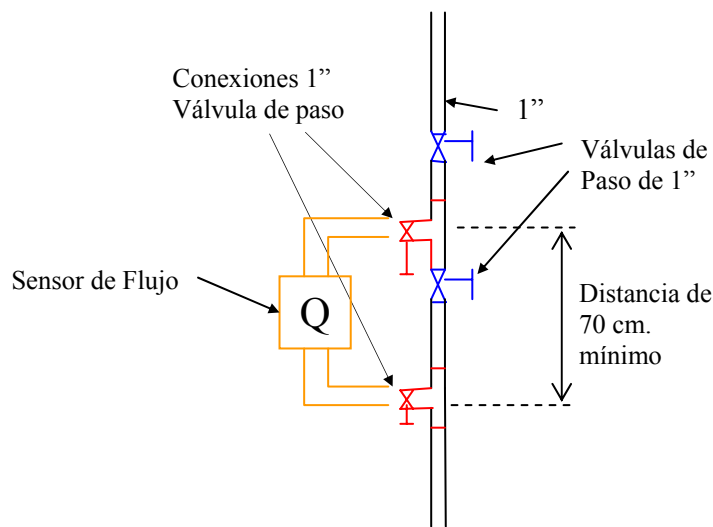


Figura 3.13 Arreglo de válvulas y derivaciones en alimentación de aire comprimido “bypass”

3.4.3 TOMAR MEDICIONES EN MÁQUINA

Es necesario realizar dos tipos de mediciones: dinámica y estática:

Medición Dinámica: es la medición de consumos de aire comprimido cuando el proceso o máquina seleccionada está produciendo de manera normal.

Medición Estática: es la medición de consumos de aire comprimido cuando el proceso o máquina seleccionada está en reposo, lo que significa que existe presión de aire comprimido en los equipos neumáticos pero no está produciendo. Todo el consumo obtenido en esta medición se considera un desperdicio.

Es importante asegurar que las mediciones sean las correctas, esto es, que si se está tomando la medición estática se asegure que la máquina esté en reposo, como de la misma manera se asegure que no se tengan paros de máquina en las mediciones dinámicas.

* Es un tiempo promedio estimado por medición

Medir más detalle las cantidades de desperdicios en puntos específicos. Se definen puntos de medición de algunos usos considerados críticos.

Por ejemplo.

Medir el consumo de forma puntual en aplicaciones como:

1. Boquillas o toberas para expulsar o secar por medio de aire comprimido.
2. Generadores de vacío por aire comprimido
3. Terminales de válvulas neumáticas
4. Actuador neumáticos.

3.4.4 DETECTAR MEJORAS EN MÁQUINA

Esta detección consiste en un levantamiento de todos los puntos de desperdicios encontrados durante la medición. Esta información es necesaria para conocer y evaluar la propuesta de mejora. Esto significa recabar información de todas las fugas.

Por ejemplo:

- a) Fuga en el “o-ring” del vástago del actuador para prensado de pieza. Diámetro de 40 mm y carrera 500 mm de la marca Festo.
- b) Fuga en empaque de montaje de válvula de actuador # 3 de la marca Festo y con la clave MFH 5 ¼. No de parte 6620.
- c) Mejorar la utilización de aire para expulsar pieza sin boquilla y a una presión de 0.6 MPa sin control.

El siguiente formato nos puede ayudar para hacer una notación de los puntos de mejora en máquina. Revisar en Anexo 1.

Desperdicios	Observaciones (Ejemplos)
Unidad de Mantenimiento	<u>Fuga en el manómetro y purga del vaso tamaño 1/2”</u>
Conexión de Alimentación	<u>Sin fuga</u>
Actuadores	<u>Fuga por vástago. Tipo DNC 40 100 Festo. Prengas</u>
Válvulas	<u>Fuga en empaque. Terminal de válvula Tipo CPV</u>
Reguladores de Presión	<u>Todos los reguladores OK</u>
Reguladores de Caudal	<u>Regulador de caudal en avance en actuador DSNU12</u>
Conexiones	<u>Tienen fugas. Programar Mantenimiento</u>
Manguera Flexible	<u>Está en general bien. Sustituir alimentación por 16 mm</u>
Mejoras	
Sistemas de boquillas	<u>Utilizar detección de piezas para hacer intermitente</u>
Sistemas de vacío	<u>Operando bien, Bajar presión a 5.5 Bar (0.55 Mpa)</u>
Presión	<u>Presión OK</u>
Ubicación de válvulas	<u>OK</u>
Dimensión de actuadores	<u>Sustituir DNC 40 por DNC 25</u>

Tabla 3.14 Tabla de levantamiento de equipo dañado

3.4.5 TOMAR DATOS DE TIEMPOS

Este tipo de información es útil para evaluar la cantidad de desperdicios por tiempo. Esto es evaluar desperdicios promedios por día, por semana, mensual y anual. Los operarios de las máquinas son las personas que más conocen estos tiempos. Los tiempos necesarios son: tiempo de paros promedio y los tiempos promedios de operación.

Para determinar la pérdida en estático es necesario sumar los paros de máquina y obtener un promedio por día y semana, como pueden ser:

Tipos de paro (con presión en los equipos):

1. Hora de comida
2. Cambio de turno
3. Turnos completos sin operar
4. Fines de semana sin operar
5. Falta de material
6. Falla mecánica

Tiempos de producción

1. Considerar un promedio de tiempos de operación.

3.5 ANALIZAR AHORROS Y TOMAR DECISIONES

Después de hacer las mediciones de consumo y levantamiento de mejoras en la máquina es necesario estimar traducir esa información hacia ahorros posibles, las inversiones necesarias y toma de decisiones. Por lo cual se prepara un reporte escrito. Los puntos de este reporte como sugerencia son:

3.5.1 INTRODUCCIÓN

Se explica el objetivo del análisis y estudio de aire comprimido en los procesos y se describe el nombre y funcionamiento de la máquina o máquinas donde se realizaron las mediciones.

3.5.2 UBICAR MÁQUINAS ANALIZADAS EN UN CROQUIS

En esta parte se hace un croquis con la ubicación de la máquina analizada. En muchas plantas la cantidad de máquinas y tamaño del proceso dificultaría mucho la ubicación

rápida de la máquina analizada. Se utiliza los nombres o números asignados a la máquina evaluada para su identificación.

3.5.3 PROMEDIAR MEDICIONES Y CALCULAR EFICIENCIA

En este paso se calcula el promedio de las mediciones de consumo en ambas mediciones como se observa en la ecuación 3.7. Es importante utilizar el dato promedio y no los picos de consumo. La ecuación 3.8 evalúa la diferencia que existe entre el dato promedio estático y el dinámico.

$$Caudal .promedio = \left(\frac{\sum \text{Datos de medición}}{\text{Cantidad de datos medición}} \right) \quad \text{Ec. 3.7}$$

En el caso del equipo de monitoreo utilizado por Festo captura 20 datos de caudal y presión por cada segundo medido. El programa de análisis llamado con anterioridad FESS arroja de forma automática el dato promedio para ambas mediciones.

Ejemplo:

Máquina	Tipo de medición	Caudal promedio (l/min)	Presión promedio (bar)	Eficiencia %
1	Estática	469	6.5	36
	Dinámica	735	6.2	

Tabla 3.15 Consumos dinámicos, estáticos y eficiencia

Eficiencia

Antes de comenzar una consideración importante que debemos tener en cuenta es que todos los consumos que se tienen o se midan en estática o reposo se consideran desperdicios.

Se le llama eficiencia, porque se mide la cantidad de fugas o desperdicios que existen en la máquina del consumo total. Al eliminar fugas, el dato de medición estática debe de llegar cerca de cero y podemos lograr una eficiencia cercana al 100 %. Una eficiencia teórica sería 100 % pero en la realidad una eficiencia buena es del 95 al 98 %. Ecuación 3.8

Para que un proceso sea eficiente en el uso del aire comprimido; la medición estática debe estar lo más cercana al 0 l/min.

El dato de la eficiencia de entrada nos puede dar un panorama importante de la situación de desperdicios que tiene la máquina.

$$Eficiencia = \left(\frac{Medición .Dinámica - Medición .Estática}{Medición .Dinámica} \right) \cdot 100\% \quad Ec. 3.8$$

$$Eficiencia = \left(1 - \frac{Medición .Estática}{Medición .Dinámica} \right) \cdot 100\% \quad Ec. 3.9$$

$$\frac{Medición .Estática}{Medición .Dinámica} = \alpha b \quad Ec. 3.9a$$

Donde:
 α = pendiente
b = constante

La ecuación 3.9a se puede relacionar la ecuación de la línea recta, en este caso la pendiente es α . Entonces si α tiende a cero la eficiencia se incrementará al momento de sustituirla en la ecuación 3.9, esto significa que las fugas son mínimas. Por el contrario si α tiende a 1 la eficiencia será muy mala, esto significa una gran cantidad de fugas en estático.

