



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

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN UNA
INDUSTRIA DE ALIMENTOS, PARA UN ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO**

José David Ramírez Carranza

Asesorado por el Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

Guatemala, octubre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN UNA
INDUSTRIA DE ALIMENTOS, PARA UN ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSÉ DAVID RAMÍREZ CARRANZA

ASESORADO POR EL ING. ENRIQUE EDMUNDO RUIZ CARBALLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR:	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR:	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR:	Ing. José Antonio de León Escobar
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS, PARA UN ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el mes de octubre de 2013.



José David Ramírez Carranza

Guatemala. 14 de mayo del 2014

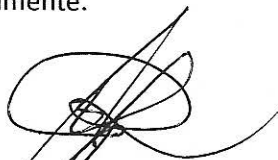
Ingeniero
Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador del Área Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente.

Ingeniero Guzmán:

Por medio de la presente le comunico que he revisado completamente el trabajo de graduación titulado "IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MEDICION DE AIRE COMPRIMIDO EN UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS, PARA UN ANALISIS DE CONSUMO ENERGETICO", desarrollado por el estudiante **José David Ramírez Carranza** y el mismo cumple con los objetivos propuestos .

Por lo tanto, el autor del mismo y yo como su asesor, nos hacemos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Atentamente.



Enrique Edmundo Ruiz Carballo
Asesor Nombrado
Colegiado 2225

Enrique F Ruiz C
INGENIERO ELECTRICISTA
SOL No 2225



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 86. 2014
Guatemala, 26 de MAYO 2014.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS, PARA UN ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO**, del estudiante **José David Ramírez Carranza**, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Área Electrónica



SRO



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 29. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; JOSÉ DAVID RAMÍREZ CARRANZA titulado: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS, PARA UN ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO. procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 2 DE JULIO 2,014.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN UNA INDUSTRIA DE ALIMENTOS, PARA UN ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO**, presentado por el estudiante universitario: José David Ramirez Carranza y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, octubre de 2014

ACTO QUE DEDICO A:

Dios Todopoderoso	Señor Creador del universo que te ves reflejado desde las cosas más pequeñas hasta los logros más grandes.
Mis padres	Vivian Noemí Carranza Bazini y José Jacinto Ramírez Morales, muchas gracias por dar todo ese esfuerzo por mí y tener siempre una palabra de aliento para mi vida.
Mi hermana	Vivian Janisse Ramírez Carranza, gracias por el apoyo incondicional que siempre me has brindado.
Mis abuelos	Por tenerme siempre en sus oraciones, intercediendo por mi vida.
Mis tíos	Por su gran apoyo desde que comencé este gran reto.
Mis primos y amigos	Muchas gracias por la ayuda brindada a mi vida personal y profesional.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Lugar en el cual forjé mis estudios y obtuve conocimientos científicos y prácticos, para desempeñarme como un profesional de éxito.

AGRADECIMIENTOS A:

**La empresa Frito Lay
Central América**

Por brindarme la oportunidad de realizar el estudio de aire comprimido; en especial a las personas de mantenimiento. Dios les bendiga.

Ingeniero Enrique Ruiz

Por tomar parte de su tiempo para asesorarme en este tema de graduación. Muchas gracias.

Ingeniero Ever Bautista

Por su ayuda y tiempo de manera generosa, motivándome siempre para la culminación del mismo. Dios lo bendiga.

Víctor Conde

Por su valiosa colaboración y apoyo en los temas de automatización industrial, brindándome la oportunidad de desarrollar el tema de la instalación y configuración del sistema. Bendiciones.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. CONCEPTOS Y COMPONENTES DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO	1
1.1. Aire comprimido.....	1
1.2. Producción de aire comprimido	5
1.3. Componentes en la generación de aire comprimido	7
1.4. Preparación de aire comprimido	9
1.5. Distribución de aire comprimido	12
1.6. Pérdidas en aire comprimido	14
1.7. Consumo energético en la generación de aire comprimido	18
2. MEDIDORES DE FLUJO DE AIRE	21
2.1. Medición del aire comprimido	21
2.2. Principios de medición del aire	22
2.2.1. Leyes de los gases, volúmenes estándares y masa de flujo de gas.....	23
2.3. Tipos de medidores electrónicos	25
2.3.1. Medidores de presión diferencial	27

2.3.2.	Placas de orificio	30
2.3.3.	Boquilla o tobera de flujo	31
2.3.4.	Medidores de área variable	32
2.3.5.	Medidores de turbina.....	34
2.3.6.	Caudalímetro tipo <i>vortex</i>	37
2.3.7.	Medidores de caudal electromagnéticos	41
2.3.8.	Medidor de caudal ultrasónico.....	42
2.3.9.	Caudalímetros Coriolis	45
2.3.10.	Medidor térmico de caudal	48
2.4.	Señales de salida de los medidores.....	49
2.5.	Elección del mejor medidor para el sistema de medición.....	51
2.6.	PLC y módulos.....	55

3.	DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE VARIABLES EN LA GENERACIÓN Y CONSUMO DE AIRE COMPRIMIDO	57
3.1.	Diagrama en bloques del sistema de medición	57
3.2.	Diagrama del sistema de generación de aire comprimido.....	58
3.3.	Instalación del medidor principal de flujo de aire.....	60
3.4.	Diagrama de la tubería de aire comprimido	68
3.5.	Comunicación entre dispositivos	71
3.5.1.	Hart	74
3.5.2.	Profibus	75
3.5.3.	Fundación Fieldbus	76
3.5.4.	Modbus.....	76
3.5.5.	Devicenet	76
3.6.	Programación del PLC para la captura de información	79
3.6.1.	Software de comunicación del PLP	80
3.6.2.	Software de programación del PLP	81
3.6.3.	Conexión al módulo de comunicación.....	82

3.6.4.	Configurando el módulo de comunicación	83
4.	IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL Y ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN DE LAS VARIABLES A MEDIR.....	85
4.1.	Comunicación del sistema de medición	86
4.2.	Obtención de los datos a través del sistema de medición	88
4.3.	Sistema que se utiliza para el almacenamiento e interpretación de datos y su programación.....	91
4.3.1.	Configuración de FactoryTalk Historian	94
4.4.	Software para el monitoreo del sistema de medición	96
4.5.	Programación del sistema de monitoreo	97
4.6.	Generación de reportes del consumo de aire comprimido	100
5.	ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO	105
5.1.	Partes que componen una línea de producción	105
5.1.1.	Descripción de las máquinas que componen una línea de producción	106
5.1.2.	Ponderación de consumo de aire por máquina.....	108
5.1.3.	Cálculo de consumo de aire por línea de producción	108
5.2.	Consumo energético en la generación de aire comprimido	110
5.3.	Debilidades en el sistema de aire comprimido	112
5.4.	Mejoras en el sistema de aire comprimido	112
5.5.	Datos obtenidos en el sistema de medición	114
5.5.1.	Análisis en las líneas de producción.....	115

5.6.	Auditorías de aire comprimido.....	116
5.6.1.	Aspectos generales del sistema.....	116
5.6.2.	Aspectos del lado de la demanda	116
5.6.3.	Aspectos del lado del suministro	117
CONCLUSIONES		119
RECOMENDACIONES		121
BIBLIOGRAFÍA		123

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de clasificación de compresores	6
2.	Diagrama de una tubería de aire comprimido	13
3.	Caudalímetro de placas de orificio.	30
4.	Caudalímetro de tobera.....	31
5.	Caudalímetro rotámetro.....	33
6.	Caudalímetro de turbina	35
7.	Caudalímetro tipo <i>vortex</i>	37
8.	Caudalímetro ultrasónico Doppler	43
9.	Caudalímetro ultrasónico de tránsito	43
10.	Efecto Coriolis	46
11.	Diagrama en bloques del sistema de medición	57
12.	Diagrama del sistema de aire comprimido	59
13.	Sistema de aire comprimido con medidor de flujo másico.....	61
14.	Medidor térmico.....	63
15.	Dimensiones para el cálculo de inserción	65
16.	Alineación del medidor	66
17.	Conexión del medidor.....	67
18.	Tubería de aire comprimido.....	69
19.	Distancias mínimas recomendadas para la instalación del medidor	70
20.	Diagrama de comunicación del sistema de medición.....	71
21.	Señal Hart.....	75
22.	Software de comunicación del PLC.....	81
23.	Software de programación del PLC.....	82

24.	Conexión al módulo de comunicación.....	83
25.	Agregando un nuevo módulo de comunicación	84
26.	Configuración de un nuevo módulo.....	86
27.	Módulo a utilizar	87
28.	Dirección IP del PLC	87
29.	Direcciones IP del sistema de medición.....	88
30.	Configuración del software de comunicaciones	89
31.	<i>Driver</i> de comunicaciones	90
32.	Ubicación de la dirección IP del PLC	91
33.	Agregando nuevas variables en Factory Talk Historian	95
34.	Variables a medir	96
35.	Panel de visualización del sistema de aire comprimido	98
36.	Verificando la variable a desplegar	99
37.	Vinculando la variable	99
38.	Propiedades del objeto	100
39.	Creando un directorio para reportes	102
40.	Conexión hacia el servidor de <i>historian</i>	102
41.	Importación de variables	103
42.	Línea de producción cuya base es el maíz	107

TABLAS

I.	Tabla de conversiones	4
II.	Norma ISO 8573-1.....	11
III.	Caídas de presión en tuberías.....	17
IV.	Tipos de medidores electrónicos.....	26
V.	Medidores y sus aplicaciones.....	53
VI.	Tabla de datos para el medidor.....	54
VII.	Características del medidor de flujo másico térmico.....	62

VIII.	Instalación del medidor.....	64
IX.	Descripción de las partes de la conexión.	68
X.	Características de los protocolos de comunicación industrial.	77
XI.	Direcciones IP de la red Ethernet.	78
XII.	Módulos del PLC.	79
XIII.	Consumo de un compresor.	111
XIV.	Estimación de consumos.....	111
XV.	Análisis de consumo y costo energético.....	115

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios medida de intensidad eléctrica
$\mu\text{S/cm}$	Conductividad de una solución electrolítica
DC	Corriente directa, flujo continuo de carga eléctrica a través de un conductor entre dos puntos
DN	Diámetro nominal de tubos representa el tamaño
libras/hora	Flujo de masa por hora
° F	Grados Fahrenheit medida de temperatura
° C	Grados Celsius medida de temperatura
kg/cm^2	Kilogramo por centímetro cuadrado unidad de fuerza
Kg/hora	Kilogramo por hora, flujo de masa
Kpa	Kilopascal unidad de presión
kW	Kilowatt unidad de potencia del Sistema Internacional de Unidades
kW/h	Kilowatts hora medida de consumo
Psi	Libra por pulgada cuadrada, unidad de presión
Mpa	Megapascales, unidad de presión
m^3	Metros cúbicos, unidad de volumen
μm	Micrómetros unidad de medida $1 \text{ m} = 1,000,000 \mu\text{m}$
Mm	Milímetros, unidad de distancia
Cfh	Pies cúbicos por hora
Cfm	Pies cúbicos por minuto
BTU/día	Una unidad de energía por día

GJ/hora	Unidad de energía gigajoule por hora
NI/min	Unidad de medida de flujo en condiciones normales
bar	Unidad de presión equivalente a un millón de barias estándar para tuberías de presión

GLOSARIO

Actuadores	Dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso, con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado.
Acumulador	Se refiere a un depósito de aire donde este se almacena.
Aftercooler	Es un intercambiador de calor aire/aire o un radiador.
Allen Bradley	Es la marca de una línea de equipos de automatización fabricado por Rockwell Automation.
Bit	Es un dígito del sistema de numeración binaria.
Caudal	Es la cantidad de fluido que avanza en una unidad de tiempo.
Caudalímetro	Instrumento para la medición de caudal o gasto volumétrico de un fluido o para la medición del gasto másico.
Condensación	Cambio de estado de la materia de forma gaseosa a líquida.

ControlLogix	PLC de la marca Allen Bradley, estos PLC son de la gama más robusta.
Eficiencia	Es la capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un objetivo determinado, con el mínimo de recursos posibles viable
Espesor	Densidad o condensación de un fluido.
Ethernet/ip	Es un protocolo de comunicaciones originalmente desarrollado por Rockwell Automation, es el mismo concepto de las redes Ethernet.
Fuelle	Dispositivo mecánico cuya función es la de contener aire para expelerlo a cierta presión y en cierta dirección, para diversos fines.
IEC	Comisión Internacional de Electrotecnia.
Implementación	Es la instalación de una aplicación informática, realización o la ejecución de un plan, idea, modelo científico, diseño, o especificación estándar.
LAN	Red de área local.
Máscara de red	Combinación de bits que sirve para delimitar el ámbito de una red de computadoras.

Neumática	Tecnología que emplea el aire comprimido como modo de transmisión de la energía necesaria para mover y hacer funcionar mecanismos.
Nixtamalización	Proceso mediante el cual se realiza la cocción del maíz con agua y cal, el cual es utilizado principalmente para la obtención de masa (nixtamal) para la elaboración de tortillas; este proceso es de origen mesoamericano.
PLC	Es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, para automatizar procesos electromecánicos tales como el control de la maquinaria de la fábrica en líneas de montaje o atracciones mecánicas.
Presión	Magnitud física que mide la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie; sirve para caracterizar cómo se aplica una determinada fuerza resultante sobre una línea.
RS232	Interfaz que designa una norma para el intercambio de una serie de datos binarios entre un DTE (equipo terminal de datos) y un DCE (Data Communication Equipment, equipo de comunicación de datos).
SCADA	Software para ordenadores que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia.

Sincronización	Describe el ajuste temporal de eventos, cuando determinados fenómenos ocurren en un orden predefinido o a la vez.
Tag	Es una marca con clase que delimita una región en los lenguajes basados en XML. También puede referirse a un conjunto de juegos informáticos interactivos que se añaden a un elemento de los datos para identificarlo.
Termodinámica	Rama de la física que describe los estados de equilibrio a nivel macroscópico, estudiados y definidos por medio de magnitudes extensivas, tales como la energía interna, la entropía, el volumen o la composición molar del sistema, o por medio de magnitudes no extensivas derivadas de las anteriores, como la temperatura, presión y el potencial químico.
Transductores	Dispositivo capaz de transformar o convertir una determinada manifestación de energía de entrada, en otra diferente a la salida, pero de valores muy pequeños en términos relativos respecto de un generador.
Trends	Se conoce como tendencias.

Vatímetros	Instrumento electrodinámico para medir la potencia eléctrica o la tasa de suministro de energía eléctrica de un circuito eléctrico dado.
Vortex	Es una región dentro de un fluido en el que el flujo es sobre todo un movimiento de rotación alrededor de un eje imaginario, recta o curva.
Vórtice	Es un flujo turbulento en rotación espiral con trayectorias de corriente cerradas. Puede considerarse como vórtice cualquier tipo de flujo circular o rotatorio que posee vorticidad.

RESUMEN

El aire comprimido es el resultado de la aplicación técnica que utiliza aire y lo somete a presión por medio de un compresor. Muchas veces, el aire no solo se comprime sino que también se deshumidifica y se filtra. El aire comprimido tiene la ventaja sobre los sistemas hidráulicos de ser más rápido, aunque menos preciso en el posicionamiento de los mecanismos y no permite fuerzas grandes.

Un sistema de medición de aire comprimido mide el flujo del aire en relación con el tiempo; esto sirve para relacionar el consumo en la producción en la planta de alimentos, obteniendo un estimado del costo en la generación del mismo.

La parte medular del sistema de medición es el medidor de flujo de aire comprimido; se mencionan las ventajas y desventajas de los medidores de flujo, así como la mejor selección del medidor para la aplicación en la industria de alimentos.

OBJETIVOS

General

Realizar la implementación de un sistema de medición de aire comprimido en una industria de alimentos, para un análisis de consumo energético.

Específicos

1. Presentar los conceptos y componentes del sistema de aire comprimido.
2. Describir los fundamentos de funcionamiento y tipos de medidores de flujo.
3. Presentar la configuración y los componentes necesarios para un sistema de medición de variables en la generación y consumo de aire comprimido.
4. Describir la implementación de un sistema de control y almacenamiento de información de las variables a medir.
5. Presentar el análisis de consumo energético en la generación del aire comprimido.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de graduación se genera con la necesidad de realizar un estudio de consumo de aire comprimido en la planta de producción, ya que se identificó que uno de los sistemas críticos que consumen energía es el sistema de aire comprimido; esto da como resultado una gran demanda de energía y gran aporte de ella se pierde por el mal control del recurso.

En el primer capítulo se presentan las partes y componentes que conforman el sistema de aire comprimido en una industria de alimentos.

En el segundo capítulo se presenta los medidores de flujo que se utilizan en la industria de alimentos, así como la mejor elección para la medición de flujo del aire comprimido.

El diseño del sistema de medición de variables en la generación y consumo del aire comprimido se presenta en el capítulo tercero. En el cuarto capítulo se da a conocer la implementación de un sistema de control y almacenamiento de información de las variables a medir.

En el quinto capítulo se presenta el análisis de consumo energético en la generación de aire comprimido para satisfacer las necesidades de la planta de producción, para luego concluir con las conclusiones y recomendaciones, en relación con la implementación de un sistema propuesto, para un análisis de consumo energético.

1. CONCEPTOS Y COMPONENTES DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

1.1. Aire comprimido

La primera vez que se usó el aire comprimido sería en el soplado de metales para su enfriamiento. El invento del *fuelle* favoreció la creación de nuevos metales al alcanzarse temperaturas más altas en los hornos. No fue sino hasta en el siglo XIX, donde empezaría a estudiarse el aire como sistema de transporte de energía.

El aire comprimido se refiere a una tecnología o aplicación técnica que hace uso de aire que ha sido sometido a presión por medio de un compresor. En la mayoría de aplicaciones, el aire no solo se comprime sino que también se deshumidifica y se filtra.

El uso del aire comprimido es muy común en la industria, su uso tiene la ventaja sobre los sistemas hidráulicos de ser más rápido, aunque es menos preciso en el posicionamiento de los mecanismos y no permite fuerzas grandes. Se utiliza en:

- Elevadores neumáticos
- Destornilladores automáticos
- Tornos dentales
- Armas de aire comprimido
- Equipos de minería (taladros rotopercutores, martillos picadores, lámparas, ventiladores y muchos otros)

- Arranque de motores de avión
- Motores de aire comprimido

Por su versatilidad y su rapidez de respuesta en el trabajo. Su acción no es tan inmediata como la eléctrica, pero si es notablemente más rápida que la hidráulica.

La neumática se sirve como materia prima del aire atmosférico que nos circunda, el cual se puede tomar en la cantidad que sea necesario para comprimirlo y transformar su energía en trabajo. La compresión se hace en una central de compresores que se puede situar en cualquier punto de la fábrica, pues el aire comprimido es fácilmente de transportar, aun en largas distancias, por medio de tuberías, las cuales distribuyen la presión de trabajo uniformemente hacia los puestos de consumo.

Por ser el aire un fluido compresible, se puede almacenarlo fácilmente en depósitos, los cuales sirven, además, para regular la entrada en funcionamiento del compresor y reponer el aire comprimido consumido, con el ahorro consiguiente de kW/h.

El mantenimiento de las instalaciones de aire comprimido es de poco gasto y puede confiarse a personas normalmente entrenadas en instalaciones.

Otras características propias del aire comprimido son:

- El aire no presenta riesgos de chispas ni de cargas electrostáticas
- El escape de aire no es tóxico ni es explosivo
- Costos que no son muy superiores a los de otros sistemas de energía (en efecto, 1 m³ de aire aspirado, comprimido a 6 kg/cm², según condiciones

de trabajo; consumo aproximado de potencia: 5 kW/h para la compresión de 1 m³ de aire a 6 kg/cm²)

- Tiene gran capacidad de regulación y control
- Admite su combinación con otras formas de energía
- Los circuitos de aire no están expuestos a los golpes de ariete como los hidráulicos
- No implica riesgos graves ni peligro de accidentes

Considerando que los seres humanos se han desarrollado en un ambiente sometido a la presión de 1 bar, pero sin percibirla, nuestras primeras mediciones tomaron como referencia esta presión.

Este es el motivo por el cual, cualquier valor de presión que sea superior a la atmosférica se conoce como presión (o sobrepresión) y a cualquier valor de presión que esté por debajo de la atmosférica se reconoce como vacío (o depresión).

Según sea la referencia que se tome para medir la presión, en presencia de una medida absoluta o relativa. Es decir: la presión relativa (o efectiva) es aquella medida de presión que toma como referencia a la presión atmosférica. La presión absoluta es aquella medida de presión que toma como referencia al cero absoluto de presión.

Hoy en día se encuentran en el mercado equipos que sirven para medir las diferentes magnitudes que se tienen en los procesos industriales. Dependiendo de la marca del equipo y el país de fabricación, así serán las unidades que este utilizará para cuantificar la magnitud medida.

Tabla de equivalencias de medidas para poder realizar conversiones a los sistemas correspondientes.

Tabla I. **Tabla de conversiones**

Unidad de medida	Conversión
1 kilogramo (m)	1000 gramos
1 kilogramo	2.205 libras
1 libra	16 onzas
1 tonelada	1000 kilogramos
1 bar	100000 pascal (Pa)
1 bar	0.9869 atmósferas (atm)
1 bar	14.504 psi
1 bar	750.06 mm mercurio (mm de Hg)
1 bar	29.53 plg mercurio (in de Hg)

Fuente: LENADOIS, Jean-Marrie; RAMOS, Aura López de. *Magnitudes, dimensiones y conversiones de unidades*. p. 115.

Para realizar las conversiones se aplica la regla de tres simple.

En los sistemas de aire comprimido, el aire aspirado por el compresor entra a la presión y temperatura ambiente o atmosférica, con su consiguiente humedad relativa. Entonces, se le comprime a una presión más alta que la atmosférica. Este ciclo de compresión lleva consigo una elevación de temperatura y como consecuencia, un calentamiento del aire hasta un grado tal que toda la humedad contenida en el mismo pasará por el compresor al ser aspirado.

Se comprende, por lo tanto, que este aire comprimido caliente que descarga el compresor y que lleva vapor de agua, al irse enfriando por radiación y convección en el depósito y tuberías de distribución, y descender su temperatura hasta igualar la temperatura ambiente, condensará la mayor parte de este vapor en forma de gotas de agua, las cuales serán arrastradas por el mismo flujo del aire hacia los lugares de utilización.

1.2. Producción de aire comprimido

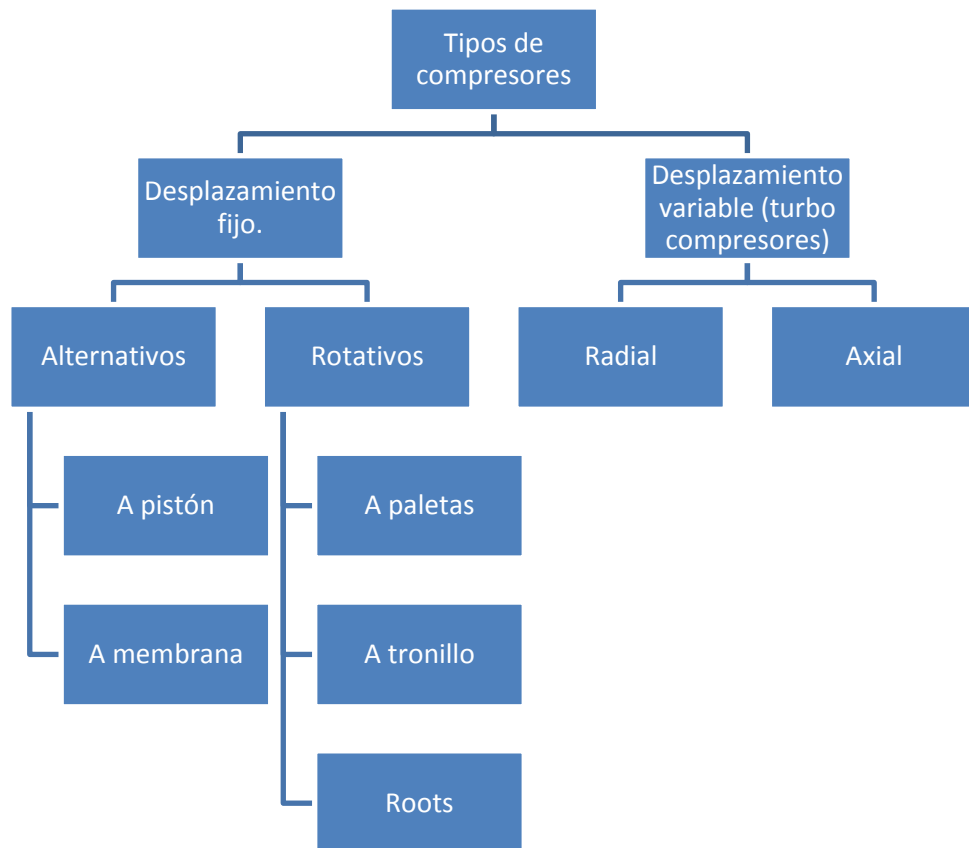
El aire comprimido se produce por medio del compresor que aspira el aire atmosférico y lo comprimen hasta transferirle una presión superior. Los compresores se pueden clasificar en dos grandes grupos.

El primer grupo consiste en los compresores de desplazamiento fijo, el segundo grupo el de los compresores de desplazamiento variable. Dentro del primer grupo se encuentran los compresores alternativos dentro de los cuales encontramos dos tipos: a pistón y a membrana. Dentro de este grupo de desplazamiento fijo también se encuentran los compresores de tipo rotativo dentro de los cuales encontramos tres tipos: a paletas, a tornillo y tipo *roots*.

Los de membrana son utilizados en medicina y en algunos procesos químicos ya que el aire bajo presión se obtiene más limpio de aceites. Con los turbocompresores se obtienen una presión de 5 u 8 bares utilizando mayor caudal.

La siguiente figura muestra el diagrama de clasificación de los compresores:

Figura 1. **Diagrama de clasificación de compresores**



Fuente: www.sedicomp.com. Consulta: marzo de 2014.

Para la selección de los compresores se debe estimar el consumo de la planta, sobreestimar un 5 o 10 % debido a pérdidas y luego ajustar este caudal requerido para que el compresor trabaje en un 70 u 80 % de su capacidad.

Además del compresor otro elemento importante para el aporte de la energía del sistema es la presencia del depósito o acumulador que está para afrontar los picos de consumo, además de cumplir con la función de enfriamiento y reducción de velocidad actuando como separador de condensado y aceites provenientes del compresor.

El tamaño de un acumulador de aire comprimido depende:

- Caudal de suministro del compresor
- Consumo de aire
- La red de tuberías (volumen suplementario)
- Tipo de regulación
- La diferencia de presión admisible en el interior de la red

1.3. Componentes en la generación de aire comprimido

Para generar aire que cumpla con las normas requeridas para la utilización en la planta se deben colocar una serie de componentes para la generación de aire comprimido:

- **Compresor:** es el elemento encargado de tomar el aire exterior que está a presión atmosférica (aprox. 1 bar) para elevarla según las necesidades de consumo o de uso a que se destine este aire comprimido (ej. para el accionamiento de utillajes, mecanismos, o bien de control o medida, accionando válvulas y otros dispositivos).

- Equipo refrigerador posterior: el flujo de aire, una vez sale del compresor, además de salir a mayor presión, también sale a mayor temperatura (oscila según el grado de compresión entre 70 °C y los 200 °C). El aire a mayor temperatura también aumenta su capacidad de contener agua, pero conforme se vaya enfriando toda esta agua irá condensando y si no se ha extraído previamente terminará en el interior de la instalación y llegará hasta los puntos de consumo, con el riesgo que ello conlleva, no sólo en cuanto a durabilidad de la instalación y sus equipos (riesgo de oxidación), por el peligro de formación de plagas de microorganismos y el riesgo de enfermedades. Por ello, para evitar posibles condensaciones se coloca, al salir del compresor, un enfriador (*aftercooler*). El *aftercooler* no es más que un intercambiador de calor, que puede funcionar bien con agua o bien con aire como fluido caloportador.
- Deshumidificador: justo detrás del enfriador, se coloca un deshumidificador que recoja lo antes posible el condensado producido. Este sistema ofrece una eficiencia entre el 80-90%, por lo que habrá que tener en cuenta la presencia todavía de agua en la instalación. Así, en el siguiente equipo, que suele ser el depósito de acumulación, habrá que dotarle de una válvula en su fondo para que siga drenando el agua que no se ha eliminado con el deshumidificador.
- Depósito de acumulación: en todo sistema de aire comprimido es habitual la colocación de un depósito de acumulación de aire que alimente a las unidades de consumo. El depósito de acumulación funciona como un depósito pulmón, que permita reducir el número de arranques del compresor para hacer frente a la demanda de aire comprimido cada vez que se produzca.

- **Filtros:** como ya se ha dicho, el aire es una mezcla incolora, inodora e insípida de muchos gases, principalmente nitrógeno y oxígeno. Pero además, el aire se contamina de forma natural con partículas sólidas, como polvo, arena, hollín y cristales de sal, dependiendo del entorno y la altitud donde se encuentre la instalación.
- El vapor de agua es otro ingrediente natural que se puede encontrar en cantidades variables en el aire, además de restos de aceites que provengan de la lubricación del compresor. Cuando se comprime el aire, aumenta la concentración de la humedad y de todos estos contaminantes, que si no se eliminan y permanecen en el sistema, producirán un efecto negativo sobre los equipos neumáticos, causando paradas de producción, productos defectuosos y reducción de la vida útil de los equipos, además de problemas higiénicos que pueden causar la proliferación de microorganismos por la presencia de humedad y otros contaminantes como aceites en los conductos del sistema de aire comprimido.

1.4. Preparación de aire comprimido

La depuración del aire comprimido comienza en la estación de compresión: el filtro de entrada retiene las partículas grandes de polvo en suspensión. Con el fin de alargar la vida útil de estos filtros, la aspiración del compresor deberá estar alejada de lugares donde se producen (lijadoras, pulidoras, etc.).

Los refrigeradores de aire instalados en el compresor condensan gran parte del vapor de agua aspirado. Para que la cantidad de agua aspirada sea la menor posible, el compresor debe instalarse en el lugar más seco y fresco posible.

El regulador de presión ajusta la presión en el circuito a un valor deseado. Cuando el aire comprimido supera la presión establecida se produce un escape de aire a la atmósfera para limitarla.

El acumulador es un eficaz colaborador en la limpieza del aire, ya que en él se depositan los condensados de agua de los refrigeradores y el aceite procedente del compresor.

Los sistemas y procesos de producción modernos necesitan aire comprimido de alta calidad. Esta calidad se define en la norma internacional ISO 8573-1:2001 que califica la calidad del aire de acuerdo a los valores de suciedad (por el tamaño de las partículas sólidas suspendidas y su concentración), de agua (según el punto de rocío a presión alcanzado y el contenido de vapor de agua presente en el aire) y de aceite (por la concentración total de aceite presente en el aire en forma de aerosoles, líquidos o vapores).

Una vez definido la calidad de aire que se requiere según la aplicación, entonces se hace necesario someter al flujo de aire a un proceso de tratamiento mediante etapas de filtrado, separación de agua y secado que consiga unos niveles de suciedad, contenido en agua y aceite que queden por debajo de los límites establecidos.

En la tabla siguiente se define la calidad del aire clasificándolo en diferentes clases según la normativa.

Tabla II. **Norma ISO 8573-1**

Calidad del aire comprimido, según ISO 8573-1					
CLASE	PARTÍCULAS SÓLIDAS			HUMEDAD	ACEITE
	Número máximo de partículas por m ³			Punto de rocío a presión (°C)	Concentración total mg/m ³
	0,1-0,5 µm	0,5-1,0 µm	1,0-5,0 µm		Aerosoles, líquidos o vapores
1	100	1	0	-70	0,01
2	10000	1000	10	-40	0,1
3	-	10000	500	-20	1
4	-	-	1000	3	5
5	-	-	20000	7	-
6	-	-	-	10	-

Fuente: www.iso.org. Consulta: febrero de 2014.

De esta forma para designar la clase de pureza del aire comprimido se debe seguir el siguiente formato:

ISO 8573-1 X.Y.Z,

Donde:

X = clase de partículas sólidas

Y = clase de humedad

Z = clase de aceite

1.5. Distribución de aire comprimido

Las redes de distribución de aire comprimido surgen para poder abastecer de aire a todas las máquinas y equipos que lo precisen, por lo que se debe tender una red de conductos desde el compresor y después de haber pasado por el acondicionamiento de aire, es necesario un depósito acumulador, donde se almacene aire comprimido entre unos valores mínimos y máximos de presión, para garantizar el suministro uniforme incluso en los momentos de mayor demanda.

El diámetro de las tuberías se debe elegir para que si aumenta el consumo, la pérdida de presión entre el depósito y el punto de consumo no exceda de 0,1 bares.

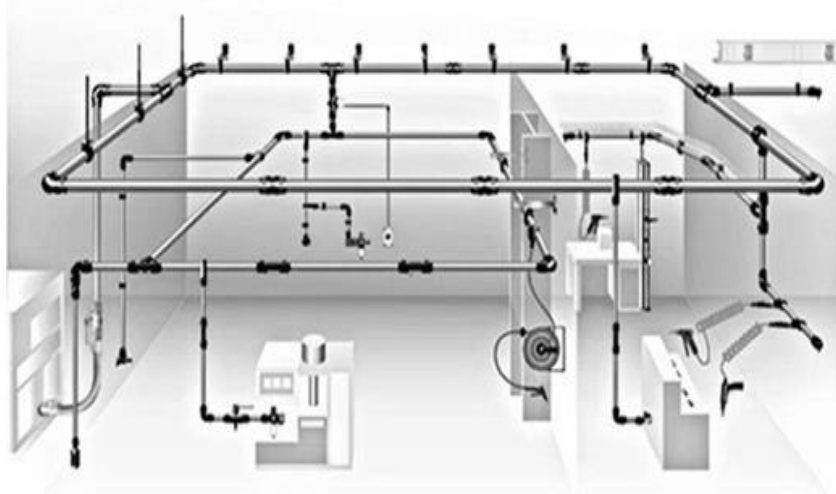
Cuando se planifica una red de distribución de aire comprimido hay que pensar en posibles ampliaciones de las instalaciones con un incremento en la demanda de aire, por lo que las tuberías deben dimensionarse holgadamente.

Las conducciones requieren un mantenimiento periódico, por lo que no deben instalarse empotradas; para favorecer la condensación deben tenderse con una pendiente de entre el 1 y el 2 % en el sentido de circulación del aire, y estar dotadas a intervalos regulares de tomas por su parte inferior, con las purgas correspondientes para facilitar la evacuación del condensado.

Las tomas para enlazar con los puntos de consumo siempre deben producirse por la parte superior de las tuberías, para evitar el arrastre de agua condensada en las tomas de aire, debido a su mayor densidad, circulará por la generatriz inferior de la conducción.

En general las redes de distribución suelen montarse en anillo, con conexiones transversales que permitan trabajar en cualquier punto de la red, instalándose válvulas de paso estratégicamente, para poder aislar una zona de la red de distribución en caso de producirse alguna avería, y que puede continuar trabajándose en el resto de la instalación.

Figura 2. **Diagrama de una tubería de aire comprimido**



Fuente: spanish.alibaba.com. Consulta: abril de 2014.

Los materiales adecuados para construir una red de distribución deben cumplir una serie de condiciones: deben asegurar bajas pérdidas de presión, limitación de fugas, ser resistentes a la corrosión, permitir posibles ampliaciones y tener un precio reducido.

Por todo ello y para los distintos tipos de instalación, las conducciones pueden ser de: cobre, latón, acero galvanizado, polietileno o poliamida.

1.6. Pérdidas en aire comprimido

La ineficiencia del aire comprimido, no se limita solo al propio funcionamiento termodinámico de las máquinas que lo producen, dado que en muchas ocasiones, rutinas descuidadas de control o un mantenimiento preventivo no planificado agravan la situación.

Desde el punto de vista energético, las siguientes prácticas, producirán un bajo rendimiento de la instalación:

- Redes de aire inadecuadamente mantenidas con fugas muy elevadas.
- Selección de una presión excesiva para el trabajo realizado por el aire comprimido.
- Utilización del aire comprimido para soplados en los procesos o limpieza del personal y suelos.
- Inadecuada capacidad de reserva de aire para puntas de consumo.
- Excesivo tiempo en vacío de funcionamiento de los compresores.

El caudal total que generan los compresores, es una función de la demanda de los equipos, de operaciones complementarias (soplados para diferentes aplicaciones), más las fugas de toda la instalación. Las fugas de aire comprimido son la mayor y más importante fuente de desperdicio de energía en la mayoría de los sistemas. En oportunidades, estas pueden alcanzar entre el 20 y el 30 % de la capacidad de generación de los compresores.

Una proactiva detección de fugas y su reparación, pueden reducir las pérdidas a menos del 10 % del caudal de aire producido. Las fugas causan importantes caídas de presión que producen ineficiencia en el funcionamiento de las máquinas y las herramientas afectando la producción, forzando a los compresores a trabajar más continuamente, provocando mayores desgastes, mayores mantenimientos y mayores costos.

Para compensar estas pérdidas, normalmente se induce a un aumento en la presión del sistema. Las pérdidas aumentan en función directamente proporcional al cuadrado del diámetro del orificio, a la presión de utilización y a las horas de operación del sistema. Aunque las fugas pueden ocurrir en cualquier parte de la instalación, los componentes con problemas más comunes son:

- Coplas, conexiones, uniones rápidas y mangueras
- Filtros, reguladores de presión y lubricadores
- Drenajes para eliminación de condensados
- Válvulas de cierre abiertas
- Empaquetaduras de actuadores
- Sellado inadecuado de roscas
- Puntos generales de consumo
- Productos de baja calidad

La caída de presión es un término utilizado para caracterizar la reducción de presión del aire desde la descarga del compresor hasta el punto final de utilización. Esta ocurre cuando el aire viaja primero a través de los equipos de tratamiento (secadores, filtros, etc.), y luego cuando lo hace por todo el sistema de distribución.

Cualquier tipo de obstrucción, restricción o aspereza en el sistema causará resistencia al desplazamiento del aire produciendo caída de presión. Por el lado de la generación esto se observará en los separadores, enfriadores posteriores, separadores de condensado, secadores y filtros.

En el sistema de distribución las mayores caídas de presión se encontrarán en los puntos de utilización, subdimensionamiento y fugas en las tuberías, conectores, filtros, reguladores y lubricadores.

La implementación de acciones correctivas puede lograr importantes reducciones en el consumo energético. Es necesario observar primariamente las siguientes recomendaciones:

- En referencia a una eficiencia energética, la red más eficiente, será una distribución principal cerrada en anillo y sobre la cual todos los usuarios estarán conectados.
- La caída de presión no debe ser mayor del 10 % entre la sala de generación y el punto de consumo más alejado, por lo que se recomienda mantenerla entre 0.3 y 1 bar como máximo.
- Caídas de presión mayores a los valores señalados, darán como resultado un pobre desempeño del sistema y, por lo tanto, un excesivo consumo de energía ya que por cada 2 psi de caída de presión se tendrá un aumento aproximado de un 1 % en el costo equivalente de la potencia consumida por el compresor.

- Dado a lo indicado, antes de incrementar la presión de operación en los puntos de consumo, se debe primero tratar de reducir la caída de presión del sistema, debido que al incrementarla, además de aumentar el consumo de energía, se potenciará la caída de presión y las fugas en la instalación.

Es esencial que los diámetros de las tuberías sean adecuadamente dimensionados para evitar importantes caídas de presión. La velocidad del aire en las tuberías no debe ser superior a los 6 m/seg., dependiendo de la longitud de las mismas.

Tabla III. **Caídas de presión en tuberías**

Diámetro de tubería [mm]	Caída de presión [bar] cada 100 mts.	Pérdida de potencia equivalente [kW]
40	1.8	9.5
50	0.65	3.4
65	0.22	1.2
80	0.04	0.2
100	0.02	0.1

Fuente: elaboración propia.

Elevadas presiones de operación afectan las utilidades, potencian las fugas e incrementan los gastos. Asimismo, disminuyen la vida útil de las herramientas y componentes neumáticos del proceso en general. Esto ocasiona un aumento de la potencia consumida por el compresor, sin aumentar la eficiencia de producción.

Diferentes máquinas, herramientas y procesos requieren generalmente distintas presiones para un óptimo rendimiento. Los fabricantes de dichos equipos deben especificar para estos sistemas los adecuados requerimientos de presión.

Finalmente, la demanda artificial, está definida como el exceso de aire requerido por el sistema en aplicaciones no reguladas debido a que el mismo está siendo operado a presiones superiores a los requerimientos reales de producción.

1.7. Consumo energético en la generación de aire comprimido

La utilización del aire comprimido, está directamente relacionada con el consumo de la energía eléctrica que lo produce. Es importante crear un historial de todo el sistema de generación, distribución y utilidades de aire comprimido, con la finalidad de tener instalada una red eficiente, y con el objetivo de importantes reducciones en los costos operativos.

El conocimiento y su registro respecto a la capacidad instalada, permitirá documentar como está siendo operado el sistema y la capacidad real de generación para futuras ampliaciones de la demanda. En la actualidad, el 90 % de las industrias, utilizan aire comprimido en sus procesos productivos.

La sencillez de operación, la disponibilidad, la facilidad y la seguridad en el manejo de los equipos, dispositivos y herramientas neumáticas, han propiciado una gran utilización de la energía de presión producida por el aire comprimido.

A pesar de ello, los sistemas de producción y/o generación de aire comprimido, la distribución y sus utilidades, se mantienen en un alto porcentaje en estado de descuido y con un escaso mantenimiento preventivo y predictivo; lo que ocasiona bajos rendimientos y un elevado desperdicio de energía.

Una auditoría de control, y un pormenorizado análisis del sistema, buscan una eficiencia de la producción, como objetivo final cada vez mayor.

En función de los costos de la "energía", los procesos pueden perder su eficiencia, dado que estos costos de energía, afectan directamente a los costos de producción. Desde las muchas formas de resolver el problema de la energía, sin duda que una mejor "eficiencia energética", de los procesos productivos será la mejor opción. Por otra parte, el "ahorro de energía" está comenzando a transformarse hoy en día en una importante ventaja competitiva poco conocida y poco utilizada en la tecnología del aire comprimido. El aire comprimido no es visto en general como un costo de producción. No es gratis, y su generación requiere una gran cantidad de energía.

En muchas plantas industriales, los compresores consumen mayor electricidad que cualquier otro tipo de equipos. Las ineficiencias en el sistema de aire comprimido así como sus costos de mantenimiento, pueden por lo tanto ser muy elevados.

2. MEDIDORES DE FLUJO DE AIRE

2.1. Medición del aire comprimido

El aire comprimido se puede medir en presión volumétrica así como el caudal, la medición del caudal es la cuantificación de movimiento de fluido a granel.

El flujo se puede medir en una variedad de formas. Los medidores de flujo de desplazamiento positivo acumulan un volumen fijo de fluido, entonces se cuenta el número de veces que el volumen se llena para medir el flujo.

Otros métodos de medición de flujo dependen de las fuerzas producidas por la corriente que fluye ya que supera una condición conocida, para calcular indirectamente el flujo. El flujo puede ser medido mediante la medición de la velocidad del fluido sobre un área conocida.

La medida de caudal en conducciones cerradas, consiste en la determinación de la cantidad de masa o volumen que circula por la conducción por unidad de tiempo.

Los instrumentos que llevan a cabo la medida de un caudal se denominan, habitualmente, caudalímetros o medidores de caudal, constituyendo una modalidad particular de los contadores, los cuales integran dispositivos adecuados para medir y justificar el volumen que ha circulado por la conducción.

Los medidores de caudal volumétrico pueden determinar el caudal de volumen de fluido de dos formas:

- Directamente, mediante dispositivos de desplazamiento positivo.
- Indirectamente, mediante dispositivos de: presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, etc.

Puesto que la medida de caudal volumétrico en la industria se realiza, generalmente, con instrumentos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido.

En las industrias es necesario medir indirectamente el flujo ya que a través de este mismo se pueden ver algunas cualidades del flujo y tener una medida indirectamente de lo que se está consumiendo.

2.2. Principios de medición del aire

El aire es la mezcla de gases que constituye la atmósfera terrestre, que permanecen alrededor del planeta Tierra por acción de la fuerza de gravedad. El aire es esencial para la vida en el planeta. Es particularmente delicado, fino, etéreo y si está limpio transparente en distancias cortas y medias.

En proporciones ligeramente variables, está compuesto por nitrógeno (78 %), oxígeno (21 %), vapor de agua (0-7 %), ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y gases nobles como kriptón y argón; es decir, 1% de otras sustancias. Es por lo que se estudia cómo se comporta un gas.

2.2.1. Leyes de los gases, volúmenes estándares y masa de flujo de gas

Existen dos modelos de conducta de los gases, ideales y no ideales. Los gases ideales se pueden describir con dos simples principios: Las leyes de Gay-Lussac (la cual relaciona presión y volumen), y las leyes de Boyle-Marriote (relacionando la temperatura y el volumen del gas). Cuando combinamos, estas forman la ecuación del estado de los gases ideales:

$$\frac{P.V}{T} = n.R = \text{Constante}$$

P = presión

V = volumen

T = temperatura

n = tamaño molecular

R = gas constante

Donde el gas fluye a través de un sistema de tuberías o un medidor de caudal, se puede escribir que:

$$\frac{P_0.V_0}{T_0} = \frac{P_1.V_1}{T_1} = \frac{P_x.V_x}{T_x}$$

P₀, V₀, T₀ = presión, volumen y temperatura bajo condiciones de referencia.