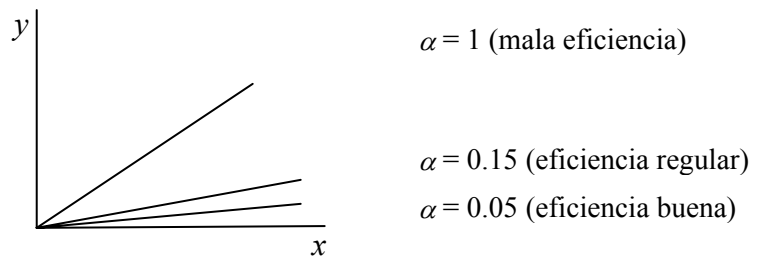


Figura 3.15a Análisis de la eficiencia del uso del aire comprimido

Ejemplo 1

Medición estática: 129 l/min

Medición dinámica: 214 l/min

$$Eficiencia = \left(1 - \frac{129 \text{ l/min}}{214 \text{ l/min}} \right) \cdot 100\% = 39.7\% \text{ (Eficiencia mala)}$$

Esto nos dice que del 100 % del consumo del aire comprimido el 60.3 % podría ahorrarse. Más de la mitad del aire comprimido, para ser exactos el 60.3 % se está desperdiciando en fugas o mal usos del aire.

Ejemplo 2

Medición Estática: 12 l/min

Medición Dinámica: 256 l/min

$$Eficiencia = \left(1 - \frac{12 \text{ l/min}}{256 \text{ l/min}}\right) \cdot 100\% = 95.3\%$$

Esto significa que del 100 % del consumo del aire comprimido solo el 4.7 % lo estoy desperdiciando. Significa que tiene muy pocas fugas. Esta eficiencia se puede considerar muy buena.

Existen casos pero son muy pocos por ejemplo, no se puede considerar desperdicios cuando existen paros propios de proceso y se regula temperatura de una resistencia eléctrica por medio de aire comprimido.

3.5.4 CALCULAR CANTIDAD DE DESPERDICIOS

En esta paso se calculan la cantidad de desperdicios que tiene la máquina analizada por un tiempo específico. El desperdicio total en aire comprimido será la suma del desperdicio estático más el desperdicio dinámico.

Es necesario tener los tiempos de operación y de paro promedios por semana y día de la máquina analizadas.

Datos de tiempos considerados:

1. Tiempos de operación de 24 horas al día y 365 días al año de este proceso.
2. Paros no programados con presión: 2 horas al día
3. Tiempo de producción en promedio por día: 22 horas

El dato obtenido en estático se considera desperdicio al 100 %, por lo cual solo se calcula la cantidad de desperdicio por día, semana y año.

Después viene el cálculo de los desperdicios cuando la máquina esta produciendo. Es muy importante saber donde y el tiempo que se presenta el desperdicio cuando esta operando la máquina en cada elemento. Es necesaria la medición de consumos específicos en la máquina analizada como se menciona en el capítulo 3.4.3.

Por ejemplo:

- a) Una fuga en una conexión de un actuador o una válvula en operación solo se presentará esta fuga cuando se presuriza ese puerto de la válvula o actuador.
- b) Una fuga en un empaque del embolo de un actuador o una válvula se mantendrá de forma constante debido a que siempre va existir presión en alguna de las dos cámaras del actuador o válvula.

c) Una fuga en el vaso de un filtro o en una conexión de la alimentación de aire a la máquina siempre estará constante ya que el filtro o la conexión siempre se mantiene presurizado.

d) Optimización de tobera, el objetivo será plantear un porcentaje de ahorro de su consumo actual. El desperdicio en este caso será el aire comprimido que no se utiliza (distancia entre cada lata o producto) y se logre eliminar sin afectar el proceso. Podemos hablar de ahorros en este tipo de aplicaciones de hasta $\frac{3}{4}$ del consumo continuo.

Ejemplo. Cuando los envases llenos de leche (Tetrapack*) salen de la máquina llenadora y van por la banda transportadora, llevan gotas de agua por afuera de su envase, es necesario quitarle esa humedad para colocar el código de lote o caducidad, normalmente se utilizan chorros de aire constantes para este fin. La distancia de separación entre cada lata y el tiempo de avance nos permite ahorrar consumos de aire si se aplicará aire comprimido solo en el punto que se requiere y a una menor cantidad.

En este caso se utiliza un sensor para detectar el empaque y una electroválvula para controlar los chorros y lograr un uso intermitente del aire comprimido. Además se colocan boquillas con reguladores de presión y caudal para disminuir los consumos de aire en cada aplicación.

e) Un actuador sobre dimensionado en diámetro de embolo y/o carrera de desplazamiento desperdicia cantidades de aire comprimido de forma constante en su operación. Para evaluar los desperdicios se mide el consumo de este actuador o actuadores de forma puntual. Después se determina las características del actuador o actuadores con el tamaño menor óptimo y se comparan los consumos. De esta manera se determina la cantidad de aire comprimido que se desperdicia en la aplicación y el ahorro que se puede lograr.

Para el cálculo del desperdicio en operación se deben sumar todos los desperdicios encontrados durante los tiempos de operación y sumarlos con los desperdicios en reposo y así determinar los desperdicios totales (ecuación 3.10) de esa máquina.

$$DesperdicioTotal = Desperdicio_estática + Desperdicio_dinámica \quad Ec. 3.10$$

Ejemplo

Se detectó la posibilidad de disminuir consumos de aire en “jet” o toberas en operación y eliminar fugas en un filtro y una válvula de arranque progresivo (ambas fugas permanecen constantes). El objetivo del ahorro en las toberas es una optimización del 25 % del consumo actual en operación. La tabla 3.16 relaciona los consumos o desperdicios en cada una de las áreas de oportunidad detectadas en operación

* Tetrapack, empresa dedicada al empaque líquidos alimenticios

* Jet. Palabra en ingles utilizada para definir tobera o boquillas de aire comprimido a presión.

Área de Oportunidad	Caudal Promedio (l/min)	Presión Promedio (Bar)
Fugas en equipo neumático	107	6.5
2 toberas en vibradores	227	6.2
2 toberas en alimentadores	135	6.2

Tabla 3.16 Consumos específicos en la máquina analizada

En la tabla 3.17 del ejemplo, se describen y calculan los desperdicios actuales por día y anual, además de conocer el porcentaje de ahorro que representa cada área de oportunidad.

Área de Oportunidad	Tiempo de desperdicio (h / día)	Desperdicio por hora promedio (m³/hora)	Desperdicio por día promedio (m³/día)	Desperdicio por año promedio (m³/año)	Desperdicio %
Paros de Producción	2 h/día ESTATICA	27.4	54.8	20,017	21
Fugas constantes durante producción	22 h/día DINAMICA	6.4	141.2	51,553	52
Optimización de consumo en toberas	22 h/día DINAMICA	3.3	72.6	26,499	27
Estimación Total de Desperdicios		37.1	268.6	98,069	100 %

Tabla 3.17 Análisis de desperdicios

Después de obtener el volumen de desperdicios total de aire comprimido en el punto analizado, es posible evaluar el costo de este desperdicio utilizando el costo promedio del aire comprimido en un metro cúbico de aire a 0.6 (MPa)

3.5.5 ESTIMAR EL COSTO DEL AIRE DESPERDICIADO

Después de obtener el total de desperdicios de aire comprimido en volumen (m³) y obtener el costo por m³ en la planta se puede calcular el costo del desperdicio por la ecuación 3.11 y analizar los posibles ahorros.

$$\text{Costo del Desperdicio} = (\$ / \text{m}^3) (\text{Desperdicio Total (m}^3)) \quad \text{Ec. 3.11}$$

Ejemplo

El costo promedio que se utiliza para este ejemplo es el calculado en la sección 3.1. El costo es de \$ 0.15 por 1 m³ a 6 Bar (0.6 MPa). El costo del desperdicio se obtiene en la ecuación 3.8.

En la tabla 3.18 se muestra el costo del desperdicio anual en aire comprimido en la máquina 1 y también representa el monto aproximado de ahorro siempre y cuando se hagan las actividades de mejora.

Nombre	Costo aire comprimido (\$ / m ³)	Desperdicio anual promedio (m ³ /año)	Desperdicio anual estimado (\$ / año)
Máquina 1	\$ 0.15	98,069	\$ 14,710.35

Tabla 3.18 Costo del desperdicio anual

Con el dato del costo del desperdicio y la inversión requerida para realizar las mejoras se determina la viabilidad del proyecto.