P_x, V_x, T_x = presión, volumen y temperatura bajo condiciones del flujo en diferentes puntos de la tubería.

La densidad del gas puede tenerse en cuenta en la ecuación anterior para que las condiciones de flujo pueden ser calculados en relación con las condiciones de referencia. Entonces:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{V_0}{V_1} = \frac{P_1.T_0}{P_0.T_1}$$

ρ_0 = densidad del gas bajo las condiciones de referencia

ρ_1 = densidad del gas bajo condiciones de flujo en diferentes puntos de la tubería

De todas estas ecuaciones las propiedades de un gas ideal pueden ser calculadas. Sin embargo, la mayoría de los gases no obedecen a las leyes de los gases ideales, especialmente a altas presiones, y en realidad el comportamiento ideal es solo una aproximación.

El comportamiento real de muchos de los gases se explica por la introducción de un factor de compresibilidad (Z). La ecuación del estado ideal de los gases queda de la siguiente forma:

$$P.V = Z.n.R.T$$

El factor de compresibilidad “ Z ” es la relación del volumen del gas real con el volumen ocupado por la misma masa en un gas ideal a la misma temperatura y presión.

Es de vital importancia que las condiciones de medida se definen y calculan correctamente.

El flujo de volumen real puede vincularse de nuevo a las condiciones de referencia, por lo general a 1.013 bares presión (14.7psi) y 15°C (60 ° F). Esto se llama el volumen estándar. Por lo tanto:

$$Q_0 = Q_1 \frac{\rho_1}{\rho_0}$$

“0” para condiciones de referencia, “1” para condiciones actuales.

Aplicando la ecuación de estado real de los gases, se llega a una expresión de la relación entre el volumen estándar y el volumen actual:

$$Q_0 = Q_1 \frac{P_1}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_1} \cdot \frac{Z_0}{Z_1}$$

La medición básica para el flujo es a menudo el flujo de masa, ya que esta variable no es dependiente de la temperatura y de la presión como es el flujo de volumen. El flujo másico es el caudal volumétrico real multiplicado por la densidad del fluido real. Caudal volumétrico estándar, por lo tanto, es el flujo de masa dividida por la densidad de referencia (estándar).

En el caso del aire comprimido para una empresa es necesario como es la calidad de su aire midiendo la temperatura del mismo, esto se debe tomar en cuenta para la selección de un medidor adecuado.

2.3. Tipos de medidores electrónicos

La norma BS- 7405 empleó el principio de funcionamiento para clasificar los distintos tipos de medidores de flujo y que conformaron la base de la estructura de la norma.

La tabla hace diferenciación entre dos clases básicas de medidores:

- Las que extraen energía del flujo
- Las que añaden algo al flujo para inferir en la velocidad de flujo

Tabla IV. **Tipos de medidores electrónicos**

Grupo	Descripción	Categoría (energía)
1	Convencionales de presión diferencial	Extractivo
2	Otros tipos de presión diferencial	Extractivo
3	De desplazamiento positivo	Extractivo
4	Medidores de turbina	Extractivo
5	Medidores de <i>vortex</i>	Extractivo
6	Medidores electromagnéticos	Aditivos
7	Medidores ultrasónico	Aditivos
8	Medidores de masa de Coriolis	Aditivos / extractivo
9	Medidores térmicos	Aditivos
10	Otros para ductos cerrados	Aditivos / extractivo
11	Para sólidos	Aditivos / extractivo
12	De canal abierto	Aditivos

Fuente: ENDRESS AND HAUSER. Technical information proline t-mass 65f, 65i. p.16

Cuando se extrae la energía, hay una caída de presión asociada. La mayoría de los caudalímetros entran en esta primera categoría. Cuando se añade la energía, la caída de presión, en su caso, no es más que mínima (aparte de los efectos de fricción).

El cuerpo de obstrucción o el rotor se coloca en la corriente. Estos convierten la energía potencial del flujo en energía cinética y esto se usa para inferir la velocidad de flujo. En el segundo enfoque de aditivo, la energía podría ser en forma de flujo magnético (medidor magnético), sonido (medidor de caudal por ultrasonidos), o calor (medidor de flujo de masa térmica).

Se describen algunos medidores de flujo de caudal con sus características, ventajas y desventajas, para la selección del mejor medidor que se adecua a la necesidad para tener una medida del consumo y características del aire comprimido.

2.3.1. Medidores de presión diferencial

Entre los principales tipos de medidores de presión diferencial se pueden destacar los siguientes:

- Placas de orificio
- Toberas
- Tubos Venturi
- Tubos Pitot
- Tubos Annuba
- Codos
- Medidores de área variable
- Medidores de placa

Se estima que, actualmente, al menos un 75 % de los medidores industriales en uso son dispositivos de presión diferencial, siendo el más popular la placa de orificio.

Tanto el gas y el flujo de líquido se pueden medir en las tasas de flujo volumétrico o de masa, tales como litros por segundo o kilogramos por segundo. Estas mediciones se pueden convertir entre uno y otro si se conoce la densidad del material. La densidad de un líquido es casi independiente de las condiciones de líquidos, sin embargo, este no es el caso para el gas, la densidad de los cuales depende en gran medida de la presión, la temperatura y, en menor medida, la composición del gas.

Cuando los gases o líquidos son transferidos por su contenido de energía, tales como la venta del gas natural, la velocidad de flujo también puede ser expresada en términos de flujo de energía, tales como GJ/hora o BTU/día. La tasa de flujo de energía es la tasa de flujo de volumen multiplicado por el contenido de energía por unidad de volumen o caudal másico multiplicado por el contenido de energía por unidad de masa. La mayoría de los medidores de caudal se utilizan para el cálculo de la tasa de flujo de volumen o masa, que se ajusta entonces a la tasa de flujo de energía por el uso de un ordenador de flujo.

Los gases son compresibles cuando se coloca bajo presión se calientan o se enfrían. Un volumen de gas bajo un conjunto de condiciones de presión y de temperatura no es equivalente a la misma de gas bajo diferentes condiciones. Caudal másico de gas se puede medir directamente, independientemente de los efectos de presión y temperatura, con medidores térmicos de masa de flujo, medidores de flujo másico tipo Coriolis o controladores de flujo de masa.

El medidor de flujo de turbina traduce la acción mecánica de la turbina de rotación en el flujo de líquido alrededor de un eje en una tasa legible por el usuario de flujo. La turbina tiende a tener todo el flujo de viajar alrededor de ella.

La rueda de la turbina se encuentra en el camino de una corriente de fluido. El fluido que fluye incide sobre los álabes de la turbina, impartir una fuerza a la superficie de la hoja y establecer el rotor en movimiento. Cuando se ha alcanzado una velocidad de rotación constante, la velocidad es proporcional a la velocidad del fluido.

Los medidores de flujo de turbina se utilizan para la medición de gas natural y de flujo de líquido. Los contadores de turbina son menos precisos que los de desplazamiento y los medidores de chorro con caudales bajos, pero el elemento de medición no ocupa o restringe rigurosamente toda la trayectoria del flujo.

Ventajas:

- Su sencillez de construcción, no incluyendo partes móviles
- Su funcionamiento se comprende con facilidad
- No son caros, particularmente si se instalan en grandes tuberías y se comparan con otros medidores
- Pueden utilizarse para la mayoría de los fluidos
- Hay abundantes publicaciones sobre sus diferentes usos

Desventajas:

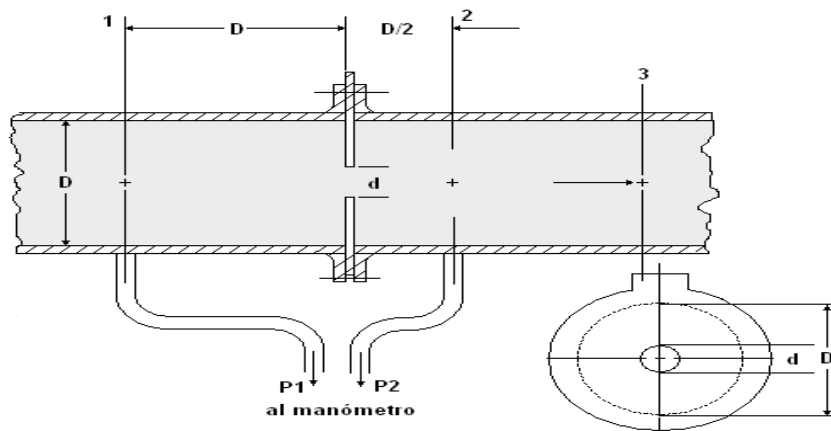
- Pueden producir pérdidas de carga significativas.
- La amplitud del campo de medida es menor que para la mayoría de los otros tipos de medidores.

- La señal de salida no es lineal con el caudal.
- Pueden producirse efectos de envejecimiento, es decir, acumulación de depósitos o la erosión de las aristas vivas.
- La precisión suele ser menor que la de medidores más modernos, especialmente si, como es habitual, el medidor se entrega sin calibrar.

2.3.2. Placas de orificio

Cuando una placa se coloca en forma concéntrica dentro de una tubería, esta provoca que el flujo se contraiga de repente conforme se aproxima al orificio y después se expande de repente al diámetro total de la tubería. La corriente que fluye a través del orificio forma una vena contracta y la rápida velocidad del flujo resulta en una disminución de presión hacia abajo desde el orificio.

Figura 3. Caudalímetro de placas de orificio



Fuente: STAUSS, Thomas. *Flow handbook*. p. 57.

2.3.3. Boquilla o tobera de flujo

Es una contracción gradual de la corriente de flujo seguida de una sección cilíndrica recta y corta.

Figura 4. Caudalímetro de tobera

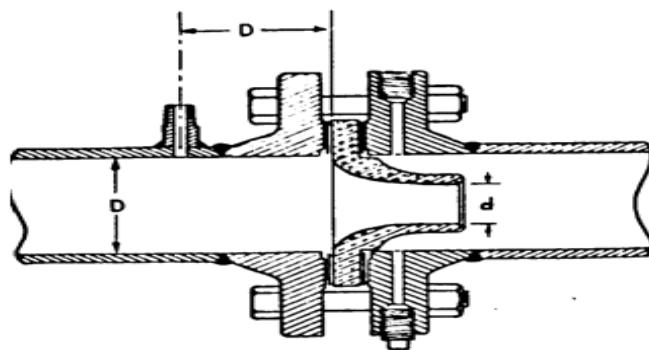


Fig. B1699

Fuente: STAUSS, Thomas. *Flow handbook*. p. 59.

Ventajas:

- Universal, adecuado para aplicaciones con líquidos, gases y vapor.
- Excelente método, encima de procesos de extrema presión (arriba de los 400 bar / 5800 psi y arriba de 1000 °C / 1800 °F).
- Transmisores de presión diferencial se pueden relanzar sin necesidad de parar el proceso.
- Elementos primarios robustos, porque todo lo mecánico no tiene partes móviles.

Desventajas:

- Adecuado para fluidos de baja viscosidad arriba de los 50 mPas, exceptuando cuando el diseño del plato es especial.
- Cuando se utiliza para medir flujo de gas, las condiciones del proceso (presión, temperatura) debe ser lo más constante posible.
- Pequeños ciclos de medida no son posibles (ciclos menos de un minuto).
- Para versiones remotas, el sistema de medición puede ser posible que necesite válvulas adicionales y líneas de impulso.

2.3.4. Medidores de área variable

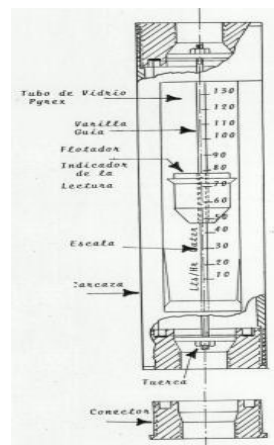
Los medidores de caudal por área variable utilizan el mismo principio de medida que los medidores por presión diferencial, es decir, la relación entre la energía cinética y la energía debida a la presión.

En estos instrumentos el área de la restricción cambia al mismo tiempo que el caudal, permaneciendo constante la presión diferencial. El instrumento de área variable por excelencia es el rotámetro, el cual consta básicamente de un tubo vertical troncocónico, de cristal o con armadura metálica, en cuyo interior se encuentra un flotador. El fluido entra por la parte inferior del tubo, arrastrando el flotador en dirección ascendente. Al ascender el flotador va dejando libre un área en forma anular hasta que la fuerza producida por la presión diferencial en las caras superior e inferior del flotador se equilibra. Es por lo tanto un sistema basado en equilibrio de fuerzas.

La posición de equilibrio alcanzada por el flotador dentro del tubo es una indicación directa del caudal de paso, marcado sobre el propio tubo o armadura. Esta técnica de medición se utiliza para bajos caudales y fluidos limpios. Las precisiones para este tipo de instrumentos vienen a ser del $\pm 2\%$, por lo que no son aconsejables cuando se requieren altas precisiones, tiene alguna limitación en cuanto a instalación (montaje vertical), y habitualmente son utilizados para medidas locales. Por otra parte, son instrumentos baratos, simples, aptos para caudales pequeños y la lectura de caudal es lineal.

El Rotámetro: tiene un flotador (indicador) que se mueve libremente dentro de un tubo vertical ligeramente cónico, con el extremo angosto hacia abajo. El fluido entra por la parte inferior del tubo y hace que el flotador suba hasta que el área anular entre él y la pared del tubo sea tal, que la caída de presión de este estrechamiento sea lo suficientemente para equilibrar el peso del flotador. El tubo es de vidrio y lleva grabado una escala lineal, sobre la cual la posición del flotador indica el gasto o caudal.

Figura 5. **Caudalímetro rotámetro**



Fuente: STAUSS, Thomas. *Flow handbook*. p. 70.

Ventajas:

- Utilizable para líquidos, gas, o aplicaciones de vapor
- Método de bajo costo para medir flujos de simple diseño
- No se necesita alimentación eléctrica
- Dispositivos con mirillas permiten un proceso fácil y confiable en el lugar un control de flujo
- Baja pérdida de presión

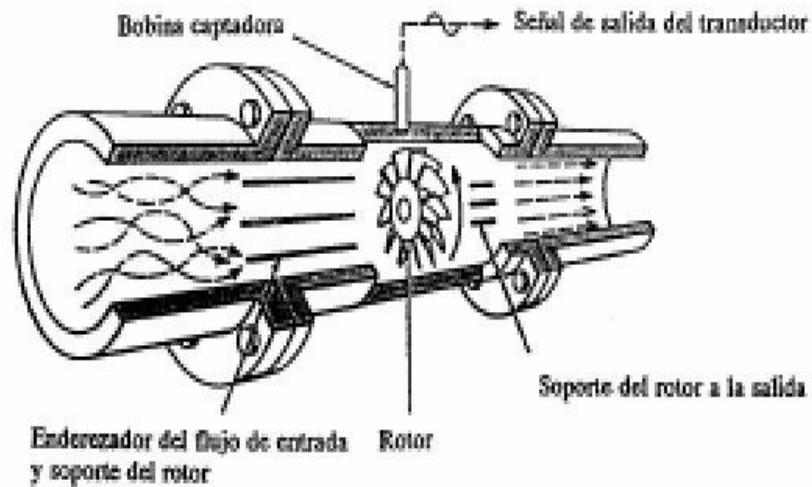
Desventajas:

- La medida depende de las condiciones del proceso y las propiedades del fluido
- Calibración necesaria para el tipo de fluido
- Cobertura limitada (máx. 10:01)
- Afectados por la materia arrastrada, no apto para líquidos con sólidos
- Se puede utilizar solo en fluidos de baja viscosidad
- Sin función de totalización
- El medidor debe ser instalado en una tubería vertical

2.3.5. Medidores de turbina

Consiste en un juego de paletas o aspas acopladas a un eje, las cuales giran cuando pasa un fluido a través de ellas. La velocidad a la cual giran estas aspas es proporcional a la velocidad del flujo, y si obtiene la velocidad y el área del conducto se puede determinar el caudal. Las turbinas deben instalarse de tal modo que no se vacíe cuando cesa el caudal, ya que el choque del agua a alta velocidad contra el medidor vacío lo dañaría seriamente.

Figura 6. **Caudalímetro de turbina**



Fuente: STAUSS, Thomas. *Flow handbook*. p. 86.

Para captar la velocidad de la turbina existen dos tipos de convertidores:

- De reluctancia: la velocidad está determinada por el paso de las palas individuales de la turbina a través del campo magnético; esta variación cambia el flujo induciendo una corriente alterna en la bobina captadora.
- Inductivo: el rotor lleva incorporados un imán permanente y el campo magnético giratorio que se origina produce una corriente alterna en una bobina captadora exterior.

Para estos dos convertidores el rotor de turbina genera la frecuencia la cual es proporcional al caudal, siendo del orden a 250 a 1200 ciclos por segundos para caudal máximo.

Ventajas:

- Excelente respetabilidad a corto plazo
- Anchos rangos y buena linealidad con algunos diseños
- Salida digital tanto de la cantidad total y el caudal
- Diseño compacto para la medición del flujo
- Gran desempeño para condiciones definidas
- Virtualmente sin límites impuestos por temperatura y presión
- Alta fiabilidad y resultados positivos en la lubricación de aplicaciones de fluidos
- No conductivos y fluidos agresivos pueden ser medidos, incluyendo gases
- Pérdidas bajas
- Excelente respuesta transitoria

Desventajas:

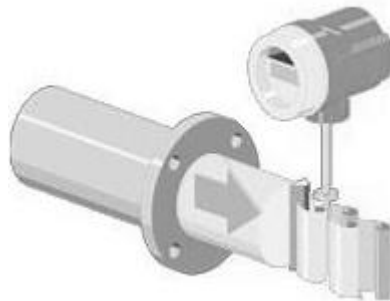
- Sus carreras de admisión tienen un largo de 20 veces el diámetro nominal y se ejecutan de salida (5 veces el diámetro nominal)
- Fácilmente es afectado por turbulencia en el flujo
- Al haber desgastes, esto causa cambios en el rendimiento y en el acortamiento de vida de la aplicación
- Tamaños pequeños limitan el rango
- Es afectado por fluidos pulsantes
- Un filtro es necesario si el líquido contiene materia arrastrada
- Es necesario que la tubería se mantenga limpia para un perfecto funcionamiento

2.3.6. Caudalímetro tipo *vortex*

Los medidores de flujo tipo *vortex*, son un tipo de sensor de flujo que mide la frecuencia de los vórtices a través de un dispositivo de farol ubicado en el caudal del flujo.

En el área del dispositivo del farol la frecuencia del vórtice es una proporción de la velocidad del flujo. Los medidores de flujo tipo *vortex* son utilizados para medir el flujo de líquidos y/o gases.

Figura 7. Caudalímetro tipo *vortex*



Fuente: STAUSS, Thomas. *Flow handbook*. p. 96.

Como se muestra en la imagen, el dispositivo con forma de farol es ubicado en el tubo. Líneas regulares de los remolinos de los vórtices se causan por la separación del flujo de un fluido sobre el dispositivo con forma de farol.

Estos vórtices se conocen como Calle de vórtices de Von Karman; este es un término utilizado en la dinámica de fluidos. En la parte posterior del dispositivo con forma de faro, las líneas del flujo del vórtice son asimétricas.

Asumiendo que f es la frecuencia de los vórtices, U es la velocidad media de la medición del fluido antes del dispositivo en forma de faro, d es el frente de amplitud del dispositivo y D es el diámetro del dispositivo del medidor, la siguiente es la ecuación:

$$f = SrU1/d = SrU/md$$

Esta ecuación se genera de la teoría de calle de vórtices de Von Karman, el cual es un patrón de vórtices en remolino que se repiten, causados por la separación inestable de la capa de fluido al pasar sobre cuerpos sumergidos.

Donde:

$U1$ = media del flujo cerca a los dos lados del dispositivo en m/s, Sr es el número de Strouhal

m = radio del área en forma de arco a los dos lados del dispositivo en forma de farol y el área del tubo

$$m = 1 - \frac{2}{\pi} \left[\frac{d}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} + \sin^{-1} \frac{d}{D} \right]$$

La ecuación del flujo de volumen (qv) en el tubo es:

$$qv = \pi D^2 U / 4 = \pi D^2 m d f / 4 Sr$$

$$K = f/qv = [\pi D^2 m d / 4 Sr]^{-1}$$

Donde:

K es el coeficiente de la medida del flujo del vórtice en P/m^3 .

Por la ecuación anterior, se conoce que las señales de frecuencia de impulso producidas por el medidor de flujo tipo *vortex* no se determinan por las propiedades de los componentes del fluido. Por lo tanto, el coeficiente solo se relaciona con el dispositivo en forma de farol y el tamaño del tubo en ciertos rangos de los números Reynolds. Sin embargo, en relación con el balance material y la medición de energía, la medición del flujo másico es requerido. En esta situación, los medidores de flujo tipo *vortex* deben monitorear simultáneamente, tanto el volumen del flujo como la densidad. La medición puede ser afectada por propiedades físicas de los componentes del fluido.

Características:

- Estructura sencilla sin partes o componentes móviles
- Fácil de instalar y de realizar mantenimiento
- Las señales de impulse son proporcionales a la velocidad del flujo
- No tiende a cero
- Chequeo: el control de un medio típico es suficiente
- El coeficiente del instrumento solo está relacionado con el dispositivo con forma de faro y el tamaño del tubo, en ciertos rangos de los números Reynolds
- Precisión: normalmente $\pm 1\%$, $\pm 0.5\%$ también está disponible
- Índice de repetición: $\pm 0.2\%$
- Razón de disminución de flujo: normalmente 10:1 y 25:1 también está disponible

Ventajas:

- Aplicación universal para medir fluidos volumétricos de vapor, líquidos y gas.
- En gran parte no son afectados por cambios en presión, temperatura y viscosidad.
- Instalación simple.
- Grandes rangos de diámetros nominales de DN 15 (1/2 pulgada) a 300 (12 pulgadas) arriba de DN 450 (18 pulgadas) por pedido.
- Gran cobertura de típicamente 1:10-01:30 de gas / vapor o 01:40 para líquidos.
- Bajas pérdidas de presión
- No posee partes móviles
- El rango de temperatura es de: -200 a +400 °C.
- La linealidad en la frecuencia de la señal de salida es independiente a las condiciones del fluido en el proceso.
- Tiene alta estabilidad a largo plazo (factor K de por vida), no hay punto cero deriva.

Desventajas:

- Flujo pulsante y remolino tienen un efecto perjudicial sobre la exactitud de medición.
- Tiempo necesario de entrada y salida se ejecuta dependiendo del tipo de montaje aguas arriba.
- No puede ser utilizado para líquidos altamente viscosos.
- Medición con bajas velocidades de flujo no son posibles ($Re < 4.000$).

2.3.7. Medidores de caudal electromagnéticos

Los medidores de caudal electromagnéticos se utilizan para medir con precisión el caudal de líquidos, lodos, pastas, aguas residuales, bebidas, productos químicos, y cada líquido con una conductividad eléctrica de por lo menos $5 \mu S/cm$. Los medidores de caudal electromagnéticos son la mejor solución para medir líquidos porque permiten tener tiempos de respuesta rápida, gran precisión de medida y un tubo de medida que no presenta alguna obstrucción al flujo del líquido por lo tanto no hay ninguna pérdida de carga en la conducta. Además, al no tener piezas móviles prácticamente no requieren mantenimiento.

Ventajas:

- El principio es virtualmente independiente de la presión del proceso, viscosidad y temperatura.
- Los fluidos con sólidos arrastrados se pueden medir

- Amplios diámetros nominales de rango están disponible: DN 2 (1/12 pulgadas) a 3000 (120 pulgadas)
- Tubo de medición sin partes móviles
- No pérdidas de presión
- No hay constricciones a afectar sección transversal del tubo
- Alto grado de medir la fiabilidad y reproducibilidad, buena estabilidad a largo plazo
- Mínima inversión para el mantenimiento y conservación

Desventajas:

- Solo líquidos conductivos pueden ser medidos.
- La medición es menos precisa y más difícil si los líquidos son débiles conductores, por ejemplo, el agua desmineralizada.
- Depósitos en el interior del tubo de medida o en los electrodos pueden causar errores.

2.3.8. Medidor de caudal ultrasónico

Consta de unas sondas que trabajan por pares, como emisor y receptor. Los hay de dos tipos:

- Doppler: miden los cambios de frecuencia causados por el flujo del líquido. Se colocan dos sensores cada uno a un lado del flujo a medir y se envía una señal de frecuencia conocida a través del líquido.

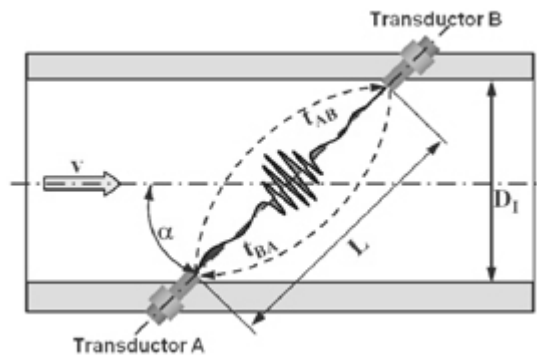
Figura 8. **Caudalímetro ultrasónico Doppler**



Fuente: STAUSS, Thomas. *Flow handbook*. p. 124.

- Tránsito: tienen transductores colocados a ambos lados del flujo. Las ondas de sonido viajan entre los dispositivos con una inclinación de 45° respecto de la dirección de flujo del líquido.

Figura 9. **Caudalímetro ultrasónico de tránsito**



Fuente: STAUSS, Thomas. *Flow handbook*. p. 124.

Ventajas:

- Puede ser usado en muy pequeños diámetros nominales (DN 15 a 4000 / ½ a 160 pulgadas)
- Fluidos extremadamente corrosivos pueden ser medidos sin contacto directo
- No hay pérdidas de presión
- Alto tiempo de vida
- Mínima constante de tiempo: 1 a 20 ms para medidores
- Los sensores ultrasónicos pueden ser retroalimentados, soldando los sensores en la tubería
- Si el fluido es homogéneo, el principio de medición es independiente a las propiedades físicas

Desventajas:

- Los resultados de la medida dependen altamente de las propiedades del flujo, porque la velocidad del fluido es medida solo en una parte pequeña del área.
- Media a baja precisión, ya que depende en gran medida de las propiedades del fluido (transparencia acústica).
- Depósitos (tubo / sensor) conducen a errores de medición y a la falla.
- El método de Doppler solo se puede usar en ciertas aplicaciones, por ejemplo para el monitoreo de flujo.

2.3.9. Caudalímetros Coriolis

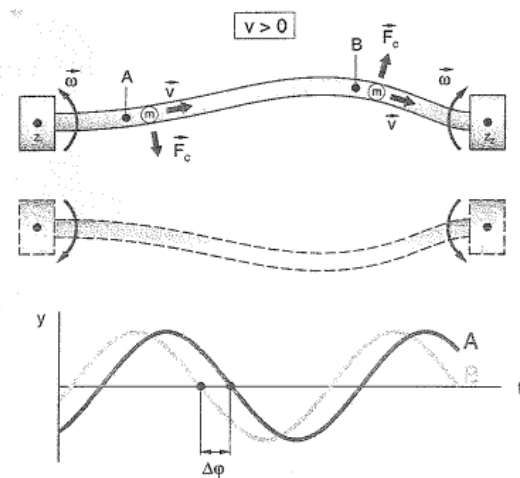
Utilizar el efecto de Coriolis que causa un tubo lateralmente vibrante para distorsionar, una medición directa de flujo de masa se puede obtener en un medidor de flujo de Coriolis. Además se obtiene una medida directa de la densidad del fluido.

La medición de Coriolis puede ser muy precisa, independientemente del tipo de gas o líquido que se mide; el mismo tubo de medición se puede utilizar para el gas de hidrógeno y betún, sin necesidad de recalibración.

Los medidores de flujo Coriolis pueden usarse para la medición de flujo de gas natural. A caudal cero, cuando el fluido está en reposo, no hay movimiento lineal. Por lo tanto, no se observan fuerzas de Coriolis.

Por el contrario, cuando la masa de fluido circula, el movimiento inducido por la oscilación (equivalente a una rotación) del tubo de medición se superpone al movimiento lineal del fluido en circulación, los efectos de la fuerza de Coriolis "retuercen" los tubos de medición y los sensores a la entrada y a la salida registran una diferencia de tiempos en este movimiento, es decir, una diferencia de fase. Cuanto mayor sea el caudal másico, mayor será la diferencia de fase.

Figura 10. Efecto Coriolis



Fuente: STAUSS, Thomas. *Flow handbook*. p. 137.

Un aspecto importante al aplicar los caudalímetros de efecto Coriolis es la posible presencia de influencias externas, como por ejemplo vibraciones de la tubería. Las vibraciones en los sistemas de tuberías suelen tener frecuencias de vibración entre 50 y 150 Hz.

Por otra parte, las frecuencias de resonancia típicas de los caudalímetros de efecto Coriolis están entre 600 y 1.000 Hz; estos caudalímetros son, por lo tanto, inmunes a las vibraciones inducidas en el sistema de esta naturaleza.

Además, por el mismo motivo, estos dispositivos de medición no necesitan ningún tipo de montaje especial inhibitor de vibraciones. Presenta las siguientes ventajas:

- Principios universales para medir flujos de líquidos y gases.

- Medidas directamente del flujo de masa (no se necesita compensación de presión y temperatura).
- La medida principal es independiente de la densidad del fluido y viscosidad.
- Muy alta precisión de medida (típicamente $\pm 0.1\%$).
- Concepto de multivariable sensor: simultáneamente se puede medir la masa del fluido, densidad y temperatura al mismo tiempo.
- No es afectado por el perfil del fluido.

Desventajas:

- Es relativamente alta la inversión inicial.
- El desembolso para la instalación puede ser considerable, dependiendo del diseño y el fabricante.
- Temperatura límite: típicamente -50 a 350 °C.
- Restringida facilidad de uso si el contenido de gas del fluido es alto en el caso de fluidos de fase múltiple.
- Tamaños más grandes son pesados en algunos diseños.

2.3.10. Medidor térmico de caudal

Los medidores térmicos de caudal usan dos técnicas para la determinación del caudal másico. La primera es la elevación de temperatura que experimenta el fluido en su paso por un cuerpo caliente y la segunda es la pérdida de calor experimentada por un cuerpo caliente inmerso en un fluido.

Sea cual sea la técnica que utilicen los caudalímetros térmicos, se basan en la general insensibilidad de los fluidos a la variación de su calor específico en función de la presión y de la temperatura, es decir, el calor específico de los fluidos se puede considerar prácticamente independiente de la presión y de la temperatura.

Según la Primera Ley de la Termodinámica, la pérdida de calor del fluido (q) es proporcional al caudal másico (m), al calor específico (c_p) y al salto térmico (DT):

$$q = m * c_p * DT$$

Si se conoce el fluido, se sabe su calor específico, el salto térmico se puede medir mediante sensores y el calor cedido es el aportado externamente para poder realizar la medición. Solo queda el caudal másico como incógnita y por tanto, se puede calcular.

Actualmente en el mercado existen una gran variedad de medidores los cuales tienen diversos principios de funcionamiento, como también diversos tipos de usos, por lo tanto de acuerdo con las necesidades se seleccionará determinado medidor.

Ventajas:

- Ancho flujo de cobertura
- No partes móviles
- Salidas directas del flujo de masa
- Pérdida de presión insignificante
- Capacidad de diseño único o multipunto, dependiendo del diseño
- Características rápidas a la respuesta al flujo
- Alta sensibilidad de la medición
- Disponible para tuberías de tamaños grandes
- Disponible para anchos rangos de temperaturas y presión

Desventajas:

- Sensibilidad a las condiciones de instalación
- Con fluidos contaminados, se requiere atención regular
- Algunos diseños son sensitivos a la composición del gas
- Estos medidores necesitan una calibración cuidadosa
- Los cambios rápidos de temperatura del proceso pueden causar diversos efectos de transferencia de calor

2.4. Señales de salida de los medidores

Los instrumentos de medición se deben apegar a estándares internacionales para procesar la información que se está obteniendo; los medidores de caudal también se apegan a este estándar; la forma más popular para transmitir señales en instrumentación industrial, es el estándar 4 a 20 miliamperios DC.

Esta es una señal estándar que significa que la señal de corriente usada es usada proporcionalmente para representar señales de medidas o salidas.

Un valor de 4 miliamperios de corriente representa 0 % de medida, y un valor de 20 miliamperios significa un 100 % de la medida, y cualquier otro valor entre 4 y 20 miliamperios representa un porcentaje entre 0 % y 100 %.

Por ejemplo, si se está calibrando un transmisor de temperatura a 4-20 mA para medir rango de 50 a 250 °C.

Por tanto, casi todos los sistemas de control usan dos diferentes señales de 4-20 mA: una para representar variables de proceso (PV) y una para representar comandos hacia un elemento final de control (la variable manipulada o MV).

Una señal 4 a 20 mA representa alguna señal en una escala de 0 a 100 en porcentaje. Usualmente, es una escala lineal. Siendo una función lineal, se puede usar la ecuación de una recta para proporcionar las señales de medidas a sus respectivos valores de corriente:

$$y = mx + b$$

Donde:

y = salida del instrumento

x = entrada del instrumento

m = pendiente de la recta

b = punto de intercepto respecto de y (por ejemplo el "live zero" cero del rango del instrumento), es decir, intercepto en el origen

Una vez determinados los valores adecuados para m y b , se utiliza esta ecuación lineal para predecir cualquier valor, para y dado un valor x , y viceversa. Esto será muy útil cuando se busque determinar el valor de señal 4-20 mA de salida de cualquier transmisor, o el caudal másico de un medidor de flujo.

Estos instrumentos de medición también traen opción para realizar la lectura a través de impulsos, los contadores de impulsos se utilizan para el registro y la visualización de impulsos y frecuencia. Así los contadores de impulsos permiten el recuento de procesos determinando la frecuencia y el período. También permiten medir distancias y calcular las revoluciones de elementos rotativos. Cada impulso en el caso de los medidores de caudal representa una medida másica del flujo; a través del tiempo se pueda calcular el consumo másico.

2.5. Elección del mejor medidor para el sistema de medición

En este trabajo de investigación este es el punto medular, ya que de este instrumento de medición se deriva toda la información que se desea analizar y con base en ella realizar análisis de costos. Por ello se deben tomar en consideración varios factores para elegir el medidor más adecuado para medir el consumo del aire comprimido en la planta de producción. Se mencionarán varios parámetros que se deben considerar para tomar una decisión de qué medidor se adecua a estas necesidades:

- Rango de caudales a cubrir
- Precisión requerida (debe especificarse para todo el rango)
- Ambiente en que se realizará la medición
- Tipo de salida eléctrica requerida

- Ambiente en que se realizará la medición
- Presupuesto (debe considerarse no solo el costo del instrumento)
- Costo del instrumento en sí
- Costo de la energía necesaria para operarlo
- Costo de la instalación (adaptación de sistemas de control, paneles, etc.)
- Costo de mantenimiento
- Costo de la instrumentación asociada
- Costo de mano de obra calificada
- Tipo de fluido a medir
- Linealidad
- Velocidad de respuesta

La gran demanda ha llevado a la proliferación de caudalímetros de todo tipo y tamaño. Con tanta variedad y cantidad de proveedores, la selección se hace cada vez más difícil. La elección deberá satisfacer los requerimientos de la aplicación, performance y costo.

En esta tarea se puede emplear como referencia la información proporcionada en la norma británica BS-7405, que se basa en más de 100 diseños con más de 200 proveedores.

La norma BS-7405 empleó el principio de funcionamiento para clasificar los distintos tipos de medidores de flujo y que conformaron la base de la estructura de la norma. Para el aire comprimido es necesario conocer la temperatura del aire, ya que con ella misma se puede detectar si la calidad del aire que se está generando es buena para su utilización. El caudalímetro más utilizado para esta aplicación es el medidor másico de caudal térmico, el cual se aplicará para esta medición.

Los caudalímetros están divididos en dos grupos:

- Los de la “dispersión termal”, en donde un elemento calentado se expone al flujo. La velocidad de enfriamiento es una medida de la velocidad local y por lo tanto el flujo.
- El "tipo de perfil térmico" o "aumento de la temperatura", en donde el calor se aplica a un área limitada en el flujo. El aumento de la temperatura local y la energía adicional se utilizan para calcular el flujo másico.

De ellos el que afecta menos al flujo es el de tipo “dispersión termal”, ya que no se calienta el flujo, sino solo se introduce un objeto a cierta temperatura y conforme al cambio de la misma, se calcula el flujo másico.

Tabla V. **Medidores y sus aplicaciones**

Grupo	Tipo	APLICACIONES																	
		Líquidos (1)								Gases (2)					Otros (3)				
		A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	T
1	Orificio	•	?	•	•	•	•	•		•	?	•	•	•	?	•	?	?	?
	Venturi	•		•	•	•	•			•	?		?	?	?	•	?	?	?
	Boquilla	•		•	•	•	•			•	•	?	?	•	?	•	?	?	?
2	Área variable	•	•			#	?		•	•	•								?
	De blanco	•				#				•				•	?	•	?		
	Pitoc	•		•	•	•	?	•		•		•	•	•		•	?	?	?
	Boquilla									•	•	?	?						
3	Turbina	•		•	#	•	?	•	•	•		•				?	?	#	
	Pulsos	•	•			•		•		?	?					?		?	
	Medidor mecánico	•													#	?			
	Turbina de inserción	•		•	•	•		•		•		•	•	?		?	?		
4	<i>Vortex</i>	•				•		•	•	•		?	•	•		?			
	Tipo Co	•								•									
	<i>Vortex</i> de inserción	•		•	•	?		?	?	•		•	?	•		•		?	?

Continuación de la tabla V.

5. Vortex de inserción																				
Coriolis	•			#	•		•	?							?	?			•	
6. Rotor	•																			
An	•		?	?	#				•											
De masa térmica		#							•	•										
Adecuado, por lo general aplicable Merece considerarse, algunas veces aplicable Merece considerarse, disponibilidad limitada o caro El espacio en blanco indica no adecuado o no aplicable	(2) Aplicaciones con gases J Gases en general K Flujos reducido des gas (<150 m³/hora) L Grandes flujos de gases (>5000m³/hora) M Gases calientes (> 200 °C) N Vapor																			
1. Aplicaciones para líquidos A: Líquidos en general (< 50 cP) B: Flujos Reducidos de líquidos (< 2 L/min) C. Grados flujos de líquido (> 1000 m³ hora) D. Generador tubería con agua (>500 mm de diámetro) E. Líquidos calientes (> 200°C) F. Líquidos viscosos (> 50 cP) G. Líquidos criogénicos H. Líquidos sanitarios	(3) Otras aplicaciones P. Suspensiones y flujos de partículas Q. Mezclas líquido-líquido R. Mezclas líquido-gas S. Líquidos corrosivos gases T. Corrosivos																			

Fuente: www.herrera.unt.edu.ar. Consulta: marzo de 2014.

Una vez definido el tipo de medidor se toman los parámetros necesarios para seleccionar el medidor adecuado; estos parámetros fueron recopilados en la planta de producción:

Tabla VI. **Tabla de datos para el medidor**

Parámetro	Dato
Tipo de gas	Aire
Presión del proceso	1.01325 bar a
Forma de tubería	Circular
Diámetro Interno	177.75 mm

Continuación de la tabla VI.

Asignación de salida de corriente	Caudal másico
4 Valor mA	0 kg/h
20 Valor mA	10300 kg/h
Valor por pulso	100 kg
Ancho de pulso	20 ms

Fuente: datos proporcionados en la empresa FritoLay.

2.6. PLC y módulos

Por último, se necesita una forma de interpretar los datos obtenidos del medidor hacia el sistema de medición; para ello es necesario utilizar un PLC, el cual se encargará de medir y enviar la información hacia la red de almacenamiento de datos y monitoreo.

El PLC a utilizar es un plc de la familia *control logix*; estos PLC cuentan con módulos necesarios para leer la red de comunicación de los dispositivos y se pueden utilizar no solo para este medidor sino para todo el sistema de medición.

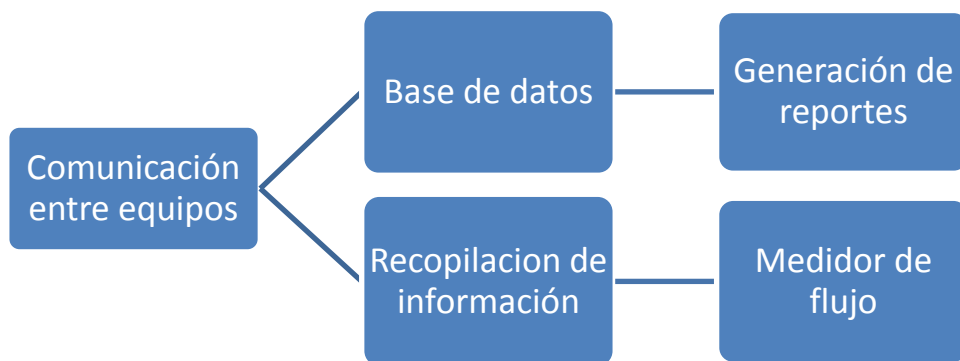
3. DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE VARIABLES EN LA GENERACIÓN Y CONSUMO DE AIRE COMPRIMIDO

Realizar la medida de consumo del aire comprimido es vital para el control del proceso, ya que por medio de este se pueden detectar las fugas en el sistema y calcular consumos en la producción; por ello es necesario crear un sistema de medición que capture datos de consumo de aire para determinar su costo de producción.

3.1. Diagrama en bloques del sistema de medición

El sistema de medición está compuesto por varias partes; cada una es importante para el resultado final de la medición. Dichas partes mantienen una comunicación activa por protocolos de comunicación de redes industriales, de los cuales pueden mencionarse los que se utilizarán en el sistema de medición.

Figura 11. Diagrama en bloques del sistema de medición



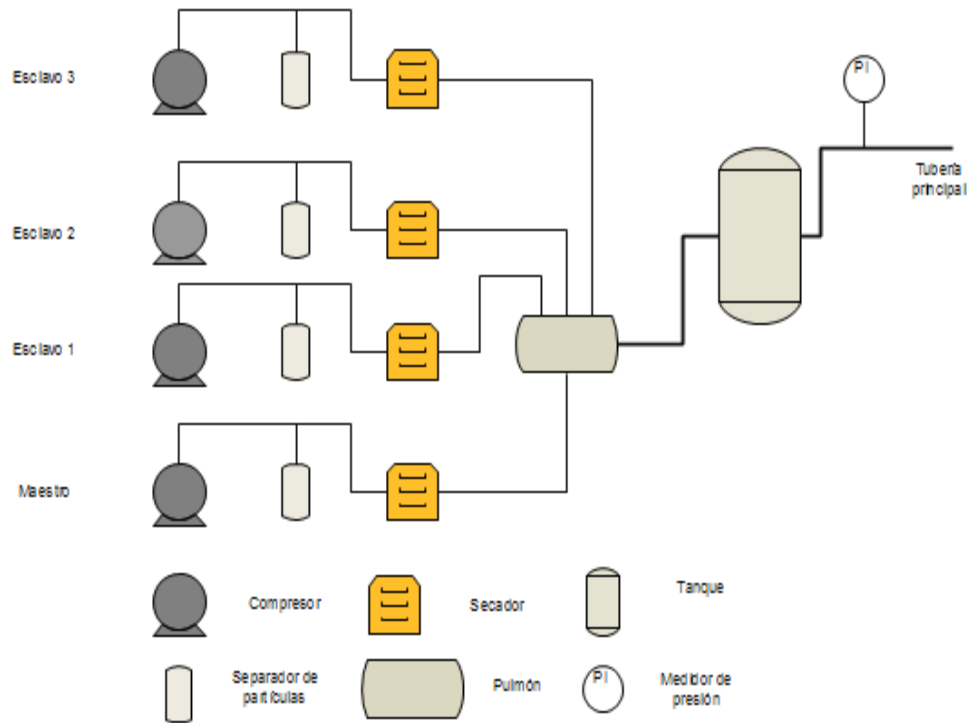
Fuente: elaboración propia.

- Medidor de flujo: en este bloque del sistema se coloca el medidor principal, con el cual se recopilará la información del consumo de aire comprimido en la planta de producción; este se coloca en la tubería principal que alimenta todo el sistema de aire comprimido.
- Recopilación de datos: en este bloque se configura e instala el software adecuado para la obtención de datos del medidor.
- Comunicación entre equipos: aquí se configura y realiza la instalación del protocolo de comunicación industrial para la interrelación entre los dispositivos.
- Base de datos: se configura el almacenamiento de datos de las variables a medir.
- Generación de reportes: se configuran los reportes del consumo del aire comprimido cada día con el consumo diario, cada semana con el promedio semanal y cada mes con el promedio mensual.

3.2. Diagrama del sistema de generación de aire comprimido

El sistema de aire comprimido es el encargado de mantener el suministro del mismo para la planta de producción; este sistema consta de un sistema automatizado de 4 líneas de generación de aire comprimido, el cual mantiene la presión de aire en el sistema.

Figura 12. Diagrama del sistema de aire comprimido



Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, el sistema genera el aire comprimido y lo trata para entregar un aire que llene los estándares para la utilización en los sistemas neumáticos y que no contenga partículas. La automatización del sistema consta de un sistema maestro y esclavos; el sistema maestro controla los esclavos dependiendo de la demanda que tenga la planta; dicha demanda es medida conforme al cambio de presión en el tanque de aire, el cual es un medidor *honeywell pressuretrol*; este tiene un rango de 0 a 160 psi y una salida de 4 a 20 mA, la cual es monitoreada por el sistema maestro; el sistema se debe mantener presurizado a 100 psi.