3.5.6 DESCRIBIR MEJORA

Describir los recursos necesarios para eliminar los desperdicios de aire comprimido en la máquina y optimizar los usos. La propuesta incluye: mano de obra, equipos necesarios para mejoras, equipos necesarios para mantenimiento, tiempos necesarios para la implementación.

Ejemplo

Equipo para eliminar las fugas encontradas y optimizar las toberas. Se tiene planeado utilizar el PLC de la máquina.

- 2 piezas de electroválvula 3/2 con conexiones a 6 mm y voltaje a 110 volts
- 10 metros de manguera flexible de 6 mm
- 5 conexiones milimétricas de tipo conector rápido de 6 mm y rosca 1/4"

1 regulador de presión de ¼” con conexiones a 6 mm
1 kit de reparación para actuador marca Festo tipo DNC 40 150 PPV A

Disponer de la máquina por 8 horas continuas para instalar equipo y hacer pruebas.

Disponer de 1 técnico y 1 programador para hacer las modificaciones e instalar el equipo neumático.

3.5.7 INVERSIÓN ESTIMADA

Se estima el costo de los equipos neumáticos, de la mano de obra necesaria y de la depreciación por medición de los equipos de medición para implementar y disminuir consumos de aire comprimido.

Ejemplo

Inversión estimada tanto en equipo como en mano de obra y la depreciación del equipo de medición.

Descripción	Monto
Equipo neumático	\$ 5,500.00 MXP
Mano de obra	\$ 1,450.00 MXP
Depreciación equipo de medición	\$ 1,462.00 MXP (Capitulo 3.3.4)
Total de Inversión	\$ 8,412.00 MXP

Tabla 3.19 Inversión estimada en equipo de medición

3.5.8 RETORNO DE LA INVERSIÓN

Como las inversiones por máquina son de medianas-altas, es necesario evaluar y presentar un análisis de retorno de inversión a las personas que toman decisiones de invertir, ver ecuación 3.12.

Nota: Para este tipo de proyectos cuando se logran tiempos de amortización o retorno de inversión menor o igual a 1 año se considerarán muy viables de realizar. Obteniendo retornos de inversión arriba de 1 año se volverá un proyecto no muy atractivo. Lo mejor será buscar áreas con mejor oportunidad de ahorro.

$$R = \left(\frac{\text{Monto Aire Ahorrado} / \text{año}}{\text{Meses de Operación} / \text{año}} \right)$$

Ec. 3.12

$$\text{Retorno Inversión} = \frac{\text{Inversión Total}^1}{R}$$

Donde:

R = monto de aire ahorrado por mes

Ejemplo:

$$R = \left(\frac{\$14,710 / \text{año}}{12 \text{ meses} / \text{año}} \right) = \$1,225.8 / \text{mes}$$

$$\text{Retorno Inversión} = \frac{\$8,412.00}{\$1,225.8 / \text{mes}} = 6.8 \text{ meses}$$

Monto del aire ahorrado	= \$ 14,710.00 MXP
Inversión	= \$ 8,412.00 MXP
Ahorro primer año	= \$ 6,298.00 MXP
Retorno de Inversión	= 6.8 meses

3.5.9 GRÁFICAS DE CONSUMO PRESIÓN

Se presentan gráficas de consumo-presión de cada una de las mediciones, tanto estáticas como dinámicas. La información que nos arroja este tipo de gráficas sirve para evaluar caídas de presión, los consumos pico de la máquina, los tiempos de consumo y desperdicios de aire comprimido en reposo.

FESTO

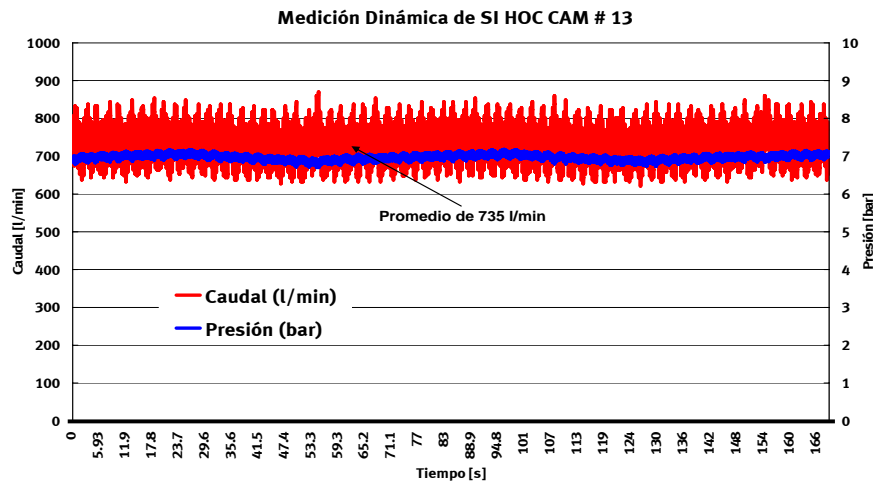


Figura 3.20 Gráfica de caudal - presión
Referencia. Información Interna de Festo México

1. La ec. 3.12 corresponde al retorno de inversión ideal. En condiciones reales el tiempo de retorno de inversión se incrementa por no llegar a las eficiencias esperadas (100%). Debemos aplicar un factor de corrección de 0.8 a 0.9 en la ec. 3.12

Ejemplo en la figura 3.20 se puede observar que la caída de presión no es considerable, esto significa que la presión se mantiene estable durante operación.

Este tipo de gráfica se obtuvo con el programa FESS de manera automática.

3.5.10 TOMA DE DECISIONES

Después de tener los datos del reporte viene la parte importante de toma de decisiones. La aprobación de los recursos deriva de la cantidad de desperdicios encontrados y la inversión requerida. El área de recursos financieros da una prioridad importante para la realización de estos proyectos cuando se presentan retornos de la inversión menores a 1 año.

Las decisiones muchas veces se ven detenidas o retrasadas por la falta de recursos, pero a futuro se puede considerar un presupuesto adicional para tales acciones de ahorro.

3.6 IMPLEMENTAR MEJORAS

Los análisis de desperdicios quedan de la siguiente manera, en la medición estática el objetivo es lograr el 95 % de ahorros y en el dinámico el objetivo atacar un rango está entre el 10 % hasta el 40 % del consumo que tiene la máquina en dinámica.

Programar la disposición de las máquinas para realizar las actividades de mejora como: la sustitución de equipos dañados, mantenimiento a equipo dañado, adecuaciones mecánicas o montajes y pruebas de arranque. Frecuentemente se realizan en fines de semana o en paros totales de planta por lo tanto es necesario prevenir todo lo necesario para que se instale en el tiempo programado.

3.6.1 SELECCIONAR MANO DE OBRA CALIFICADA PARA MANTENIMIENTO

Para este tipo de actividades es necesario que los técnicos de mantenimiento tengan conocimientos en el área de neumática y mantenimiento principalmente. Para las propuestas de implementación de electroválvulas para cortes de aire automático es necesario tener conocimiento en materia de electricidad y control de PLC.

Perfil con conocimientos principales en

- Neumática
- Electroneumática
- Programación
- Electricidad

- Control y programación de PLC
- Mecánica y mantenimiento
- Sensores
- Diseño mecánico para alguna adaptación

3.6.2 ADQUIRIR EL EQUIPO NEUMÁTICO PARA LAS MEJORAS

Es muy variado el tipo y cantidad de equipo neumático necesario para eliminar desperdicios. El listado del equipo necesario para eliminar fugas en la máquina analizada se realiza en el momento que se hizo las mediciones. En el reporte escrito se describe el equipo necesario para el ahorro de energía. Los principales equipos utilizados son:

1. Actuadores
2. Conexiones
3. Válvulas
4. Mangueras
5. Unidades de mantenimiento
6. Reguladores de presión
7. Reguladores de caudal
8. Distribuidores de presión

3.6.3 ELIMINAR FUGAS Y OPTIMIZAR CONSUMOS

En esta acción se programa un mantenimiento correctivo para hacer una detección de fugas inicialmente y después una programación de actividades relacionadas a sustituir y/o eliminar equipo y/o refacciones dañados. En muchos casos los departamentos de mantenimiento se enfrentan con la noticia que el equipo neumático montado en la máquina no tiene representación local o ya no existe en el mercado nacional.

Actualmente existen cantidad de proveedores de servicios y equipos relacionados a la neumática.