El sistema maestro es el que se mantiene trabajando y si detecta que la demanda es mayor a la capacidad que la que él puede proveer, arranca el sistema esclavo 1, y así sucesivamente con los otros sistemas esclavos, hasta mantener la presión estable.

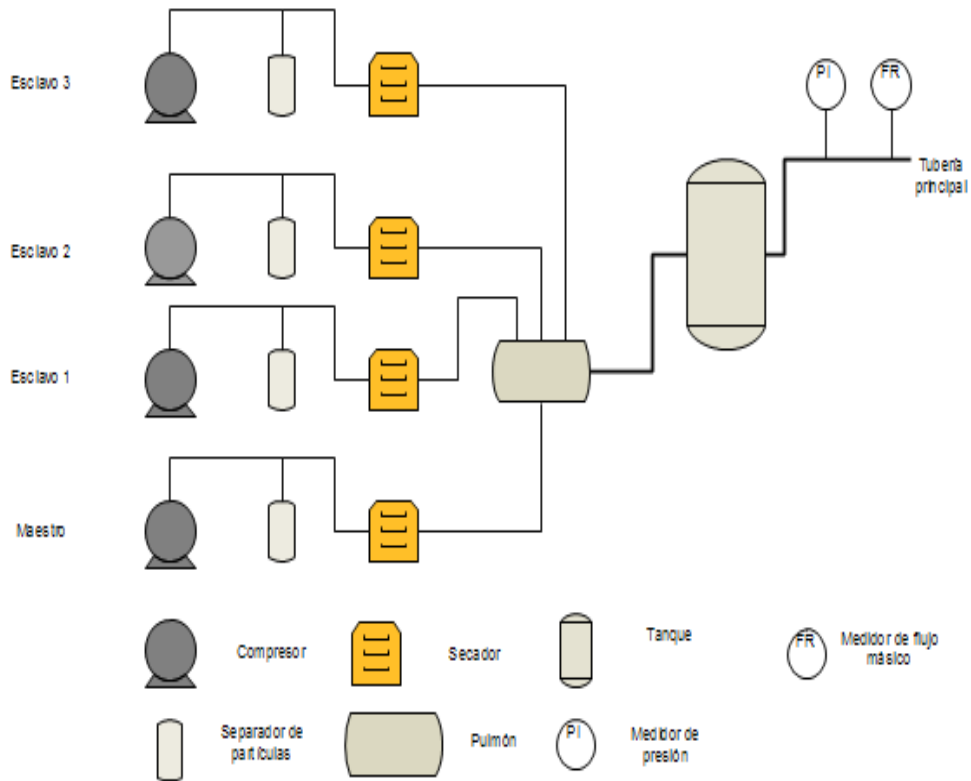
Este sistema es de mucha utilidad, ya que no se mantienen operando los 4 sistemas y así ahorra el consumo de energía; el problema radica si el sistema arranca los esclavos muchas veces por consumos en pérdidas de aire; es aquí donde se ve la necesidad de conocer el consumo de aire, o el flujo másico del aire comprimido en la planta para diagnosticar las pérdidas y repararlas a tiempo, ya que si existen fugas, estas se ven reflejadas en una gran cantidad de dinero, como se verá en el capítulo 5 en el estudio de costos.

3.3. Instalación del medidor principal de flujo de aire

El medidor principal de flujo másico se debe instalar en la salida principal del sistema, ya que este se encargará de medir la demanda de aire comprimido en volumen de la planta de producción; para ello se debe conocer el diámetro de la tubería y el instrumento que se va a utilizar para realizar esta medición.

Como se muestra en el diagrama siguiente, este debe ser colocado en la salida del sistema de donde se alimenta la tubería principal de la planta de producción.

Figura 13. **Sistema de aire comprimido con medidor de flujo másico**



Fuente: elaboración propia.

Este medidor en particular es de inserción en la tubería, es decir no es necesario cortar la tubería para ser instalado, solo se debe realizar una perforación. El diámetro de la tubería es de 177.75 mm, la cual se debe tomar en consideración para el medidor, ya que la varilla de inserción debe ser mayor a este diámetro para que pueda ser insertado en la tubería. Una de las empresas líderes en la fabricación de estos medidores es *Endress and Hauser*; se utilizará el medidor de caudal másico térmico 65I t de masa, con las características que se describen en la tabla siguiente.

Tabla VII. **Características del medidor de flujo másico térmico**

Característica	Descripción
Longitud de inserción	235 mm
Material del sensor	Acero inoxidable
Conexión a la tubería	Rosca americana para tubos ANSI de acero inoxidable
Calibración	Calibrada de fábrica
Entrada de cables	Rosca NPT ½
Voltaje de operación	20 a 55 VAC/ 16-62 VDC
Señal de salida	4 a 20 mA, Hart
Idioma	Inglés.
Presión del proceso	1,0132 bares
Tipo de tubería	Circular
Diámetro de la tubería	177.75 mm.
Tipo de gas	Aire.
Asignación de la línea 1	Caudal másico
Asignación de la línea 2	Totalizador.
Asignación del contador 1	Caudal másico
Unidad del contador 1	KG
Asignación de salida de corriente	Caudal másico
Valor a 20 mA	7500 kg/h
Valor del pulso	100 kg
Ancho del pulso	20 ms

Fuente: ENDRESS AND HAUSER. Technical information proline t-mass 65f, 65i. p.3.

La medición se realiza a través de un instrumento de inserción, el cual físicamente tiene la siguiente forma:

Figura 14. **Medidor térmico**

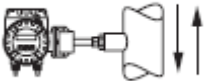




Fuente: STAUSS, Thomas. *Flow handbook*. p.151.

Se debe tomar en cuenta la orientación de instalación del medidor de flujo, que generalmente se puede instalar en cualquier posición en la tubería. En el caso de gases húmedos, el flujo ascendente se prefiere en tubos verticales para minimizar la condensación/contaminación en o alrededor del elemento de detección.

En particular, cuando se puede producir condensación libre (por ejemplo, biogás), el sensor debe orientarse a impedir la recolección de agua en/o alrededor de los elementos de detección (por ejemplo, no instalar el sensor en un punto bajo en la instalación sin un drenaje adecuado). Se debe asegurar de que la dirección de la flecha en el sensor coincida con la dirección del flujo (dirección del flujo de fluido a través de la tubería).

Tabla VIII. **Instalación del medidor**

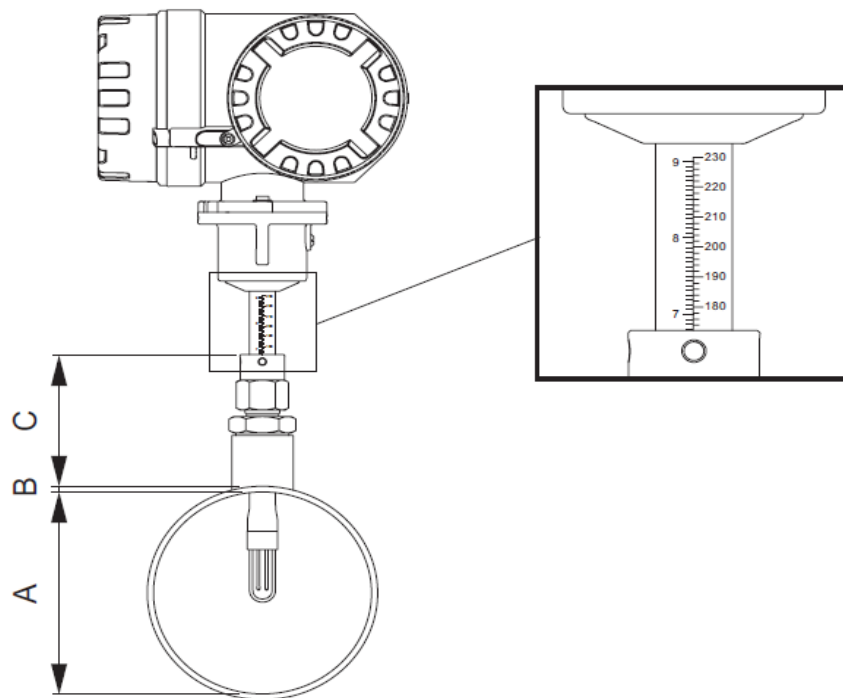
Orientación del medidor	Descripción
<p data-bbox="483 470 597 506">Vertical:</p> 	<p data-bbox="769 470 1266 558">No recomendado si existe mucha vibración en la tubería</p>
<p data-bbox="464 753 613 789">Horizontal:</p> 	<p data-bbox="954 753 1159 789">Recomendado</p>
<p data-bbox="464 1106 613 1142">Horizontal:</p> 	<p data-bbox="935 1106 1179 1142">No recomendado</p>

Fuente: ENDRESS AND HAUSER. Technical information proline t-mass 65f, 65i. p.10

En la inserción del instrumento deben tomarse en cuenta tres dimensiones, para permitir que la longitud de inserción sea correcta:

- A = diámetro interno de la tubería circular o para un conducto rectangular, la altura del conducto si el sensor es para ser montado verticalmente o anchura del conducto si es para ser montado horizontalmente.
- B = espesor de la pared de la tubería.
- C = altura del cubo de montaje en la tubería o conducto incluyendo el sensor apropiado y fría del grifo caliente / caso de llevarla.

Figura 15. **Dimensiones para el cálculo de inserción**



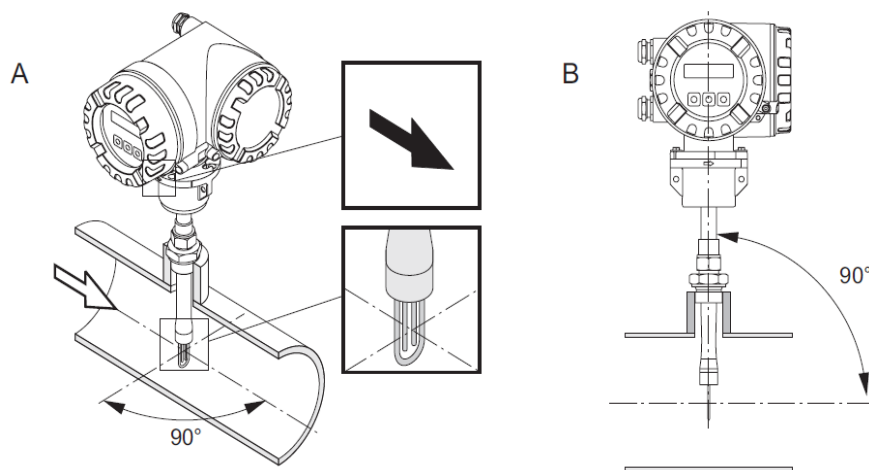
Fuente: ENDRESS AND HAUSER. Technical Information Proline t-mass 65F. p. 16.

Es importante que la saliente del montaje del sensor esté soldada a la tubería o conducto, de tal manera que el sensor quede montado en 90 grados a la dirección de flujo. Cualquier desviación de este ángulo en cualquier plano puede causar perturbaciones del flujo alrededor del punto de medición, y dar origen a algunos errores. Es muy importante que el sensor esté correctamente alineado con la dirección del flujo. Hay dos guías para la alineación correcta:

- Las flechas en los lados del conjunto de carcasa del sensor están apuntando en la misma dirección que el flujo.
- La escala graduada en la sección del tubo de inserción debe estar alineada directamente arriba de la dirección del flujo.

Para garantizar una exposición óptima de los transductores de medición de la corriente de gas que fluye, el sensor no se debe girar más de 7 grados de esta alineación.

Figura 16. **Alineación del medidor**

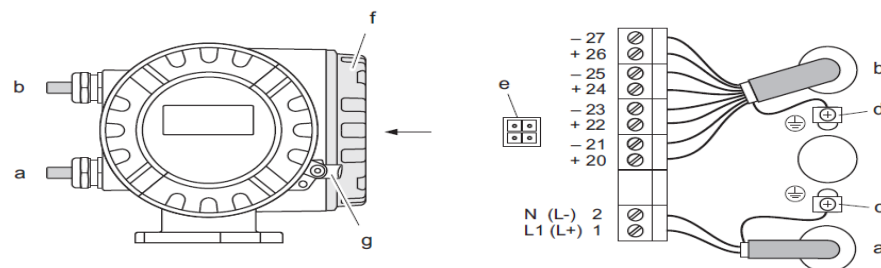


Fuente: ENDRESS AND HAUSER. Technical Information Proline t-mass 65F. p.16.

Además de la instalación física se debe contemplar cómo se va conectar el instrumento y lo que necesita para trabajar y captar los datos. Se utiliza comunicación HART la cual se describe en la sección de comunicación de dispositivos. Para conectar el dispositivo se deben seguir los siguientes pasos:

- Desatornillar la tapa del compartimento de conexión (f) de la carcasa del transmisor;
- Introducir el cable de alimentación (a) y el de señal (b) a través de las entradas de los cables adecuados;
- Conectar el cable de comunicación HART al conector HART en el blanco para (+), negro (-) en los pines 26, 27 del conector;
- Para AC instrumentos alimentados, conectar el cable de CA al conector de alimentación (como se muestra), negro (pin 1), blanco (pin 2);
- Tapar el compartimento de conexión (f) de nuevo en la caja del transmisor.

Figura 17. **Conexión del medidor**



Fuente: ENDRESS AND HAUSER. Technical Information Proline t-mass 65F. p. 7.

Tabla IX. **Descripción de las partes de la conexión**

Ítem	Descripción
a	Cable de poder: 85 a 260 V AC, 25 a 55 V AC, 16 a 62 V DC Terminal No. 1: L1 para AC, L+ para DC Terminal No. 2: N para AC, L- para DC
b	Cable de señal: Terminales de la 20 a la 27
c	Tierra física
d	Tierra o terminal del blindaje del cable
e	Conector para servicio interface FXA193
f	Cobertor de compartimiento de conexión
g	Abrazadera de seguridad

Fuente: ENDRESS AND HAUSER. Technical Information Proline t-mass 65F. p.7.

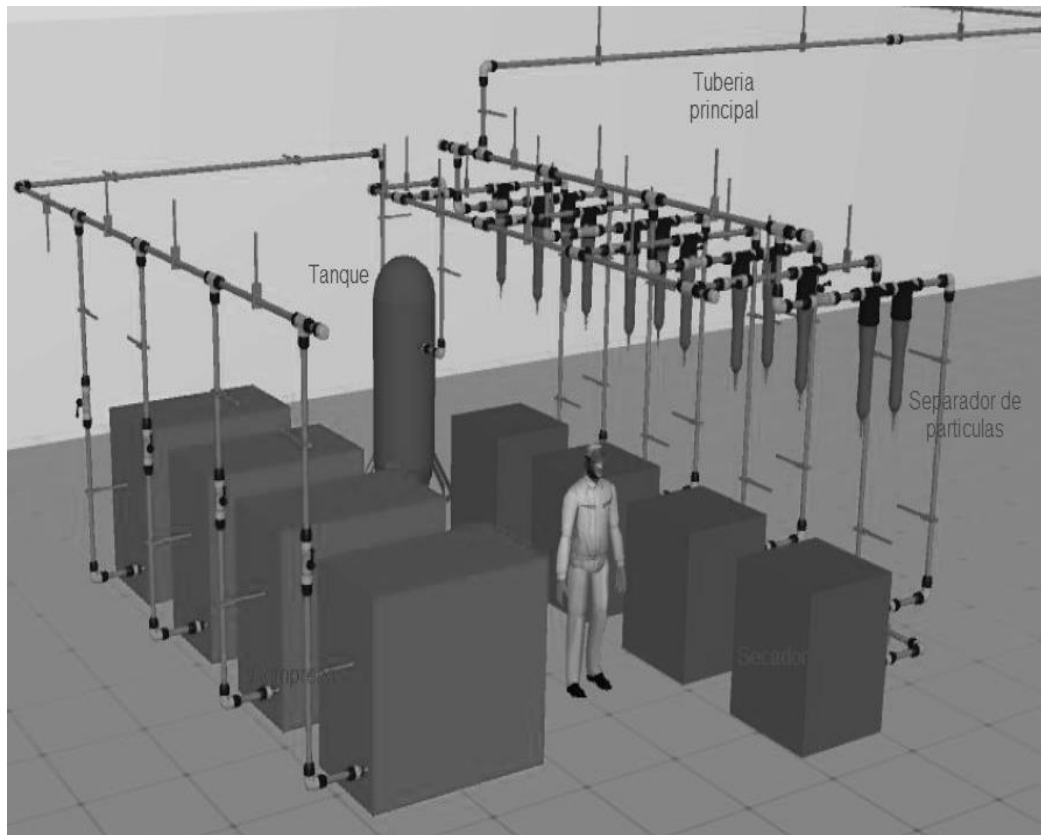
3.4. Diagrama de la tubería de aire comprimido

La planta de producción consta con una tubería de presión principal por la cual pasa todo el flujo de aire comprimido y es la encargada de suministrarlo a una segunda red de aire comprimido; la idea de tener dos circuitos de tuberías es mantener aire comprimido en todas las máquinas sin importar que se tenga que dar mantenimiento a algún tramo de la tubería, ya que si se cierra este tramo por algún mantenimiento, se podrá tener otra ruta por donde se obtenga la presión necesaria.

De la tubería de aire comprimido se derivan varias conexiones, las cuales se utilizan para varias aplicaciones: herramientas neumáticas, válvulas neumáticas, pistones neumáticos, etc.

La aplicación principal de la tubería del aire comprimido es mantener en funcionamiento las máquinas para su operación y que componen las líneas de producción. La tubería principal inicia en el cuarto de máquinas donde se encuentran los generadores y los secadores del aire comprimido; es importante tener en cuenta cómo se encuentra instalada esta tubería, ya que de ella depende la instalación del medidor de flujo másico. A continuación se muestra una gráfica de la instalación de la tubería del cuarto de máquinas.

Figura 18. **Tubería de aire comprimido**

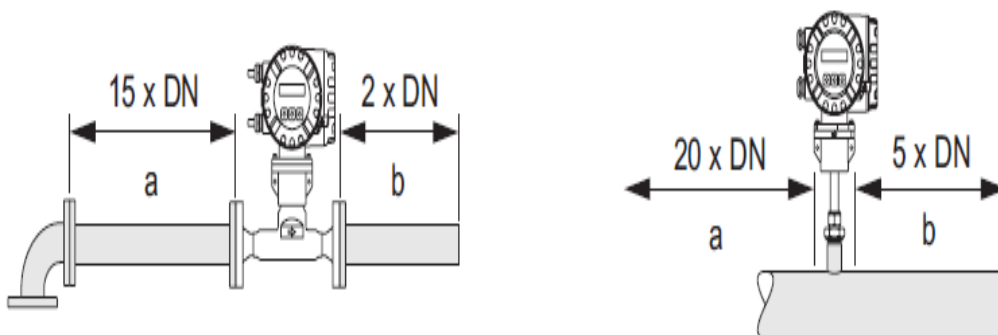


Fuente: archivos de Frito Lay.

Se debe tomar en cuenta la distancia y posición que se debe colocar el medidor del flujo másico; como se vio en el anterior inciso se recomienda colocar el medidor en la parte de la tubería que está horizontal; también existen las medidas mínimas para la colocación del medidor, las cuales se describen a continuación.

Según se observa, el medidor se debe colocar después de una vuelta; se recomienda dejar una distancia mínima de $20 \times \text{DN}$ antes de colocar el medidor de inserción y $5 \times \text{DN}$ después del medidor de inserción. DN es el diámetro nominal de la tubería.

Figura 19. **Distancias mínimas recomendadas para la instalación del medidor**



Fuente: ENDRESS AND HAUSER. Technical Information Proline t-mass 65F. p. 12.

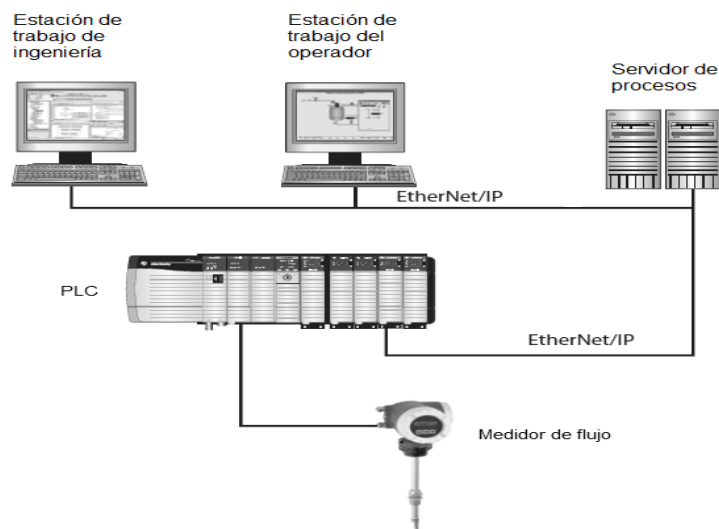
En el presente caso el diámetro de la tubería es de 177.75 mm; se puede calcular que $a = 20 \times (177.75 \text{ mm}) = 3555 \text{ mm}$ o 355 cm como mínimo, antes de colocar el medidor y después, $b = 5 \times (177.75 \text{ mm}) = 888.75 \text{ mm}$ o 88.875 cm. Este trayecto de la tubería no se debe ver afectado por ningún tipo de accesorio, ya que si existe algún accesorio la medición puede ser errónea.

3.5. Comunicación entre dispositivos

Existen varias tecnologías para la comunicación de los dispositivos de campo como los medidores de flujo y sensores; cada protocolo de comunicación tiene sus ventajas y desventajas; se mencionarán algunos de los protocolos de comunicación que soportan estos dispositivos, así como el que se utiliza para cada parte del sistema. El sistema se compone de las siguientes partes:

- El medidor de flujo
- PLC para la captación de los datos
- Servidor de procesos
- Estación de trabajo del operador
- Estación de trabajo de ingeniería

Figura 20. Diagrama de comunicación del sistema de medición



Fuente: elaboración propia, con programa rsview de rockwell.

La comunicación entre el dispositivo medidor de flujo y el PLC se realiza por medio de protocolos de comunicación conocidos como redes de campo; los buses de datos que permiten la integración de equipos para la medición y control de variables de proceso reciben la denominación genérica de buses de campo, los cuales se utilizan para comunicar dispositivos industriales entre sí. Un bus de campo es un sistema de transmisión de información (datos) que simplifica enormemente la instalación y operación de máquinas y equipamientos industriales utilizados en procesos de producción.

El objetivo de un bus de campo es sustituir las conexiones punto a punto entre los elementos de campo y el equipo de control a través del tradicional lazo de corriente de 4 -20 mA o 0 a 10 VDC, según corresponda. Generalmente son redes digitales, bidireccionales y multipunto, montadas sobre un bus serie que conecta dispositivos de campo como PLC's, transductores, actuadores, sensores y equipos de supervisión. Según el entorno donde serán instaladas, en un ámbito industrial existen varios tipos de redes:

- Red de factoría: para redes de oficina, contabilidad y administración, ventas, gestión de pedidos, almacén, etc. El volumen de información intercambiada es muy alto, y los tiempos de respuesta no son críticos.
- Red de planta: sirve para interconectar módulos y células de fabricación entre sí y con departamentos como diseño o planificación. Suele emplearse para el enlace entre las funciones de ingeniería y planificación, con las de control de producción en planta y la secuencia de operaciones. Estas redes deben manejar mensajes de cualquier tamaño, gestionar eficazmente errores de transmisión (detectar y corregir), cubrir áreas extensas (puede llegar a varios kilómetros), gestionar mensajes con prioridades (gestión de emergencias frente a transferencia de ficheros

CAD/CAM), y disponer de amplio ancho de banda para admitir datos de otras subredes como voz, vídeo, etc.

- Red de célula: se utiliza para interconectar dispositivos de fabricación que operan en modo secuencial como *robots*, máquinas de control numérico (CNC), autómatas programables (PLC) y vehículos de guiado automático (AGV). Las características deseables en estas redes son: la eficiencia en la gestión de mensajes cortos, capacidad de manejar tráfico de eventos discretos, mecanismos de control de error (detectar y corregir), posibilidad de transmitir mensajes prioritarios, bajo coste de instalación y de conexión por nodo, recuperación rápida ante eventos anormales en la red y alta fiabilidad.
- Bus de campo: sirve para sustituir cableado entre sensores actuadores y los correspondientes elementos de control. Este tipo de bus debe ser de bajo coste y tiempo real, y permitir la transmisión serie sobre un bus digital de datos con capacidad de interconectar controladores con todo tipo de dispositivos de entrada-salida, sencillos, y permitir controladores esclavos inteligentes. Además, deben gestionar mensajes cortos eficientemente, tener capacidad de manejar tráfico de eventos discretos, poseer mecanismos de control de error (detección y corrección), transmitir mensajes prioritarios, tener un bajo coste de instalación y de conexión por nodo, poder recuperarse rápidamente de eventos anormales en la red y responder rápidamente a los mensajes recibidos.

Por regla general, tienen un tamaño pequeño (5 a 50 nodos), utilizan tráfico de mensajes cortos para control y sincronización entre los dispositivos, y la transferencia de ficheros es ocasional o inexistente. Según la cantidad de datos a transmitir, se dividen en: buses de alto nivel,

buses de dispositivos (unos pocos *bytes* a transmitir) y bus actuador/sensor (se transmiten datos a nivel de bit), pero en ningún caso llegan a transmitir grandes bloques de información.

Para la conexión del medidor de flujo volumétrico se necesita un bus de campo, de los que existen varios con diferentes aplicaciones:

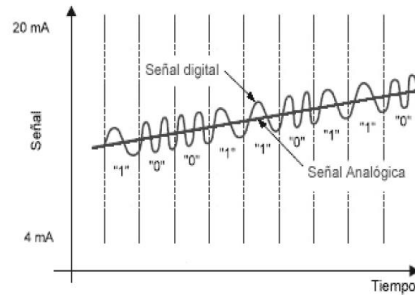
- HART
- Profibus
- Foundation Fieldbus
- Modbus
- Devicenet

3.5.1. Hart

El protocolo HART (High way-Addressable-Remote-Transducer) agrupa la información digital sobre la señal analógica típica de 4 a 20 mA DC. La señal digital usa dos frecuencias individuales de 1200 y 2200 Hz, que representan los dígitos 1 y 0, respectivamente, y que en conjunto forman una onda sinusoidal que se superpone al lazo de corriente de 4-20 mA.

Como la señal promedio de una onda sinusoidal es cero, no se añade ningún componente DC a la señal analógica de 4-20 mA., lo que permite continuar utilizando la variación analógica para el control del proceso.

Figura 21. **Señal Hart**



Fuente: www.hartcomm.org. Consulta: febrero de 2014.

3.5.2. Profibus

(Process Field Bus). Norma internacional de bus de campo de alta velocidad para control de procesos normalizada en Europa por EN 50170.

Existen tres perfiles:

- Profibus DP (*decentralized periphery*). Orientado a sensores/actuadores enlazados a procesadores (PLCs) o terminales.
- Profibus PA (*process automation*). Para control de proceso; cumple normas especiales de seguridad para la industria química (IEC 11 15 8-2, seguridad intrínseca).
- Profibus FMS (*fieldbus message specification*). Para comunicación entre células de proceso o equipos de automatización.

3.5.3. Foundation Fieldbus

Foundation Fieldbus (FF) es un protocolo de comunicación digital para redes industriales, específicamente utilizado en aplicaciones de control distribuido. Puede comunicar grandes volúmenes de información, ideal para aplicaciones con varios lazos complejos de control de procesos y automatización. Está orientado principalmente a la interconexión de dispositivos en industrias de proceso continuo. Los dispositivos de campo son alimentados a través del bus Fieldbus cuando la potencia requerida para el funcionamiento lo permite.

3.5.4. Modbus

Es un protocolo de transmisión para sistemas de control y supervisión de procesos (SCADA) con control centralizado; puede comunicarse con una o varias estaciones remotas (RTU) con la finalidad de obtener datos de campo para la supervisión y control de un proceso. Las Interfaces de capa física pueden estar configuradas en: RS-232, RS-422, RS-485. En Modbus los datos pueden intercambiarse en dos modos de transmisión:

- Modo RTU
- Modo ASCII

3.5.5. Devicenet

Red de bajo nivel adecuada para conectar dispositivos simples como sensores fotoeléctricos y magnéticos, pulsadores, etc. y dispositivos de alto nivel (PLC, controladores, computadores, HMI, entre otros).

Provee información adicional sobre el estado de la red, cuyos datos serán desplegados en la interfaz del usuario.

Tabla X. **Características de los protocolos de comunicación industrial**

Nombre	Topología	Soporte	Máximo de dispositivos	Rate transm. bps	Distancia max Km	Comunicación
Profibus DP	Línea, estrella y anillo	Par trenzado fibra óptica	127/segm	Hasta 1.5M y 12M	0.1 segm 24 fibra	Maestro/esclavo, punto a punto
Foundation Fieldbus HSE	Estrella	Par trenzado fibra óptica	240 p/segm 32.768 sist	100M	0.1 par 2 fibra	Individual/ Multimaestro
Foundation Fieldbus H1	Estrella o bus	Par trenzado fibra óptica	240 p/segm 32.768 sist	31.25K	1.9 cable	Individual/ Multimaestro
Interbus-S	Segmentado	Par trenzado fibra óptica	256 nodos	500K	400/segm 12.8 total	Maestro/esclavo
DeviceNet	Troncal/puntual c/bifurcación	Par trenzado fibra óptica	2048 nodos	500K	0.5 6 c/repetid	Maestro/esclavo, multimaestro, punto a punto
Modbus RTU	Línea, estrella, árbol, red con segmentos	Par trenzado coaxial radio	250 p/segm	1.2 a 115.2K	0.35	Maestro/esclavo
Ethernet Industrial	Bus, estrella, malla-cadena	Coaxial par trenzado fibra óptica	400 p/segm	10, 100M	0.1 100 mono c/switch	Maestro/esclavo, punto a punto
HART		Par trenzado	15 p/segm	1.2K		Maestro/Esclavo

Fuente: www.aie.cl. Consulta: febrero de 2014.

El sistema a utilizar para la comunicación del medidor de flujo hacia el PLC es HART; el cual transmite los datos de 4 a 20 mA en forma digital; solo utiliza un par trenzado y trabaja como maestro/esclavo; este da gran facilidad de crecimiento si en el futuro se desean instalar nuevos medidores. Para la red de planta o donde se encuentra el servidor cuando se almacenan los datos, el equipo del operador y la estación de trabajo de ingeniería, se usa una red informática por medio de los protocolos Ethernet/ip.

Las redes Ethernet/ip para la industria funcionan de la misma manera que las redes LAN, con los mismos protocolos, por lo que se utilizan las tarjetas de la red de los equipos; para interconectarlos se emplean *switches* de datos, *routers* y dispositivos de seguridad como en una red IT, por lo que se debe plantear un segmento de red para la comunicación de los dispositivos, así como las direcciones IP para cada equipo; se trabaja con una red IP 192.168.1.0/24, la cual permite interconectar 254 equipos en esta red; se deja de este tamaño por si se quisiera agregar nuevos dispositivos a la red Ethernet. Las direcciones IP se definen de la siguiente forma:

Tabla XI. **Direcciones IP de la red Ethernet**

Dispositivo	Dirección IP
192.168.1.0	Dirección de la red
192.168.1.1	Reservado para Gateway
192.168.1.2	Servidor de procesos
192.168.1.3	PLC
192.168.1.4	Estación de trabajo del operador
192.168.1.5	Estación de trabajo de Ingeniería

Fuente: elaboración propia.

3.6. Programación del PLC para la captura de información

El PLC es de la marca Allen Bradley de la familia ControlLogix; este es un controlador de alto rendimiento modular, que utiliza el software de programación RSLogix 5000 para configurar, programar y monitorear un sistema; este PLC es el que se usa en la planta para todos los medidores que se encuentran en ella.

Se utiliza un módulo HART para tender el par trenzado para la conexión del medidor. Se emplea un módulo Ethernet para la comunicación entre el PLC, el servidor de procesos, la estación de trabajo del operador y la estación de trabajo de ingeniería. Se describen los componentes del PLC de la siguiente forma:

Tabla XII. **Módulos del PLC**

Componente	Número de catálogo
Controlador ControlLogix	1756-L63 series B
Módulo de entrada Hart	1756-IF8H
Módulo de comunicación Ethernet	1756-ENBT

Fuente: elaboración propia.

Con estos módulos que tenga el PLC, se puede iniciar la configuración para la lectura de los datos del medidor de flujo; para ello se necesita instalar el software de comunicación en la PC, destinado para la configuración del PLC.

3.6.1. Software de comunicación del PLC

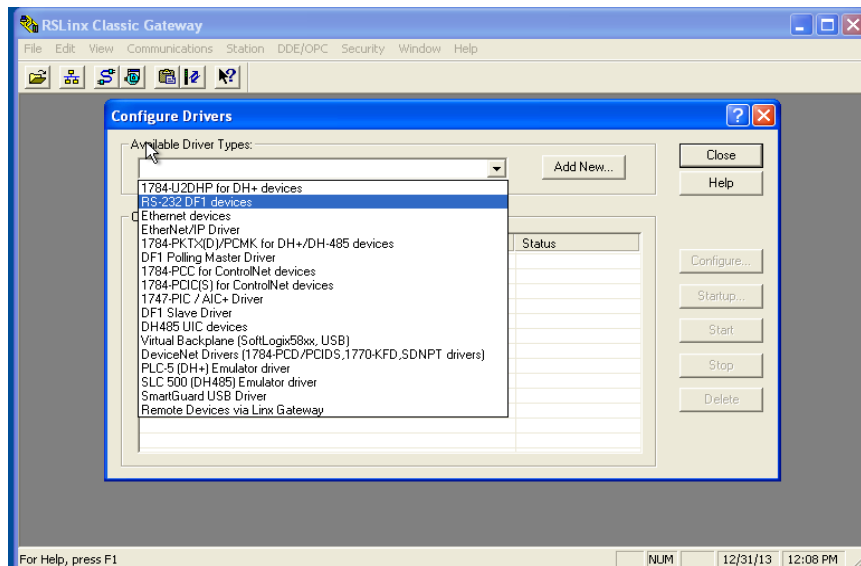
Se debe instalar el software encargado de realizar la comunicación del PLC hacia la PC; este software se llama RSLinx. Esta es una solución general de comunicaciones en la fábrica para el sistema operativo Microsoft Windows. Proporciona al controlador programable Allen-Bradley el acceso a una amplia variedad de aplicaciones Rockwell Software y Allen-Bradley, tales como Rslogix. Es el motor de comunicaciones para muchos productos de software, así como para productos desarrollados por terceros para usar el RSLinx.

En este mismo software se debe crear un *driver* para comunicar RSLinx con el PLC; esto depende mucho del medio que se utilizará para la comunicación; en el presente caso se conecta al PLC por medio del cable RS232 o cable serial; para ello se configura un *driver* para serial. Los requerimientos mínimos de la PC deben ser:

- Microsoft Windows NT versión 4.0 o posterior (Intel 486 o Pentium) o Microsoft XP, 2000, Me o 98.
- Cualquier dispositivo de señal compatible con Windows NT 3.1 (*mouse*, bola de seguimiento, pantalla táctil, etc.).
- Tarjeta Ethernet y/o dispositivo de comunicaciones Allen-Bradley o cable, dependiendo de la aplicación. El software se presenta con una llave para implementar una protección a copia. Esta llave consiste en un archivo de activación en un disco maestro que se presenta junto con el CD del software. De esta manera se puede tener instalado el programa en diferentes ordenadores personales pero solo se podrá activar uno a la vez.

- Pentium con procesador con al menos 32 MB de RAM
- Al menos 35 MB de espacio de disco duro disponible
- Monitor y adaptador gráfico VGA o de mayor resolución

Figura 22. Software de comunicación del PLC



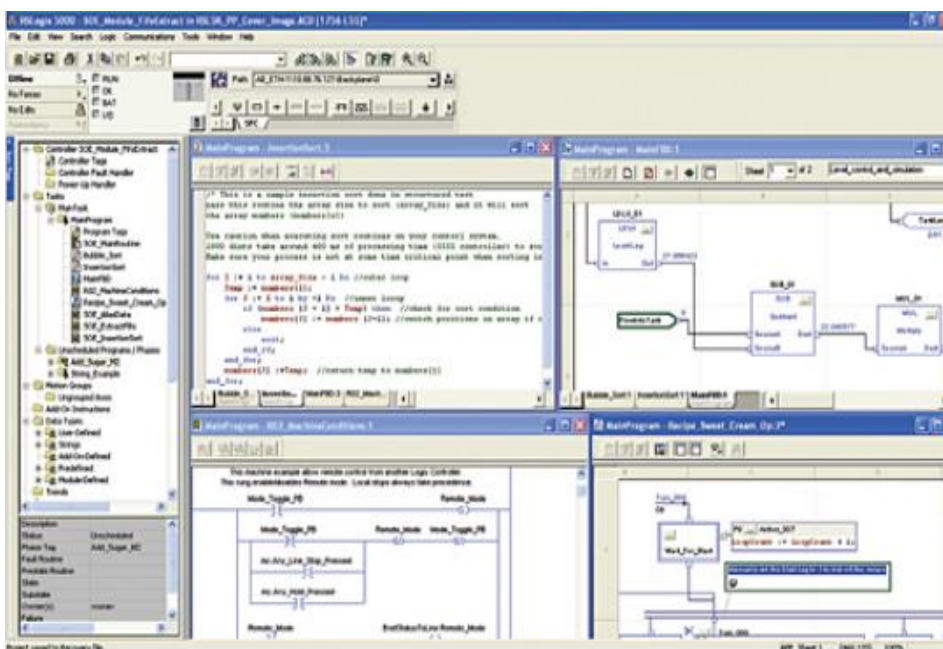
Fuente: BRADLEY, Allen. Installation Instructions EtherNet/IP Modules. p. 54.

3.6.2. Software de programación del PLC

Se necesita instalar el software de desarrollo de la programación en escalera para el PLC. Para los PLC Contollgix se utiliza el software llamado RSLogix 5000. Este está diseñado para trabajar con plataformas de controladores Logix5000; es un paquete de software compatible con la norma IEC 61131-3, que ofrece escalera de relés, texto estructurado, diagrama de funciones y los editores de diagrama de funciones secuenciales para que se puedan desarrollar programas de aplicación.

Con el software RSLogix 5000 se puede configurar de forma fácil y rápida la mayoría de los módulos E/S mediante los perfiles de módulo dedicados. Además, estos perfiles le permiten obtener acceso fácilmente a la información de estado y de diagnóstico.

Figura 23. **Software de programación del PLC**

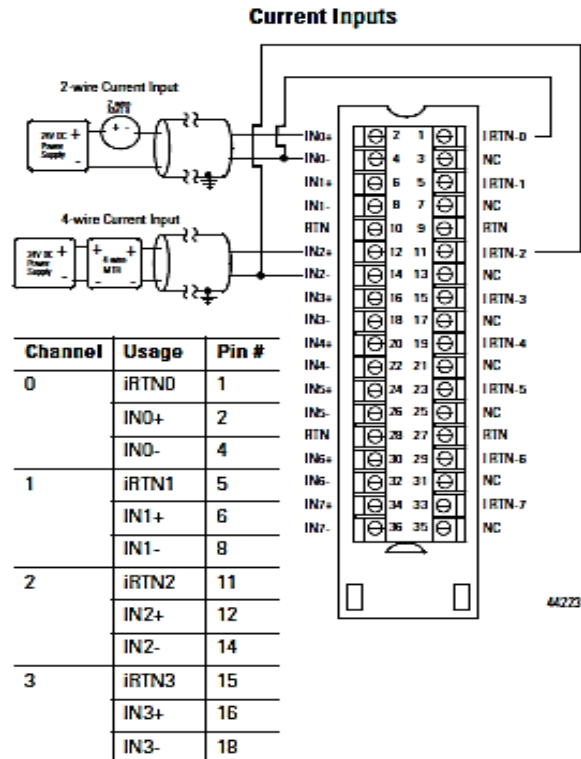


Fuente: BRADLEY, Allen- RSTechED 2010 DM04 – FactoryTalk Historian SE Basic Lab. p. 15.

3.6.3. **Conexión al módulo de comunicación**

Se utiliza el módulo 1756-IF8H, el cual consta de varios pines de conexión, que se presentan en la siguiente figura.

Figura 24. **Conexión al módulo de comunicación**



Fuente: BRADLEY, Allen. Proline t-mass 65 Flowmeter via HART to the plant PAX process automation system. p. 10.

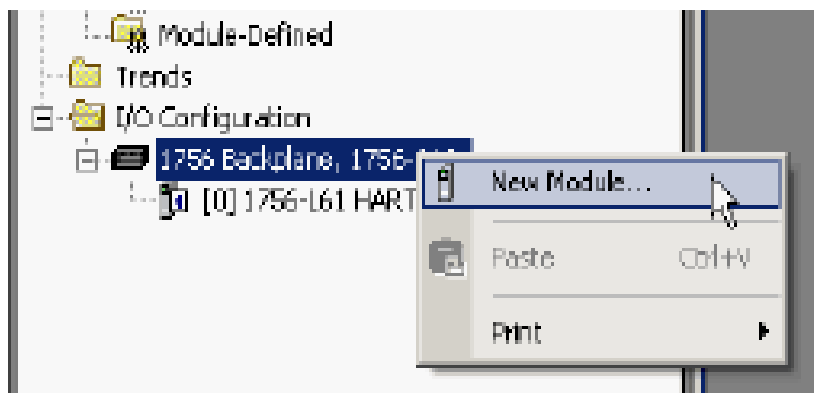
Como se muestra en el diagrama, se utilizan tres cables de comunicación INX+, INX- y iRTNx; estos tres bornes del módulo de comunicación HART se conectan; la configuración que se emplea para leer datos es de 4 a 20 mA.

3.6.4. **Configurando el módulo de comunicación**

Antes de programar la captura de datos, se configura el PLC para que reconozca que se le ha instalado un módulo de comunicación HART. Para lograr esto, el software RSLogix 5000 se comunica con el PLC y se agrega un nuevo módulo al mismo.

En la parte izquierda del software se encuentra una carpeta llamada I/O Configuration, que al expandirla desplegará el *backplane* 1756; con *click* derecho se selecciona un nuevo módulo.

Figura 25. **Agregando un nuevo módulo de comunicación**



Fuente: elaboración propia.

Inmediatamente se desplegará un menú con las opciones de módulos que se pueden agregar; se selecciona el que corresponde: 1756-IF8H. Este es un módulo de 8 canales de entrada analógicas. Se le debe colocar un nombre al módulo, así como una descripción; se selecciona en qué posición o *slot* del PLC se encuentra instalado.

En esta misma venta se selecciona la pestaña de Configuration; seguidamente el canal en el cual se recibe la información del medidor; luego se descarga la configuración del módulo al PLC, para verificar si se recibe la señal del medidor de flujo en esta misma ventana, en la pestaña de HART Device Info, la cual debe desplegar la información del medidor de flujo.

4. IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL Y ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN DE LAS VARIABLES A MEDIR

Luego de capturar la información se procesan los datos para representar una forma en la que se pueda hacer un análisis de consumo del aire comprimido, la variable a medir es el flujo volumétrico del aire en el dominio del tiempo, para representar así de forma gráfica los consumos del aire, y obtener un cálculo del consumo de energía para generar el volumen del mismo.

Rockwell tiene una gama amplia de software para el análisis de las variables generadas por la planta de producción; ellos están tratando de integrar la tecnología de información con los procesos industriales para agilizar la toma de decisiones y corregir a tiempo los procesos que presenten una falla.

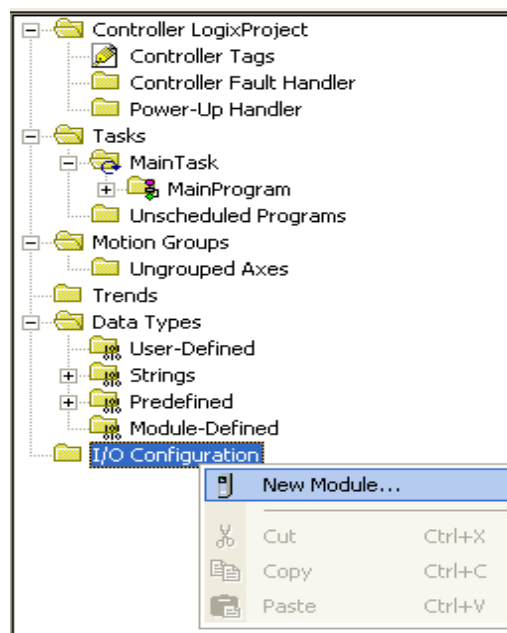
Se utilizan tres software que la empresa ya posee con licencia:

- FactoryTalk Historian: este software se encarga de almacenar y procesar la información.
- FactoryTalk View: solución de software que ofrece Rockwell para el monitoreo del proceso.
- FactoryTalk VantagePoint: software que sirve para realizar la parte de reportes.

4.1. Comunicación del sistema de medición

El sistema de medición se comunica a través de la red Ethernet, por lo cual se toman en consideración las direcciones IP y las máscaras correspondientes para la asignación correcta de cada dispositivo. Se configura el módulo de comunicación 1756-ENBT del PLC, para la comunicación vía Ethernet. Se instala este módulo y luego en el software RSLogix 5000 se agrega un nuevo módulo de comunicación, seleccionando con clic derecho en la parte de I/O Configuration, se escoge la opción de nuevo módulo.