3.6.3.1 Control de los sistemas de sopleteo y/ó vacío por venturi

Tanto el sopleteo con aire y la utilización de vacío por venturi, tienen un consumo constante de aire para realizar su función, por lo cual es importante cuidar los aspectos de tiempos de activación, diámetros de boquillas y presión de uso para obtener un consumo eficiente. Se tienen dos posibilidades de ahorro; la primera por desperdicios a máquina en reposo o por algún tipo de paro y la segunda por una utilización sin control en la operación.

3.6.3.2 Desperdicios a máquina en reposo

En el momento que la producción para, debe hacerse el corte al consumo de aire al instante y restaurarse nuevamente con la señal de arranque. Esto implica instalar un arreglo de válvula neumática, relevadores y control válvula-signal de paro.

Un sistema electro-neumático que está en sincronía con el interruptor principal de la máquina o aplicación. El sistema electro-neumático consta de una válvula neumática que controla la alimentación de aire y de un arreglo eléctrico - neumático que detecte el paro de producción y se haga la acción de corte del suministro de aire, como se muestra en la figura 3.21

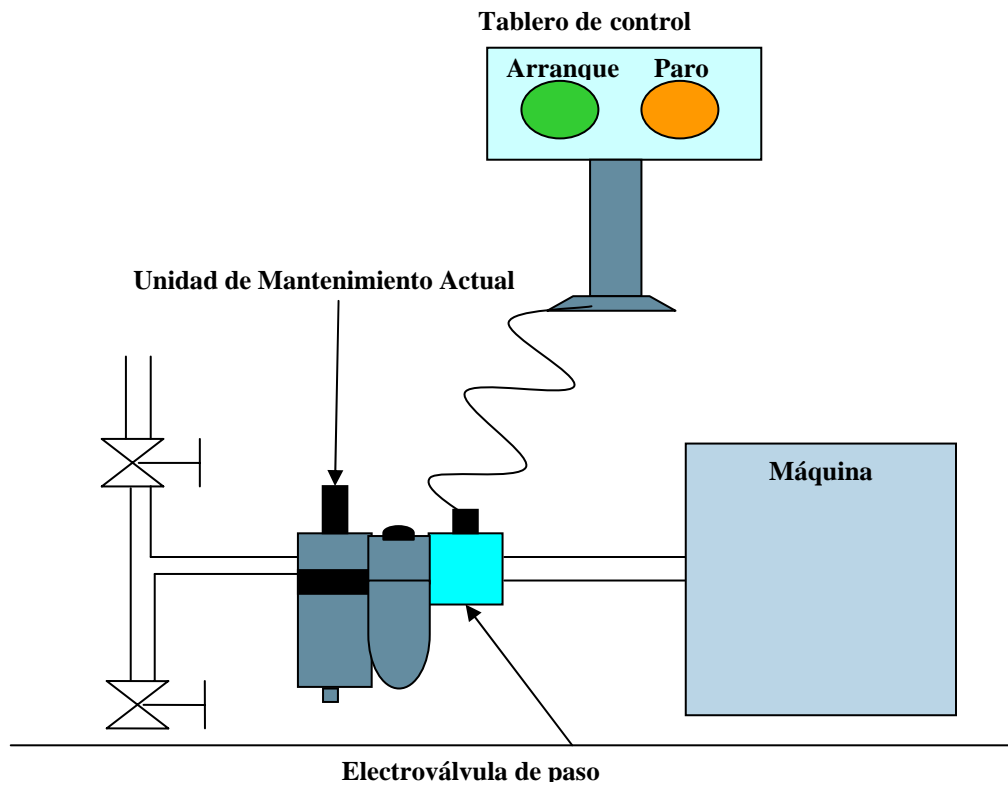


Figura 3.21 Corte eléctrico de la alimentación de aire en paros de máquinas

3.6.3.3 Desperdicios de aire comprimido en sistemas neumáticos en operación

Durante el tiempo de uso en las aplicaciones como: limpieza, secado, desplazamiento por aire, etc. es necesario cuidar los siguientes detalles: cantidad de aire necesario, presión necesaria para aplicación, control del tiempo de aplicación (sensores, temporizadores) con la finalidad de hacer el consumo de manera racional y eficiente.

3.6.3.4 Propuesta de optimizar toberas de aire

Ejemplo, una aplicación de limpieza donde existe un tiempo de desperdicio de aire entre una y otra pieza, la solución para ahorro es expulsar aire solo cuando esté presente la pieza. Esto se va a realizar con un sensor capacitivo o inductivo dependiendo de la pieza a detectar, un PLC para el control de las señales y posibles tiempos para ajustes y una electroválvula para el control del aire, reguladores de presión, boquillas, etc.

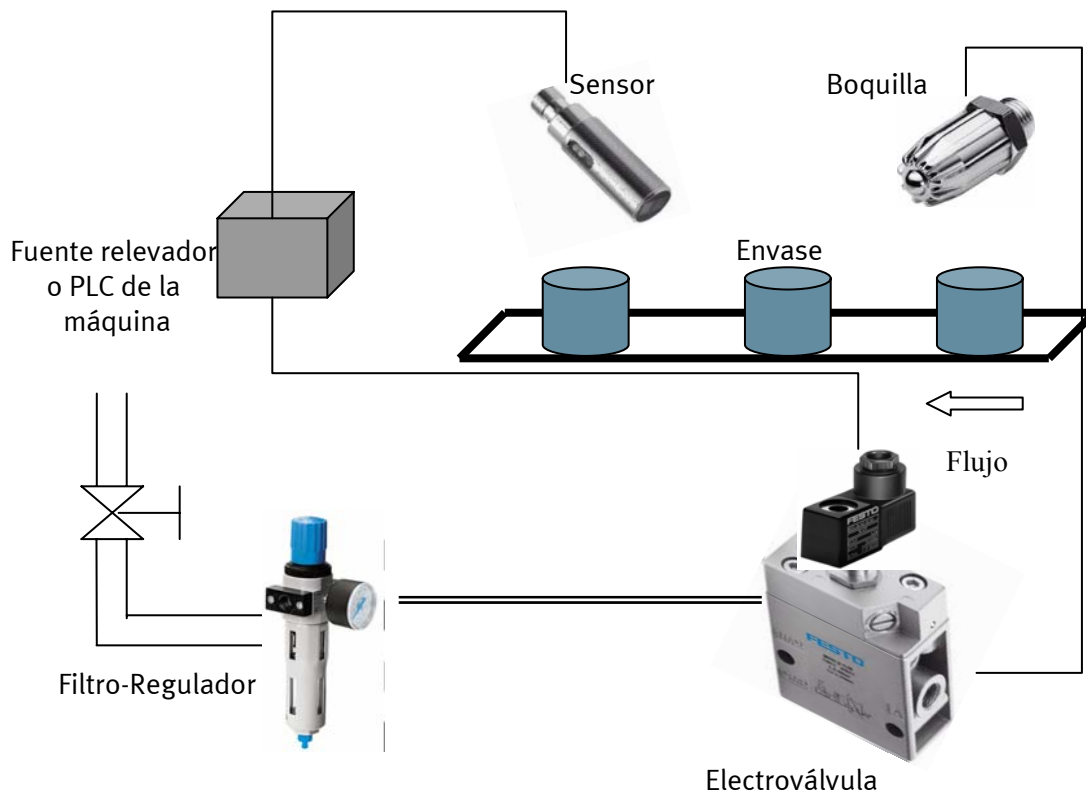


Figura 3.22 Sistemas intermitentes de uso de toberas por medio de detección de pieza

3.6.3.5 Tecnología obsoleta

Determinar la mejor tecnología en base a las características y necesidades de la aplicación utilizando las tecnologías actuales. Esto va a depender del tipo de aplicación. En el caso de la neumática convencional se puede utilizar las tecnologías como:

- Las válvulas que pueden alimentarse con presiones diferentes, ver figura 23
- Pistolas con regulación de caudales
- Válvulas inteligentes para control de vacío
- Sensores de flujo con señales analógicas.
- Electroválvulas con potencia muy pequeñas en sus bobinas eléctricas



Pistola para limpieza
con regulación de
caudal



Control de
vacío
automático



Manejo de 2
presiones

Figura 3.23 Tecnología para optimizar el uso del aire
Referencia. Cortesía Festo México

3.6.3.6 Exceso en dimensiones de actuadores

A menudo sucedía en el pasado cuando se seleccionaban los equipos para las máquinas se definían dimensiones mayores por seguridad. Ahora se cuenta con mayor cantidad de herramientas para diseño y selección de productos como: software de diseño, manuales de productos, cursos de capacitación en tecnologías de reparaciones, mayor calidad y diversidad de productos, como también de sus servicios postventa.