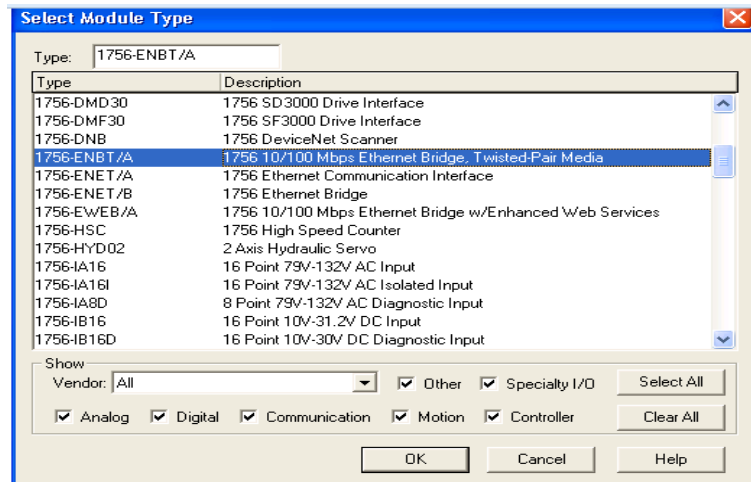
Figura 26. Configuración de un nuevo módulo



Fuente: elaboración propia.

El siguiente paso es elegir el módulo 1756-ENBT/A en el software RSLogix 5000.

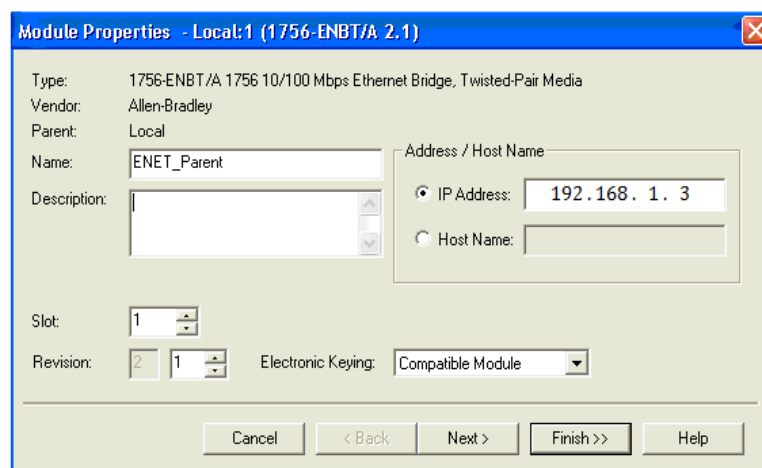
Figura 27. Módulo a utilizar



Fuente: elaboración propia.

Por último se configura la dirección IP que le corresponde al PLC en la red Ethernet, según la tabla de direcciones IP.

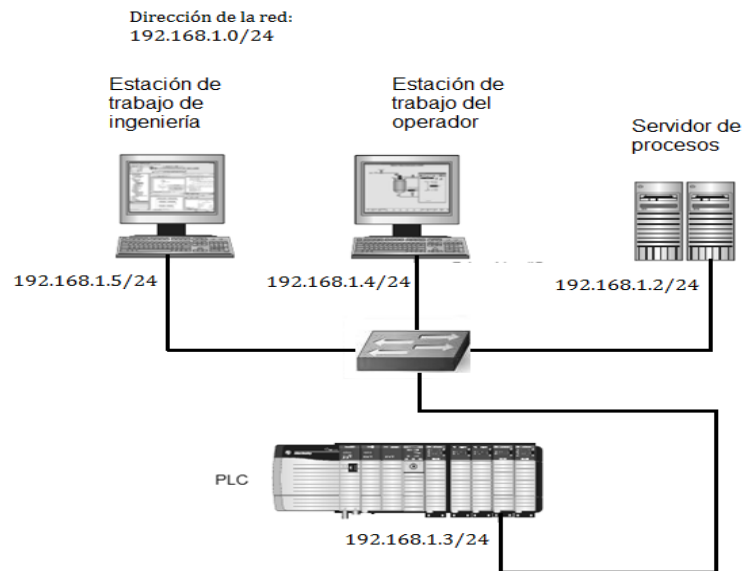
Figura 28. Dirección IP del PLC



Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en el diagrama, las direcciones IP se configuran de la siguiente forma en los dispositivos para que exista comunicación entre ellos. Se debe tomar en consideración que la red Ethernet es para aplicaciones de pocas distancias, ya que no se debe instalar un cable de red de más de 100 mts de longitud; se pueden utilizar *switch* de datos para amplificar la señal y para interconectar los dispositivos de red.

Figura 29. Direcciones IP del sistema de medición



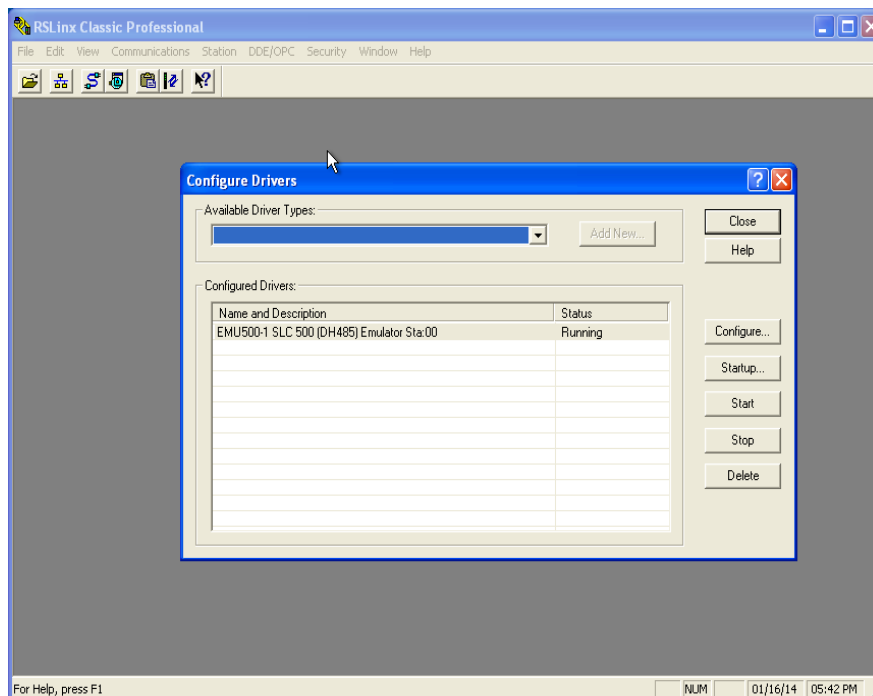
Fuente: elaboración propia, con programa rsview de rockwell.

4.2. Obtención de los datos a través del sistema de medición

A los equipos de trabajo que tengan comunicación con el PLC se les instala el software de comunicación RSLinx de Rockwell; el servidor se utiliza para la captura y almacenamiento de los datos enviados por el medidor de flujo a través del PLC, para ello se instala el software RSLinx.

Luego se agrega un nuevo *driver* de comunicaciones para la captura de la información por la red Ethernet. Esto se realiza de la siguiente forma: se ejecuta clic en el icono de nuevo driver en el software RSLinx.

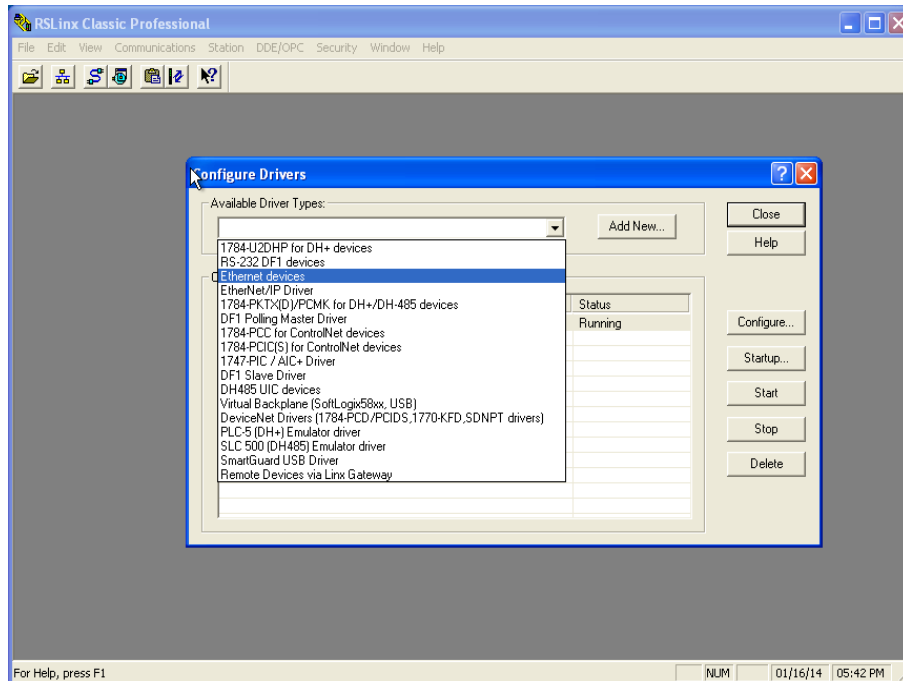
Figura 30. **Configuración del software de comunicaciones**



Fuente: elaboración propia.

A continuación se selecciona el *driver* para la conexión Ethernet para la red IP.

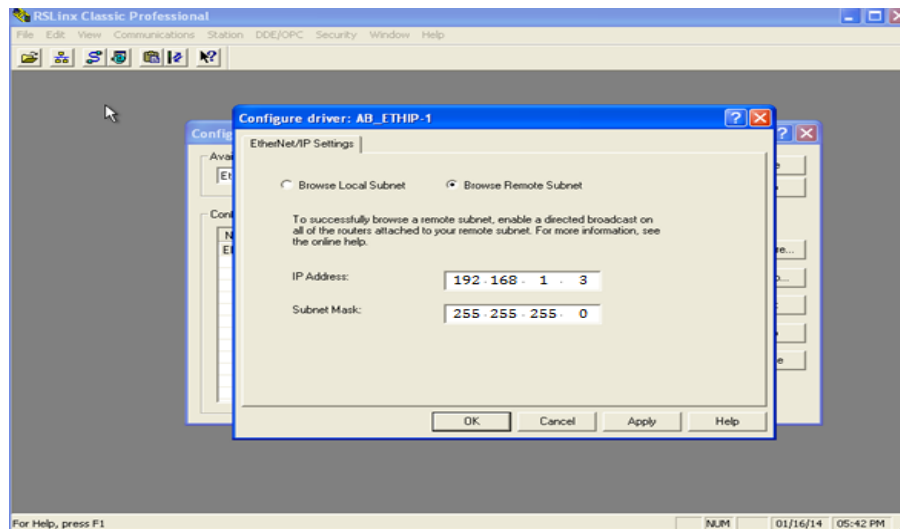
Figura 31. **Driver de comunicaciones**



Fuente: elaboración propia.

Por último se ingresa la dirección IP del punto remoto de donde se obtendrán los datos esta; es la dirección IP del PLC.

Figura 32. Ubicación de la dirección IP del PLC



Fuente: elaboración propia.

4.3. Sistema que se utiliza para el almacenamiento e interpretación de datos y su programación

FactoryTalk Historian es una herramienta que ayuda a maximizar la capacidad de recopilar datos de series de tiempo, obteniendo acceso a la información histórica en cualquier momento a través de diferentes niveles.

Esta herramienta está dividida en tres niveles de acuerdo a las necesidades:

- FactoryTalk Historian ME: para una sola máquina
- FactoryTalk Historian Site Edition: es un sistema de toda la planta
- FactoryTalk Historian Enterprise Edition: se extiende en toda la empresa a nivel global

Estas herramientas de información y de tendencias de gran alcance proporcionan una visión crítica de los parámetros de rendimiento y están disponibles en alta velocidad y resolución completa de cualquier sistema de control o de la interfaz hombre-máquina de software (HMI).

La empresa posee licencia de FactoryTalk Historian Site Edition, ya que se tienen otros datos como consumo de agua, gas y otras variables.

FactoryTalk Historian Site Edition, permite el acceso en tiempo real a la información; con base en esta información se pueden tomar mejores decisiones acerca del proceso o a los indicadores clave de rendimiento que se hayan identificado como factores contribuyentes a sus objetivos de mejora continua. Las capacidades expandidas de FactoryTalk Historian SE ofrecen captura, gestión y capacidades analíticas de datos para mejorar la toma de decisiones y fomentar mejores resultados a todo nivel.

FactoryTalk Historian de Rockwell Automation es un juego de herramientas integrado para obtener información de producción y del proceso en tiempo real. La plataforma suministra datos complejos de fabricación a un lugar centralizado, proporcionando información sobre parámetros de rendimiento de un solo subensamblaje, una línea de producción e incluso toda la empresa.

El sistema también es fácil de adaptar. Utiliza interfaces estándar y automatiza los procedimientos de instalación con sistemas de ControlLogix, o puede configurarse para interoperación con sistemas de control de otras marcas o de versiones anteriores. Como resultado, FactoryTalk Historian SE es más rápido y más fácil de poner en línea que otros sistemas historiales tradicionales.

Entre las ventajas de este software se mencionan las siguientes:

- Monitoreo del consumo y la producción de materiales (materias primas, intermedias, utilidades de producto final, etc.). Se ayuda a reducir la cantidad de materiales perdidos debido a la sobreproducción, durante la operación o cambios en la calidad del producto.
- Monitoreo o cálculo del uso eficaz del equipo y las condiciones de rendimiento.
- Ayuda a mejorar la transformación de materias primas en productos, así como la eficacia total del equipo y la utilización.
- Proporciona datos de producción y operación en tiempo real a otras funciones de administración de la cadena de suministros (mantenimiento, priorización, contabilidad, etc.).

Los datos son en gran parte no estructurados, por lo que no representan la opción óptima para ser almacenados en una base de datos relacional como Microsoft SQL Server u Oracle.

En primer lugar, todos los datos requerirán una gran cantidad de espacio, debido a que las tecnologías típicas hacen de cada punto de datos un registro en la base de datos; en segundo lugar, la recuperación de los datos, ya que el sistema necesita seleccionar una gran cantidad de registros para una tendencia simple, tomará más tiempo de búsqueda que en una base de datos relacional tradicional.

Para almacenar más datos en el mismo espacio y con el fin de permitir la captura rápida de datos y la recuperación, los historiadores avanzados, hoy en día están utilizando almacenes de datos optimizados de series de tiempo, que permiten una velocidad, un espacio de captura muy rápida de almacenamiento optimizado y una tasa de recuperación de datos.

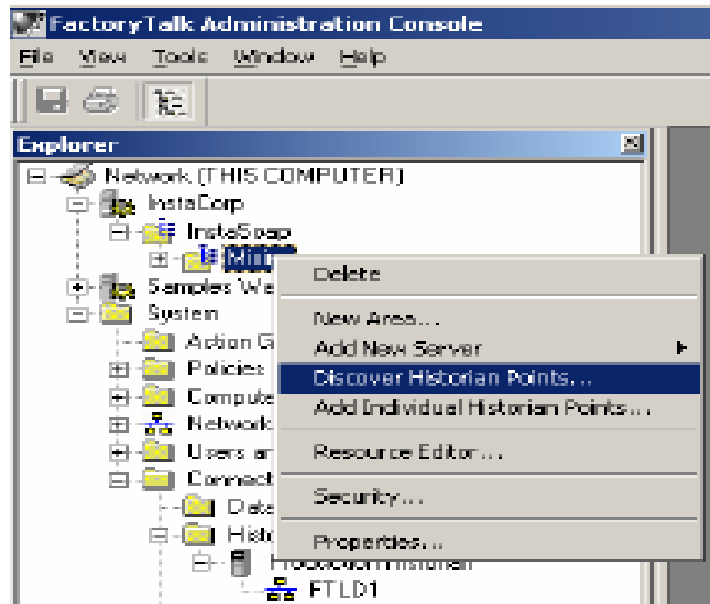
4.3.1. Configuración de FactoryTalk Historian

Para configurar el software de captación de datos se deben conocer las variables que se desean leer en el PLC y hacer una etiqueta en su configuración para hacer la referencia al software; comúnmente se conocen por *tag* de memoria que es un registro del sistema de control.

En FactoryTalk Historian, a un punto de datos o variables se les identifica con una etiqueta (*tag*), de donde se recolecta la información. Se debe verificar en el software Rslogix 5000 si el PLC tiene datos en los *tags* (etiquetas) del controlador; para ello se conecta al PLC y se revisa en la parte izquierda donde está la pestaña de *controller tags*:

Luego de verificar los *tags* se ingresa a FactoryTalk Historian, consola de administración; si ya se tiene creada una conexión para este PLC, lo único que se debe hacer es agregar una nueva variable; en la parte derecha de la consola de administración aparecen las conexiones que ya están definidas, con un clic izquierdo a la conexión que ya está definida, se selecciona la opción para hacer un *autodiscovery* de los puntos del historian. Con esta opción se agregan nuevos *tags* a la base de datos del *historian*, seleccionando los *tags* que se desean almacenar; esta comunicación se hace a través de la red Ethernet, por eso es necesario tener configurado antes el Rslinx y que la comunicación se mantenga constante con el PLC.

Figura 33. **Agregando nuevas variables en Factory Talk Historian**

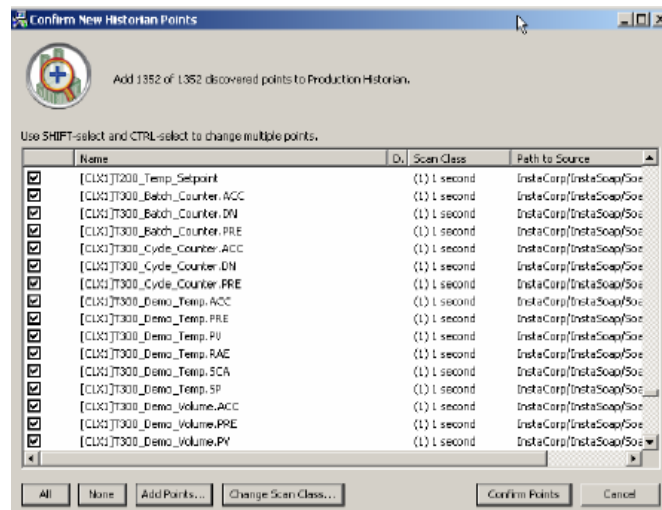


Fuente: elaboración propia.

A continuación de esto se selecciona solo la comunicación a través de Rslinx; este es el software de comunicación que utiliza Rockwell, el cual se encuentra configurado para la comunicación con el PLC de medición.

A continuación el asistente mostrarán todos los *tags* que se tenga el PLC, y se seleccionan los que se necesitan.

Figura 34. Variables a medir



Fuente: elaboración propia.

4.4. Software para el monitoreo del sistema de medición

Rockwell tiene una solución para la visualización y monitoreo de los procesos industriales; este es FactoryTalk View; el cual proporciona una *suite* de productos de interfaz máquina-humano diseñados con una mirada común: ayudar a acelerar el desarrollo de sus aplicaciones.

FactoryTalk View es parte de la *suite* escalable y unificada de soluciones de vigilancia y control diseñados para abarcar aplicaciones independientes a nivel de máquina, a través del nivel de supervisión aplicaciones HMI o por medio de una red.

FactoryTalk View incluye la herramienta de desarrollo basada en PC FactoryTalk View Studio, así como FactoryTalk View Machine Edition, FactoryTalk View Site Edition y el software FactoryTalk ViewPoint.

Los beneficios de este software son:

- Escalable a través de múltiples plataformas, incluyendo terminales PanelView Plus HMI y las computadoras industriales, tanto a nivel de máquina como a nivel de supervisión HMI.
- Agilizar el desarrollo de HMI con un editor común para FactoryTalk View ME y FactoryTalk View SE.
- Personalizar la experiencia del operador con VBA del lado del cliente y el modelo de los gráficos expuestos.
- Maximizar la productividad accediendo directamente a la información de etiquetas en el controlador, lo que elimina la necesidad de crear *tags* de HMI.
- Maximizar la disponibilidad del sistema con detección de fallos integrada y recuperación.
- Comparte datos con otras fábricas *talks* habilitadas, productos que prestan servicios comunes, tales como la seguridad, alarmas y diagnósticos.

4.5. Programación del sistema de monitoreo

Se desarrolló una visualización gráfica del proceso del aire comprimido, la cual ayuda a desplegar la información del consumo del aire en tiempo real y mantener un control del proceso.

Para ello se utiliza FactoryTalk View Studio, y se enlaza con FactoryTalk Historian, para que despliegue el historial del consumo del aire.

La visualización se crea de forma normal como un proyecto para un PLC, lo único que cambia son las variables que se enlaza a la animación.

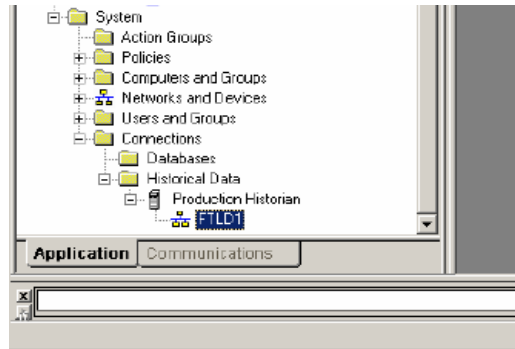
Figura 35. **Panel de visualización del sistema de aire comprimido**



Fuente: elaboración propia, con programa factory talk studio de rockwell.

En esta pantalla principal se observan los cuatro compresores que son los encargados de generar el aire comprimido, el tanque donde se almacena el aire comprimido, así como un manómetro que indica la presión del mismo tanque y por último se ve el medidor de flujo másico,. En la siguiente gráfica se despliega un historial del consumo del aire comprimido. En la consola de administración en FactoryTalk View se busca en la parte del sistema las conexiones del *historian* para confirmar la conectividad a la base de datos.

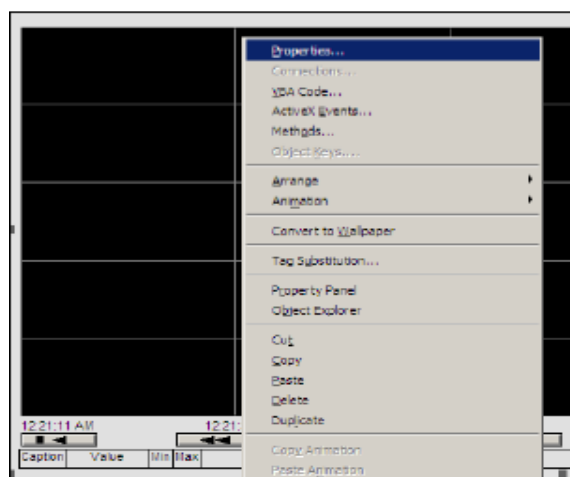
Figura 36. Verificando la variable a desplegar



Fuente: elaboración propia.

Si existe conectividad se relacionan los *tags* creados por la base de datos con la visualización; para ello se selecciona el objeto donde se despliega la información del historial de consumo de aire comprimido y con el clic derecho se muestra la siguiente información.