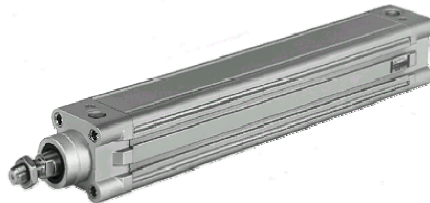


Figura 3.24 Actuador con carrera de 400 mm y diámetro de 63 mm en émbolo
Referencia. Cortesía Festo México

3.6.3.7 Regulación de Presión

Es necesaria una regulación de presión en el aire comprimido hasta llegar al punto óptimo, que compense las variaciones del consumo y de la producción. Una regulación insuficiente, además de exigir un mayor consumo de energía, puede ocasionar desgastes anormales de herramientas y componentes. Por cada 1 Bar que se pueda reducir la presión sin afectar el proceso se reduce el consumo de aire en un 12-14 %.

Si la presión de trabajo del sistema baja de 6 a 5 Bar (0.6 - 0.5 MPa) la potencia de la herramienta se reduce en un 25 %. Ver figura 3.25



Figura 3.25 Unidades de mantenimiento para regular la presión y filtrar
Referencia. Cortesía Festo México

3.6.3.8 Lubricación

La mayoría de los actuadores neumáticos a altas frecuencias (mayor a 30 golpes por minuto) requieren lubricación para evitar desgaste anormal. Si el aceite lubricante se aplica al equipo a través del aire comprimido, disminuye el rozamiento de las piezas de sellado en las camisas de los actuadores o válvulas y además, el aceite previene daños por corrosión en el equipo neumático. Todos los lubricadores tienen un regulador para optimizar la cantidad de aceite que se requiere en la aplicación, ver figura 3.26. Este punto de lubricación se maneja como preventivo para incrementar los tiempos de vida útil de los elementos neumáticos y así disminuir los gastos de refaccionamiento.



Figura 3.26 Lubricador de aceite para equipos neumáticos
Referencia. Cortesía Festo México

3.6.3.9 Generadores de vacío por venturi

Los sistemas de sopleteo y de generación de vacío por venturi son altos consumidores. El área de desperdicio es cuando se mantienen activados a presiones altas y durante tiempos que no son necesarios, como paros de maquinaria, etc. La información necesaria para considerar la optimización de estos sistemas son: la velocidad de los ciclos de operación y tipo de usos. Pero lo más utilizado para hacer la optimización es operar el vacío solo en los momentos necesarios, utilizar la presión optima de vacío, utilizar válvulas check en cada ventosa para evitar que halla caídas falta de toma de material, utilizar dimensiones de generadores de vacío de acuerdo al consumo y presión de vacío necesaria. Una mal idea que se tiene en la industria para incrementar el nivel de vacío es incrementando la presión, el desperdicio es cuando se rebasa el punto máximo de presión, el nivel de vacío cae y el consumo de aire se incrementa, teniendo una eficiencia baja del uso del aire.

3.6.4 PUESTA EN MARCHA DE MEJORAS

Para revisar que todo trabaje de forma adecuada, se hacen pruebas con las mejoras instaladas en la máquina y el día del arranque del proceso se mantiene una inspección constante durante las primeras horas de operación.

3.6.5 MEDICIÓN FINAL

Para corroborar que se halla llegado al objetivo de ahorro se mide nuevamente el consumo tanto dinámico como estático. De esta manera se tendrá la información para comparar con las mediciones antes y después de mejoras

3.6.6 VERIFICAR AHORROS

Después de la medición final y con los datos de la medición inicial se puede verificar los montos de ahorros reales en consumo debido a las acciones tomadas.

En esta actividad se utiliza el dato del costo de un metro cúbico de aire y se cuantifica el ahorro real de aire comprimido en la máquina optimizada.

3.7 PREVENIR DESPERDICIOS

3.7.1 CAPACITACIÓN EN EL ÁREA DE MANTENIMIENTO

Después de que se implementó en un grupo de máquinas o en su totalidad de la planta, es necesario mantener un estricto control de fugas y capacitación a los operarios. Esto con el fin de no volver a tener desperdicios altos de aire comprimido.

Una de las partes difíciles en la optimización del consumo de aire comprimido es convencer al usuario u operario en las tecnologías como:

1. Mantenimiento TPM
2. Electromecánica
3. Neumática
4. Diseño de circuitos neumáticos
5. Mantenimiento a equipo neumático
6. Medición de consumos

3.7.2 DIAGNÓSTICO

El futuro del mantenimiento se está centrando en el diagnóstico de los procesos. El objetivo es detectar y hacer un análisis preventivo por medio de información como flujo, presión, programas de visualización, análisis de tiempo de vida de los equipos, equipos con diagnóstico independiente, etc. Ver figura 3.26 con metodología para diagnóstico.

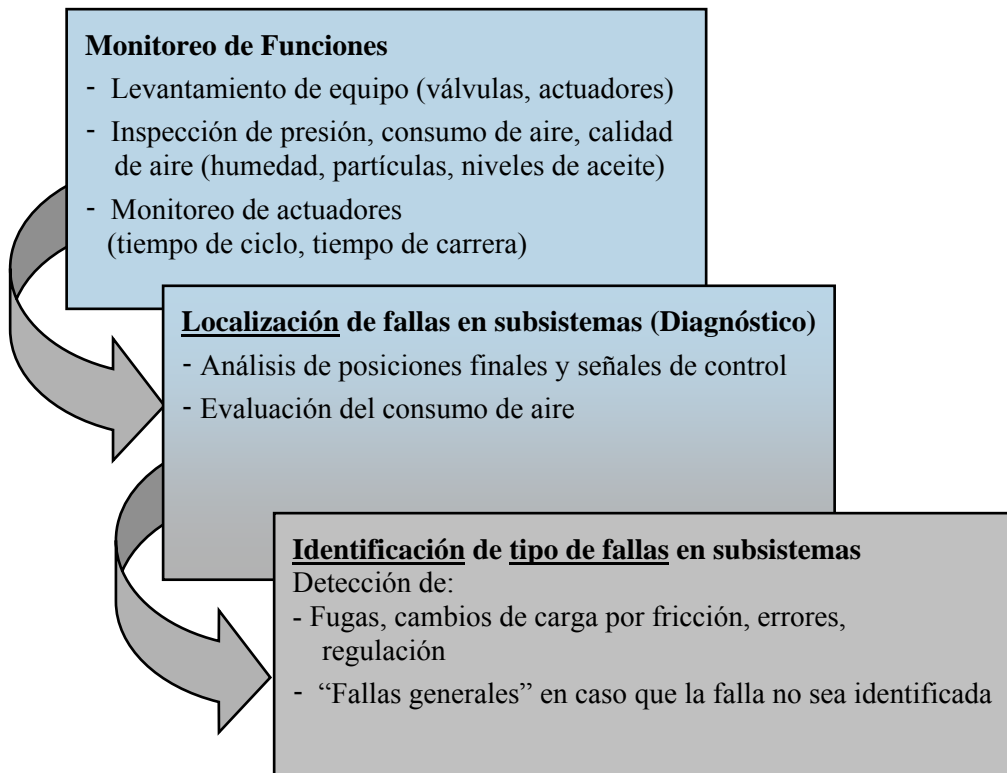


Figura 3.27 Metodología del diagnóstico
Referencia. Cortesía Festo AG & Co. KG

Un ejemplo de este tipo de monitoreo lo tenemos en la figura 3.27, donde se describe la implementación de sensores de caudal, presión y posición en los elementos neumáticos y la tecnología de diagnóstico como las terminales de válvulas Festo llamadas CPX y el sistema de base de datos con el programa de visualización de Siemens “WinCC” o de Festo llamando “VipWin”.

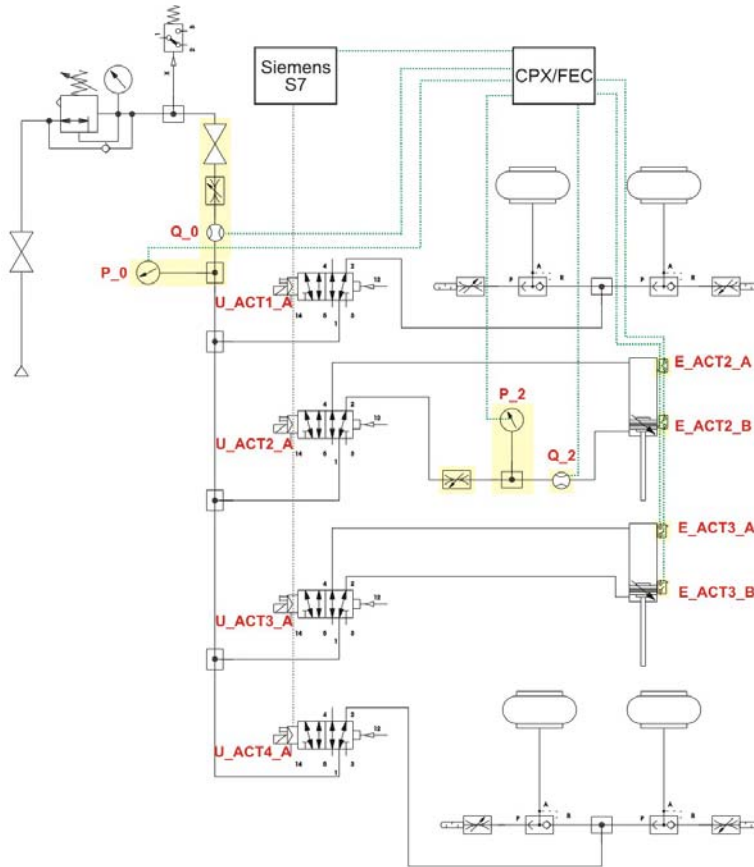


Figura 3.28 Proyecto de Diagnóstico
Referencia. Cortesía Festo AG & Co KG

3.7.3 CALIDAD DEL AIRE COMPRIMIDO

El aire comprimido contiene siempre una cierta cantidad de agua que a menudo se precipita en el sistema de tuberías en formas de condensado. Este condensado puede ocasionar daños debido a la corrosión de componentes conectados al sistema. El aire comprimido también lleva impurezas de las paredes de las tuberías, partículas de desgaste, e incluso de aceite en el caso de que el aire se comprima en compresores por aceite.

Para evitar daños, taponamientos y desgaste del equipo neumático, se debe instalar un filtro de aire que separe los condensados y las partículas del aire comprimido. Para conseguir aire completamente exento de aceite, o en grandes cantidades, hay que usar compresores no lubricados.

El aire comprimido debe preocuparse que no contenga:

1. Polvo y gases aspirados con el aire
2. Partículas del compresor o de tuberías de distribución

3. Aceite de lubricación del compresor
4. Vapor de agua y agua condensada
5. Bacterias y virus

En la industria farmacéutica, de alimentación y de bebidas, así como en los hospitales, normalmente es necesario que el aire sea estéril.

Compresores

La selección del tipo de compresor, aunque limitada en parte por la capacidad. Para ello es mejor solicitar al fabricante toda la información relativa a eficiencias, rendimientos, mantenimientos, etc. Los compresores multietapa ofrecen ventajas sobre los de una etapa. Al trabajar con temperaturas bajas se reduce condensado en depósitos y mantenimiento a válvulas.

Aspiración del aire

Para un mejor rendimiento del compresor, el aire aspirado debe ser limpio y frío. Por ejemplo por cada 4 °C de aumento de temperatura en el aire aspirado, aumenta el consumo de energía un 1 % para el mismo caudal. Cada 3 °C de disminución en la temperatura del aire aspirado, da lugar a un 1% más de aire comprimido, para el mismo consumo de energía.

El aire debe aspirarse preferentemente del exterior. La tubería de aspiración debe ser tan recta y corta como sea posible, evitando las longitudes largas.

Las acciones de mejora serán la actividad fundamental para eliminar el desperdicio de aire en los sistemas neumáticos y lograr el Ahorro.

Influencia de la altitud sobre el nivel del mar

La presión y temperaturas ambientales disminuyen con la altitud, estos cambios afectan a la relación de compresión de los compresores y herramientas, y por lo tanto, a su caudal y potencia. Si un compresor se instala a diferentes altitudes, el volumen que descarga será siempre el mismo, pero el peso del aire comprimido de su capacidad en cada enclavamiento, será diferente, siendo tanto menor cuanto más alto sea el lugar, ya que el peso específico del aire comprimido es relativo dependiendo de la altitud.

CAPÍTULO 4

CASO DE ESTUDIO

Antecedentes

Este cliente llamado a continuación FM produce bujías para automóviles. En el área de ensamble se cuenta con 6 células de producción con 5 máquinas cada célula. La maquinaria tiene trabajando alrededor de 15 años. La mayoría de movimientos en el ensamble y usos para desplazamiento del producto, lo hacen por medio de aire comprimido. Como el producto de ensamble es pequeño cualquier desajuste o atoramiento de producto hace que la máquina pare y deje reproducir y esto significa menor cantidad de producto al final del turno y una gran cantidad de paros.

El área de oportunidad inicial en ahorro de aire fue que existían una gran cantidad de fugas en los elementos neumáticos, los generadores de vacío seguían consumiendo aire cuando el proceso se detenía, las toberas en los alimentadores de piezas se mantenían consumiendo de forma continua cuando el proceso se detenía y una mal preparación de aire afectaba la vida útil de los equipos neumáticos.

Además por los desperdicios en las máquinas, se provocaba una caída de presión general del área y algunos equipos paraban de forma automática y esto representa un problema para la empresa, por mala calidad del producto o poca productividad.

Objetivo

El objetivo de este proyecto fue eliminar los desperdicios de aire comprimido en los equipos neumáticos del área de ensamble y justificar la inversión realizada con los ahorros obtenidos por la disminución de consumos y beneficios de calidad de producto. En el cuarto de compresores el objetivo fue de poder apagar un compresor de 300 HP y mantener una presión más constante y efectiva en el área de ensamble en la realización de mejoras de las 30 máquinas del área de ensamble

Desarrollo

Este proyecto se comenzó con la medición de una máquina en 2004. Después se preparó un reporte y se entregó al gerente del área de ensamble para su análisis.

Posteriormente se realizó una junta entre representantes de FM y Festo donde se discutieron puntos sobre costos, tiempo de realización, beneficios y el logro de resultados, que es lo que los clientes están buscando.

Todavía en ese momento no estaba seguro el cliente de que se lograrán tales ahorros, por lo cual Festo tomo el riesgo de ofrecer hacer las mejoras en una máquina piloto y posteriormente presentar los resultados finales.

Después de hacer mejoras y mediciones finales se preparó un reporte donde se describía los ahorros reales en aire comprimido en esa máquina.

Además el cliente observó los cambios que se le había hecho en la máquina y realmente fueron notables y tangibles las mejoras.

Posteriormente el cliente solicito al área de finanzas la aprobación de los recursos financieros para hacer las mejoras en las 6 células de producción con la justificación de que en menos de un año se recuperaría la inversión por los ahorros en aire comprimido.

Se programaron las actividades de mejora y medición para hacer una máquina por fin de semana aproximadamente y este proyecto llevo casi un año para su terminación.

Actualmente se tiene un contrato de mantenimiento por parte de la empresa FM con Festo para su inspección y optimización de los sistemas neumáticos en las máquinas de ensamble.

4.1 REPORTE FINAL

El presente reporte describe las mediciones iniciales de un grupo de 5 máquinas similares llamadas a continuación PT, las actividades de mejora que se realizaron y posteriormente las mediciones finales en las mismas máquinas. Al finalizar se describe los ahorros en aire comprimido de cada una de ellas y el análisis costo-beneficio en relación con la inversión que se hizo. Para fines de agilizar los estudios y propuestas se utilizó para este proyecto como costo promedio de un metro cúbico de aire comprimido de \$ 0.21 MN. Este dato se cálculo en el 2003. El total del proyecto fue de 30 máquinas pero en este reporte solo se presentan resultados de 5 máquinas PT.

4.1.1 INTRODUCCIÓN

Cliente: FM

Por medio del diagnostico de aire comprimido y las acciones de mejora en el área de ensamble se lograron disminuir los consumos y eliminar los desperdicios de aire que se tenían en los equipos neumáticos de las 5 máquinas PT.

Los beneficios obtenidos fueron: ahorros de energía eléctrica en compresor y reducción de costos por mantenimiento.

La medición antes y después de mejoras se realizó en las máquinas PT de las células A, C, D.

4.1.2 CROQUIS DE MÁQUINAS OPTIMIZADAS

Croquis de ubicación de las máquinas PT en las células A, C y D

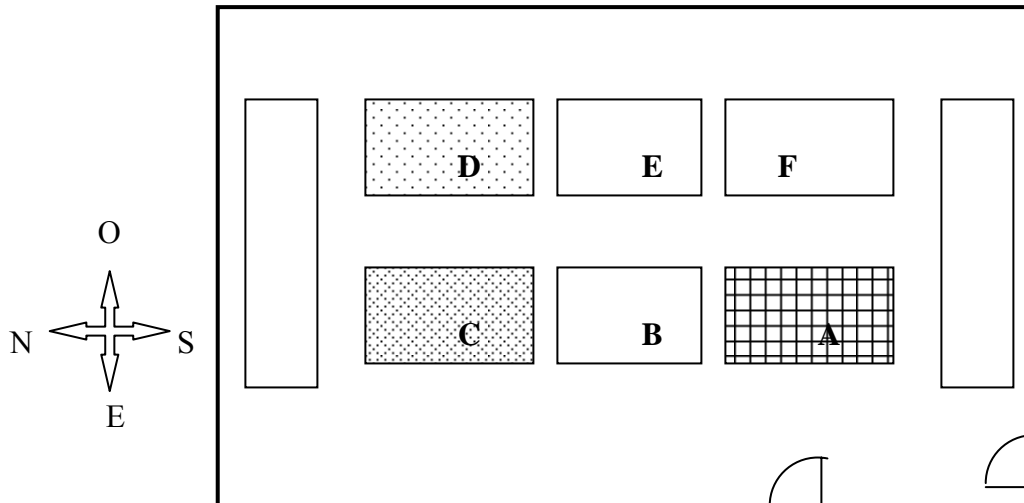


Figura 4.1 Croquis para ubicación de máquinas analizadas

CÉLULA	CANTIDAD MÁQUINAS
A	1
C	2
D	2
Total	5

Tabla 4.2 Máquinas “PT” analizadas

4.1.3 MEDICIÓN ANTES DE MEJORA

Los estudios de consumo iniciales (antes de las mejoras) se realizaron en mayo y junio del 2004 con el apoyo de personal de ingeniería y mantenimiento del área de ensamble.

Se realizaron 2 tipos de mediciones en cada estudio: la primera fue la medición estática, la cual se hizo a máquina en reposo con los elementos presurizados y la medición dinámica, la cual se realizó a máquina operando.

MÁQUINAS PT	ESTADO ESTÁTICO	ESTADO DINÁMICO	Eficiencia (%)
	Caudal Promedio (l/min.)	Caudal Promedio (l/min.)	
1C	693	2,240	69
2C	861	2,480	65
1D	617	2,712	77
2D	570	2,646	78
2A	839	2,783	69

Tabla 4.3 Medición de aire comprimido antes de mejora

De los archivos obtenidos en cada medición se calculó los consumos promedios sumando cada dato entre la cantidad de datos.

Ejemplo del cálculo de eficiencia del uso del aire comprimido

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Medición Dinámica} - \text{Medición Estática}}{\text{Medición Dinámica}} \times 100\% =$$

Ejemplo de cálculo de eficiencia en PT 1C

$$\text{Eficiencia} = \frac{(2,240 - 693) \text{ l/min.}}{2,240 \text{ l/min.}} \times 100\% = \mathbf{69 \% \text{ (eficiencia baja)}}$$

Se considera que una eficiencia óptima debe oscilar en el rango del 93 – 97 % del uso del aire comprimido. La eficiencia que se analiza es la comparación entre el consumo de aire comprimido a máquina operando y las pérdidas de aire comprimido a máquina en reposo.

4.1.4 MEDICIÓN DESPUÉS DE MEJORA

El estudio de consumos después de las mejoras de las máquinas PT en las células A, C, D fueron hechos de enero del 2005 como se puede observar en la tabla 4.4.

MÁQUINAS PT	ESTADO ESTÁTICO	ESTADO DINÁMICO	Eficiencia (%)
	Caudal Promedio (l/min.)	Caudal Promedio (l/min.)	
1C	66	1,711	96
2C	105	1,496	92
1D	142	1,667	91
2D	109	1,824	94
2A	240	1,291	81

Tabla 4.4 Medición de aire comprimido después de mejora

4.1.5 ACTIVIDADES PARA LOGRAR MEJORAS

Las acciones de mejora que se realizaron en las máquinas PT estuvieron orientadas a eliminar las fugas en los equipos neumáticos de las máquinas y optimizar los consumos.

Las principales actividades fueron:

- Se instaló y probó una electroválvula de ¼" independiente para control de boquillas en tazón de alimentación de cuerpo de bujía.
- Se cambiaron reguladores de presión.
- Se instaló y probó una electroválvula para control de toberas en tazón vibrador de electrodo.
- Se instaló y probó una electroválvula para control de generador de vacío solo en operación.
- Se sustituyó conectores y mangueras neumáticas dañadas.
- Se sustituyeron electroválvulas con consumo eléctrico y neumático óptimo
- Implementación de sistemas de corte de aire automático en la bajada principal de aire comprimido de forma automática.
- Se colocaron válvulas manuales de bola en tanque de almacenamiento y en línea de presión para evacuar condensados.
- Se colocó válvula check antes de tanque de almacenamiento (evitar caídas de presión).
- Se montó unidad de mantenimiento con purga automática
- Se sustituyó válvulas neumáticas por block de válvulas neumáticas Festo de 1/8".

4.1.6 AHORROS REALES

Para el cálculo del ahorro promedio anual se consideró un horario laborable de 310 días al año de operación por 24 horas al día. El ahorro total es la suma de las diferencias en las lecturas iniciales y finales de cada medición estática y dinámica en las 5 máquinas “PT”. Para el cálculo de ahorro en la medición estática se considero un tiempo promedio de 4 horas por día de paro y para el cálculo de ahorro en mediciones dinámicas se considero un tiempo de 20 horas por día de operación promedio. En la tabla 4.5 se presentan el ahorro de aire comprimido real de las 5 máquinas PT.

MAQUINAS PT	AIRE AHORRADO ESTATICO	AIRE AHORRADO DINAMICO	AHORRO ESTATICO	AHORRO DINAMICO
	Caudal Promedio (l/min)	Caudal Promedio (l/min)	%	%
1C	627	529	90	24
2C	756	984	88	40
1D	475	1,045	77	39
2D	461	822	81	31
2A	599	1,492	71	54

Tabla 4.5 Ahorros reales de aire en 5 máquinas “PT”

El monto de dinero del aire comprimido ahorrado para estas 5 máquinas será:

MAQUINAS PT	ESTADO ESTATICO (MXP)	ESTADO DINAMICO (MXP)	
1C	\$ 9,796.50	\$ 41,325.38	
2C	\$ 11,811.63	\$ 76,870.50	
1D	\$ 7,421.75	\$ 81,635.75	
2D	\$ 7,203.00	\$ 64,214.50	
2A	\$ 9,359.00	\$ 116,555.25	
COSTO DEL AIRE AHORRADO ANUAL	\$ 45,591.88	\$ 380,601.38	\$ 426,193.25

*Según tiempos definidos en el punto 4.16 de ahorros reales.

Tabla 4.6 Costo del aire ahorrado en las 5 máquinas PT

El aire comprimido ahorrado representa este monto de dinero Tabla 4.6 en las 5 máquinas PT del área de ensamble. El costo de 1 m³ utilizado para este proyecto fue de \$ 0.21 MN

4.1.7 ANÁLISIS COSTO - BENEFICIO

La inversión total utilizada para optimizar el uso de aire comprimido es de \$ 205,000.00 MXP ver figura 4.7. Esta inversión corresponde a materiales, mano de obra y servicios de medición para las 5 máquinas optimizadas En el cobro del servicio de medición lleva el costo de la depreciación del equipo de medición. La figura 4.7 nos muestra el ahorro que se tendrá en el primer año.

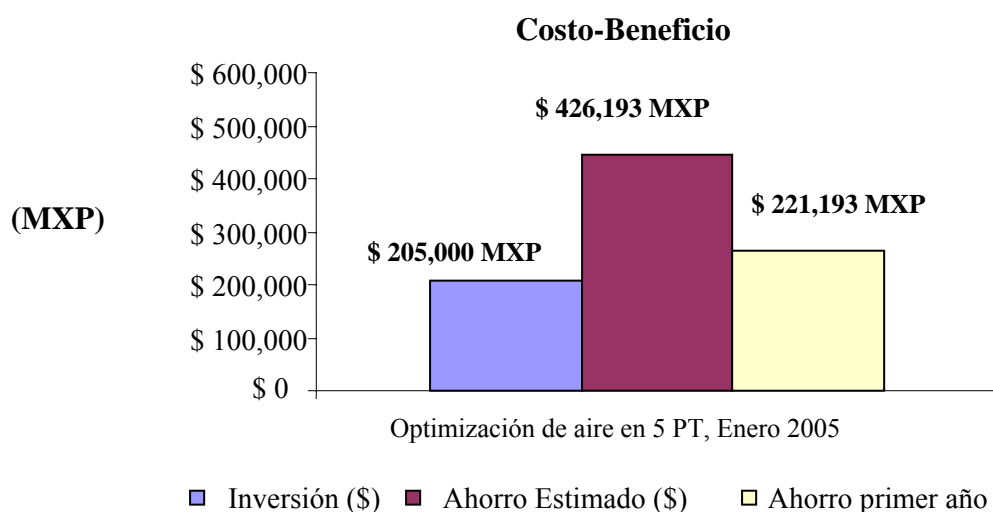


Figura 4.7 Estimación de ahorro después de la inversión.

Además del beneficio energético se lograron otros beneficios como:

1. Disminución de ruido en el área de trabajo
2. Disminución de caídas de presión en célula
3. Incrementar el tiempo de vida del equipo compresor
4. Mejor manejo del mantenimiento
5. Conciencia de cultura de ahorro de energía

4.1.8 RETORNO DE INVERSIÓN

La inversión que se realizó en este proyecto fue el equipo neumático para corregir y eliminar fugas, la mano de obra para la implementación y los estudios de medición

Calculo de este utilizando la ecuación 3.12

$$R = \left(\frac{\$426,193.00}{12 \text{ meses}} \right) = 35,516.1\$ / \text{mes}$$

$$\text{Re torno Inver sión} = \frac{\$205,000.00}{35,516.1\$ / \text{mes}} = 5.7 \text{ meses}$$

La amortización de la inversión se hará en aproximadamente 6.0 meses. Para el primer año se tendrá ahorros de **\$ 221,193.00 MXP** y para el siguiente año se tendrá un ahorro de \$ 426,193.00 MXP anual, si se mantienen los consumos de aire comprimido en forma óptima.

4.1.9 RESULTADO FINAL DEL PROYECTO

Al terminar las actividades de mejora en las 5 máquinas, se logró incrementar el nivel de presión a 5 a 6 Bar (0.5 – 0.6 MPa) en las máquinas, que significo menos paros de máquina por caídas de presión y los más importante fue comprobar que los ahorros de aire comprimido en cada máquina se había dado.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Por medio de esta metodología es posible lograr ahorros de energía neumática en las empresas hasta del 90 al 97 % del desperdicio de aire en condiciones de reposo en los sistemas neumáticos y, del 25 hasta 50 % del consumo de aire comprimido en condiciones de operación de los procesos neumáticos.

Las áreas más viables para este tipo de proyectos son aquellas en las que sus procesos tienen actuadores y válvulas con frecuencias mayores de 10 golpes por minuto y están montados en procesos automáticos.

Una de las causas principales a las que se atribuye el nivel de desperdicio de aire en las empresas, es la falta de capacitación en tecnologías de automatización o el desconocimiento de los operarios o la gente de mantenimiento acerca de técnicas neumáticas para hacer mejoras en algunos usos de aire.

En los diferentes trabajos realizados a la industria mexicana, se detectó que no se tiene la cultura de dar mantenimiento preventivo a los equipos neumáticos; es común encontrar que los equipos neumáticos trabajan hasta que ya no pueden operar mecánicamente sin importar el nivel de fuga que estos tengan.

Una tendencia en monitoreo autónomo y en el tratamiento de desperdicios es la utilización de tecnologías de diagnóstico en parámetros como presión, caudal y posicionamiento de actuadores, esto juega un papel muy importante en la industria de manufactura moderna.

Siempre que se piensa hacer alguna inversión en las empresas, es necesario justificarlo por medio de ahorros y en este proyecto se pueden lograr beneficios y ahorros como:

- Disminuir al 90 % los paros por fallas inesperadas en los equipos neumáticos.
- Incrementar la calidad del producto por medio de mantener una presión constante.
- Evitar la compra de compresores adicionales para mantener presiones de operación.
- Control de los gastos en mantenimiento de las partes neumáticas.

Además se pudo determinar que por cada 1 Bar (0.1 MPa) que se logre disminuir desde el cuarto de compresores, se logra tener un ahorro del 10 al 13 % de energía.

El costo del aire comprimido depende del tamaño del compresor, esto es: entre mayor sea el tamaño del compresor el costo del aire producido es menor; cuando es menor el tamaño del compresor el costo del aire comprimido se incrementa.

Cuando existen desperdicios altos de aire comprimido, el tiempo de amortización de los proyectos oscila entre 6 a 10 meses.

Es importante que las empresas hagan conciencia del costo en los desperdicios de aire comprimido en sus procesos y mucho de los puntos importantes para evaluar y tomar decisiones se describen en esta tesis.

Existen opciones donde las empresas pueden comenzar a evaluar y conocer sus niveles de consumo y desperdicio y entre ellos se tiene un auto diagnóstico, donde de forma periódica se está monitoreando los niveles de consumos y sus diferencias a los datos de referencia y otra opción es apoyarse con proveedores experimentados como es el caso de Festo, que ha diseñado y puesto en marcha esta metodología descrita en la tesis.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Héctor Corona, REPORTE INTERNOS DE ESTUDIOS DE CONSUMO DE AIRE COMPRIMIDO PARA CLIENTES. Festo Pneumatic, México, 2003-2007
- [2] Energy Tips. DETERMINE THE COST OF COMPRESSED AIR FOR YOUR PLANT. Office of Industrial Technologies Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy Washington, D.C. 20585, www.oit.doe.gov/bestpractices
- [3] Sven Lensdorf. WORKSHOP FESTO ENERGY SAVING SERVICE. Festo AG & Co. KG. 2002. Esslingen Germany.
- [4] Base de datos de clientes de FESTO PNEUMATIC S.A. Av. Ceylan No3, Col Tequesquahuac, CP 54020, Tlalnepantla Estado de México.
- [5] Salvador Millán. AUTOMATIZACIÓN NEUMÁTICA Y ELECTRONEUMÁTICA. Ed. Alfaomega Marcombo. México, 1995
- [6] Yunus A. Cengel, Michael A. Boles. TERMODINÁMICA. Ed. Mc Graw Hill 4^{ta} Edición, México, 2003
- [7] Enrique Carnicer. AIRE COMPRIMIDO, Teoría y cálculo de las instalaciones. Ed. Paraninfo. Madrid, 1991
- [8] Humberto Cantu, José Luís Cruz, Jorge González, Adrián Vázquez. MODELOS DE ADMINISTRACIÓN DE LA PRODUCCIÓN. ITESM. División de ingeniería y graduados departamento de ingeniería Industrial, Monterrey. México, 1984, 273, 282
- [9] Folleto de Atlas Copco. MANUAL 4 ECONOMY. Atlas Copco México, 2004
- [10] Arturo Abuchai, Eduardo Rodríguez, Ricardo Timperi. MANUAL SOBRE AIRE COMPRIMIDO Y SUS APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA. Departamento de Comunicaciones de Atlas Copco Venezuela S.A.
- [11] Stefan Hesse, Blue Diggest on Automation. AIRE COMPRIMIDO, FUENTE DE ENERGIA. Preparación y Distribución. Festo AG & Co. Esslingen Alemania. 2002

FORMATO MEDICIONES			
Nombre del técnico responsable de la medición:	Julio c. Dominguez		
Nombre del asesor responsable:	Ing. Hector Corona	Fecha:	28 de Agosto de 2007
Nombre del responsable por parte del cliente:	Ing. Jorge Armando García		
Nombre del cliente:	BRAUN	Planta:	NAUCALPAN
Nombre del tecnico de apoyo:			
Nombre del punto de medición:	Encerdadora ENC-07		
Tiempos de operación:	24 Horas al Dia (Lunes a Domingo)		
Tiempos de paro:	2 Horas por comida 2 o 3 horas x falta de material.		
Producto en el momento de medición:	Encerda el mango del cepillo		
Cantidad de producción por minuto	7000 por turno		
Observaciones:	Son 14 o 15 maquinas del mismo tipo		
Observaciones:			

Anexo 1 Formato utilizado para la toma de información en la medición.

PUNTO DE MEDICIÓN	TIPO DE MEDICIÓN	ARCHIVO	PRESION	°C	FLUJO	OBSERVACIONES
SI-HOC-CAN-10	DINAMICA	LOG 0034	6.9	20º	746 l/min	
SI-HOC-CAN-10	DINAMICA	LOG 0035	7.0	20º	774 l/min	
SI-HOC-CAN-10	ESTATICA	LOG 0036	7.0	20º	370 l/min	
SI-HOC-CAN-10	ESTATICA	LOG 0037	7.0	20º	375 l/min	
SI-HOC-CAN-10	ESTATICA	LOG 0038	7.1	20º	53 l/min	BOQUILLAS DESACTIVADAS
SI-HOC-CAN-10	ESTATICA	LOG 0039	7.1	20º	59 l/min	BOQUILLAS DESACTIVADAS

Anexo 2 utilizada para la toma de mediciones y nombres de archivos