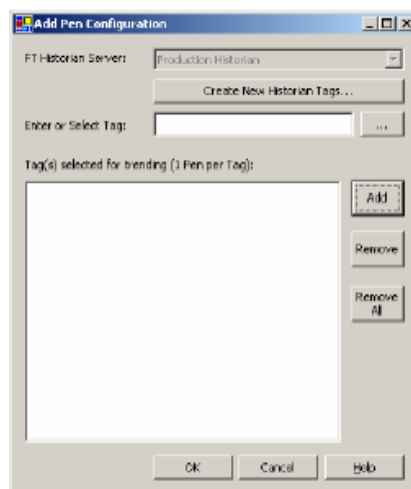
Figura 37. Vinculando la variable



Fuente: elaboración propia.

En las propiedades del objeto se selecciona en la pestaña general, donde se obtiene la información del servidor de *historian*; se selecciona *poll historical data*, en la pestaña de *pens*, en la opción de la fuente, se escoge Historian Server y se agregan nuevos *pens*.

Figura 38. **Propiedades del objeto**



Fuente: elaboración propia.

En esta parte es donde se relacionan los *tags* del *historian* con las variables del FactoryTalk Rsviwe; en el botón de *selec tag* se busca la variable que desea desplegar y se agrega. Puede añadirse más de una variable que sea necesario graficar.

4.6. **Generación de reportes del consumo de aire comprimido**

En esta sección se crean reportes que son de mucha utilidad para el análisis del consumo de aire comprimido, así como el coste de generar este aire comprimido; para ello se utilizará el software FactoryTalk Vantage Point.

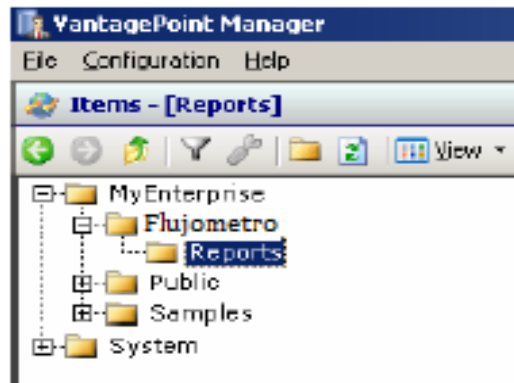
Factory Talk VantagePoint organiza, correlaciona y normaliza datos dispares de sus procesos de fabricación y producción, así como de sistemas comerciales en un modelo de producción unificado (UPM). Esto permite organizar y presentar información en el lenguaje cotidiano. También ayuda a eliminar muchos de los retardos asociados con la generación típica de informes de fabricación.

Los retardos y las imprecisiones se producen mientras los usuarios buscan y recaban datos relevantes de diversos sistemas de fabricación y producción; mientras se incorporan en hojas de cálculo, se organizan racionalmente, y se correlacionan y diseminan los resultados. Finalmente, cuando los interesados tienen tiempo de leer los informes, esta información ya es inútil. Las ventajas de este software son:

- Los datos de fabricación son accesibles en tiempo real.
- Lo único que se necesita es un navegador web para ver los informes publicados.
- Los informes publicados proporcionan una sola versión veraz para toda la organización, lo que maximiza la productividad y minimiza los costos.
- Se pueden generar informes basados en un programa o en un cambio de valores.

Se crean reportes para que sean accesibles vía web. Para ello se ingresará a la consola de administración de FactoryTalk Vantage Point, y en el directorio se hace una nueva carpeta donde se establecen los reportes del sistema de aire comprimido.

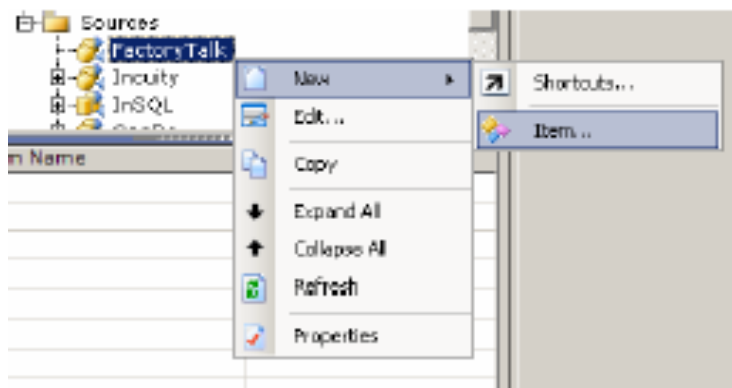
Figura 39. **Creando un directorio para reportes**



Fuente: elaboración propia.

Se creó una conexión hacia el servidor de *historian* para recoger la información de la base de datos. En la consola de administración, en la sección *system*, en la opción *sources* en FactoryTalk, dándole clic derecho, se crea un nuevo ítem para la conexión con *historian*.

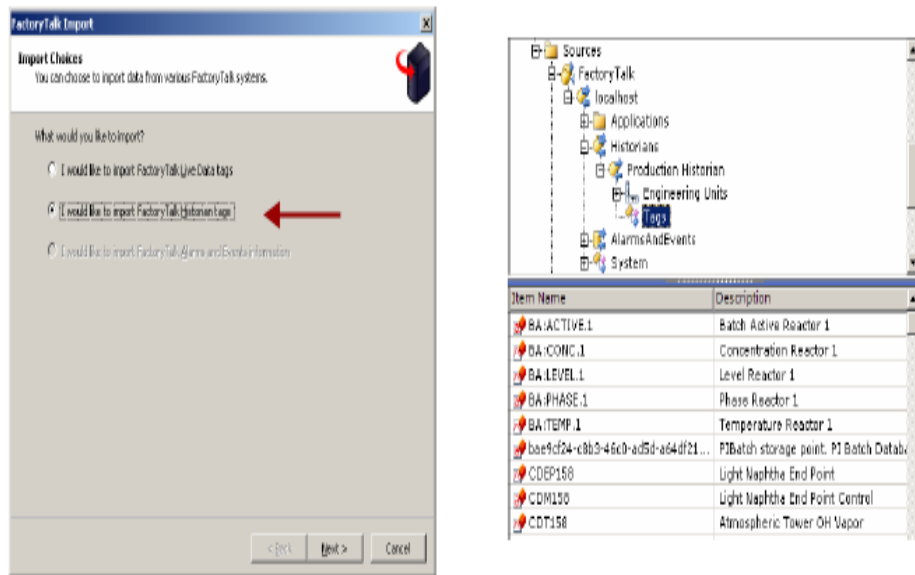
Figura 40. **Conexión hacia el servidor de *historian***



Fuente: elaboración propia.

Se importan los *tags* desde el *historian* hacia el VantagePoint; si todo se realiza correctamente el VantagePoint ya tiene los *tags* cargados para configurar los reportes.

Figura 41. Importación de variables



Fuente: elaboración propia.

Se crearon reportes utilizando la herramienta que se llama *trends* en FactoryTalk Vantage Point; esta sirve para encontrar la tendencia de las variables y sacar un modelo para el análisis; en esta herramienta se deben buscar las variables que se quieran publicar en los reportes, y modelar cómo se desea publicar este reporte; por último se debe publicar este reporte para que cuando se ingrese por medio de la dirección IP se pueda desplegar la información que se desee obtener.

5. ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO

Diversos tipos de energía son utilizados en un procesos de manufactura; el más relevante es la energía eléctrica, la cual es encargada de poner en marcha las maquinarias existentes en la línea de producción; el costo por el consumo de esta energía es considerable; al generar aire comprimido también se consume energía eléctrica. El aire comprimido es una de las energías más utilizada en los procesos, porque se puede transformar en energía mecánica. Se debe comprender que las líneas de producción se miden respecto de la capacidad de producción, muchas veces se mide en libras hora.

5.1. Partes que componen una línea de producción

Por definición se conoce que una línea de producción es el conjunto armonizado de diversos subsistemas como: neumáticos, hidráulicos, mecánicos, electrónicos, software, etc. Todos estos con una finalidad en común: transformar o integrar materia prima en otros productos. Las líneas de producción deben contener el mínimo tiempo ocioso en las estaciones, y lo que se pretende buscar es producir la mayor cantidad de producto a un costo de capital mínimo.

En el caso particular, en la fábrica de alimentos existen varios productos, por lo cual las líneas de producción se adecuan a los mismos, se explican las partes básicas y se identifica cada máquina, ponderándola por consumo de aire comprimido respecto de la producción; asimismo se analiza cuáles son las máquinas que más aire consumen.

5.1.1. Descripción de las máquinas que componen una línea de producción

La materia prima más utilizada en la planta de producción es el maíz y la papa, estas líneas de producción se pueden modificar para obtener diferentes productos. Se describen los productos que más demanda tienen en el mercado, ya que en estos es donde se ve reflejado el mayor consumo de aire comprimido en la planta.

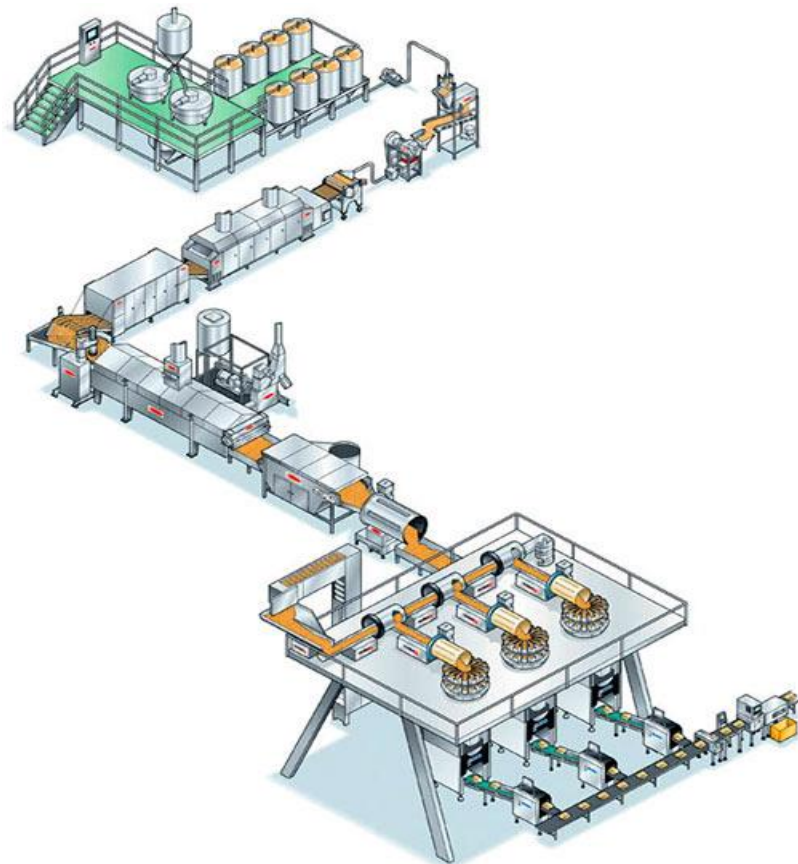
Para los productos basados en la papa, el proceso es el siguiente:

- Lavado y pelado
- Corte
- Blanqueado
- Deshidratación
- Freído
- Secado
- Sazonado
- Empaque

En el caso de los productos cuya materia prima es el maíz, la maquinaria difiere en la creación de nixtamalización; este el proceso mediante el cual se realiza la cocción del maíz con agua y cal, utilizado principalmente para la obtención de masa (nixtamal). Luego de obtener el nixtamal se hace pasar por un extrusor, este se encarga de quitarle la humedad y llevar la masa a una temperatura adecuada.

Dependiendo de qué producto se esté fabricando, así será la forma que le dé la máquina para su posterior freído; luego de freírlo, se seca el producto, se sazona y por último se empaqa.

Figura 42. **Línea de producción cuya base es el maíz**



Fuente: www.heatandcontrol.com. Consulta: marzo de 2014.

Esto es a grandes rasgos cómo funcionan las líneas de producción. Lo interesante es poder tener una relación de consumo de aire comprimido por máquina con base en su producción, para hacer un cálculo de consumo energético.

5.1.2. Ponderación de consumo de aire por máquina

En esta sección se realiza una ponderación de consumo de aire comprimido por máquina en la medida de producción. Como se observa en la sección anterior, las líneas de producción están divididas por áreas; todas utilizan aire comprimido, pero en muchas de ellas su consumo es insignificante.

De todo el proceso la parte donde más utiliza aire comprimido es la máquina de empaque, ya que esta tiene muchos mecanismos automáticos con base en neumática.

La sección de empaque se hace a través de una máquina marca Ishida; esta máquina modelo Atlas ITPS realiza hasta 180 bolsas por minuto, 900 Kg/hora o 1,984.160 libras/hora; tiene una eficiencia del 99 % con un consumo de 60NI/min de aire comprimido, con una presión de 0.4 Mpa.

5.1.3. Cálculo de consumo de aire por línea de producción

Se convierten los 60 NI/min a una presión de 0.4 Mpa; esta medida es en condiciones normales. Para mejor comprensión se convierten los newtons a litros por minuto; esta medida se debe convertir a las condiciones normales del ambiente, los 0.4 Mpa corresponden a 400 Kpa. Si se toma la temperatura del ambiente 20 °C, entonces:

Se aplica la fórmula $V_1 = (P_2/P_1 * T_1/T_2) * V_2$

$$60 \text{ NL/min} = (400 \text{ kpa}/101.325 \text{ kpa}) \times 273.15 / (273.15 + 20) * v_2$$

$$V_2 = 16.31 \text{ l/min}$$

Si un litro es igual 0.035315 pies cúbicos por minuto, entonces:

$$V2 = 0.58 \text{ cfm}$$

En una hora esta máquina consume: 978.7 litros. Al 100 % de su capacidad.

Se trata del consumo total de aire comprimido por la producción; existen tres líneas de producción en la planta; estas se miden por su capacidad, las líneas son cc 2000 produce 2000 libras/hora, tc 1500 produce 1500 libras/hora y la cc 1000 produce 1000 libras/hora.

La máquina de empaque tiene capacidad de 1984 libras/hora, por lo que en la línea de producción de la cc 2000, se utiliza a su 100 %; es decir su consumo es 978.7 litros por hora, más el consumo de las otras máquinas, aproximadamente 34.58 cfh. En el caso de la tc 1500, esta produce 1500 libras/hora; aplicando regla de tres simple se obtiene:

$$\begin{array}{l} 1984 \text{ libras/hora} \text{ ----- } 978.7 \text{ litros/hora} \\ 1500 \text{ libras/hora} \text{ ----- } X. \end{array}$$

$$X = 740 \text{ litros/hora}$$

Al multiplicar este valor por 0.035315 se obtienen los pies cúbicos por hora:

$$X = 26,13 \text{ cfh.}$$

Su consumo es de 740 litros por hora o 26,13 cfh, más el consumo de las otras máquinas.

Para la línea de producción cc 1000 esta produce 1000 libras/hora; para la cantidad de producción de esta línea se necesita utilizar la máquina empacadora casi al 50 % de su capacidad, por ello consume la siguiente cantidad de aire.

$$\begin{array}{l} 1984 \text{ libras/hora} \text{ -----} 978.7 \text{ litros/hora} \\ 1000 \text{ libras/hora} \text{ -----} X \end{array}$$

$$X = 493.3 \text{ litros/hora}$$

Al multiplicar este valor por 0.0.35315, se obtienen los pies cúbicos por hora:

$$X = 17.42 \text{ cfh}$$

5.2. Consumo energético en la generación de aire comprimido

Para tener un conocimiento de cuánto se consume en el sistema de aire comprimido, se debe medir la demanda de los compresores; para ello se utilizan equipos que puedan determinar el consumo energético.

Se efectuaron mediciones a los compresores con los vatímetros marca AEMC, evaluando aproximadamente cada hora. Se realizaron cinco revisiones este día para hacer una estimación del consumo de energía y costo de los mismos, en cada compresor de la planta de producción.

El total de consumo se calculó con los costos definidos para la planta de producción, el promedio de consumo de un compresor se presenta en la tabla siguiente.

Tabla XIII. **Consumo de un compresor**

HORA	PROMEDIO Kwh	COSTO UNITARIO (USD)
9:34 am	23.66666667	2.016494667
10:28 am	44.62533333	3.802256901
11:34 am	68.86866667	5.867885875
12:31 am	92.831	7.909572524
2:18 pm	134.9266667	11.49629171
TOTAL	72.98366667	6.218500335

Fuente: elaboración propia.

Estimación de consumo:

Tabla XIV. **Estimación de consumos**

No.COMP	COSTO POR COMPRESOR (USD)	COSTO (USD)	COSTO/DÍA (USD)	COSTO/MES (USD)
3	6.37	19.11	458.64	13759.2
3	6.27	18.81	451.44	13543.2
3	6.32	18.96	455.04	13651.2
3	6.22	18.66	447.84	13435.2
PROMEDIO	6.295		453.24	13597.2

Fuente: elaboración propia, según factura de energía eléctrica.

Esto es un promedio de costos, que varía dependiendo de la producción mensual.

5.3. Debilidades en el sistema de aire comprimido

Para que la utilización de aire sea optimizada es necesario tener en cuenta que en las empresas no se le da importancia a las fugas que hay dentro del proceso. Las máquinas que conforman la línea de producción utilizan mangueras, reguladores de aire y electroválvulas, pero muchas veces debido al uso de los mismos se deterioran; de ahí que se encuentren fugas por estos instrumentos en mal estado y se empiece a perder aire comprimido. Entre las causas más comunes que producen estas pérdidas se hacen notar: ruptura de mangueras e inadecuado manejo de equipo.

Las fugas se pueden ver en las tuberías principales. El aire también se utiliza para secar la tinta de las fechadoras, por eso tienen tubos de 6 milímetros (mm) con aire constante, para que se seque rápidamente y se pueda empacar el producto; por tanto, es utilizado en el llenado para que tenga el tamaño que especifica las normas de calidad.

5.4. Mejoras en el sistema de aire comprimido

Muchas empresas e industrias poseen equipos, redes, tuberías y aditamentos que no han sido seleccionados con el criterio de ahorrar. Para ello se propone realizar mejoras en el sistema, para aprovechar mejor el recurso de aire comprimido. Uno de los aspectos más descuidados en los sistemas de aire comprimido son las fugas de aire; muchas veces se piensa que estas fugas no tienen importancia.

Debe tomarse en cuenta que en el diseño de una instalación de aire comprimido, el indicador de las fugas es del orden del 10 % como máximo en la demanda calculada; en algunos casos estas pueden llegar a ser tan grandes hasta del 50 %, lo que implica un gran desperdicio de energía. El almacenamiento del aire comprimido en un sistema tiene como función principal absorber las fluctuaciones causadas por la demanda y controlar los periodos de ciclado de los compresores, por lo que su capacidad adecuada es muy importante.

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

- Proporcionan capacidad de almacenamiento que sirve para evitar que los ciclos de operación de un compresor sean muy cortos, con lo que se reduce el desgaste y uso del compresor, ya que cuando dicho compresor esté mayor tiempo en modo de descarga, es decir trabajando en vacío, logrará obtenerse el máximo de ahorro energético en función de poder sacar de operación a los compresores.
- Eliminan en gran medida el flujo pulsante generado por las variaciones de demanda en el sistema de aire comprimido, amortiguando los picos de demanda de aire.
- Igualan las variaciones de presión en la red de aire.

El objetivo de un sistema de distribución es transportar el aire comprimido, desde el compresor, almacenarlo en un tanque, y de ahí llevarlo hasta la herramienta o cualquier otro equipo neumático, con una pérdida de carga limitada.

Los puntos más importantes para el rendimiento, seguridad y economía, de una red de distribución de aire comprimido, son:

- Poca caída de presión entre el compresor y los puntos de consumo de aire; el sistema de distribución en varios puntos puede cerrarse en forma de anillo. Sin un buen sistema de distribución el compresor debe entregar un mayor volumen de aire, compensando mediante caídas de presión las variaciones geométricas de la red.
- Entre mayor sea el recorrido que hace el aire mayores serán las pérdidas de energía en la red; también entre mayores sean las variaciones en la relación de diámetro, habrá mayores pérdidas. Entre más accesorios más pérdidas.

La mejora en el sistema de distribución también aplica para los tanques de almacenamiento, con los cuales puede aprovecharse al máximo de eficiencia la capacidad de los compresores, evitando entregar aire directamente de los compresores a cargas que por sus flujos representen consumos innecesarios de energía eléctrica.

5.5. Datos obtenidos en el sistema de medición

Se analizan los datos obtenidos del sistema de medición para hacer un estudio del costo de energía al generar el aire comprimido; para ello se hace una relación entre la demanda y el consumo de aire comprimido.

La producción de aire de los compresores es de 100 a 110 psi y en cuanto a la cantidad de aire por hora es de 25200 cfh para los compresores.

5.5.1. Análisis en las líneas de producción

Tomando como base las líneas de maíz, se mide el tiempo en que las maquinas están operando, quitando los tiempos muertos:

Tabla XV. Análisis de consumo y costo energético

<u>LÍNEA TC 1500</u>					
MES	TOTAL HORA DEL MES	AIRE (cfh)	FT ³	COSTO/FT ³	COSTO TOTAL.
Mes 1	562,73	25200	14180796	Q 0.00150	Q 21 269,80
Mes 2	413,24	25200	10413648	Q 0.00150	Q 15 619,40
<u>LÍNEA CC2000</u>					
MES	TOTAL HORA DEL MES	AIRE (cfh)	FT ³	COSTO/FT ³	COSTO TOTAL
Mes 1	565,56	25200	14252112	Q 0.00150	Q 21 376,74
Mes 2	404,07	25200	10182564	Q 0.00150	Q 15 272,83
<u>LÍNEA CC 1000</u>					
MES	TOTAL HORA DEL MES	AIRE (ft ³ /h)	FT ³	COSTO/FT ³	COSTO TOTAL
Mes 1	452,98	25200	11415096	Q 0.00150	Q 17 121,50
Mes 2	376,74	25200	9493848	Q 0.00150	Q 14 239,82

Promedio

Promedio mes 1 mes 2

Promedio/mes	Q19 922,67	Q15 044,03
---------------------	------------	------------

Fuente: elaboración propia.

5.6. Auditorías de aire comprimido

En una auditoría se examina tanto el lado del suministro como el lado de la demanda, así como la interacción entre ellos.

Se presenta una lista de chequeo resumida, en la que se señalan los aspectos esenciales que deben revisarse en una auditoría energética a un sistema de aire comprimido.

5.6.1. Aspectos generales del sistema

- Fugas: cuantificar e identificar las fugas. Recomendar plan de acción para reducir las fugas.
- Niveles de presión: determinar el mínimo nivel de presión necesario para los equipos de uso final. Evaluar posibilidad de reducir presión. Evaluar necesidad de almacenamiento para reducir presión.
- Controles: analizar si el sistema de control es apropiado al perfil de demanda. Evaluar otras alternativas de estrategias de control.
- Recuperación de calor: identificar potenciales de recuperación de calor.

5.6.2. Aspectos del lado de la demanda

- Sistema de distribución: examinar esquema general del sistema. Medir caídas de presión. Evaluar efectividad del sistema de drenaje de condensado. Evaluar cambios que mejoren el comportamiento del sistema.

- Perfil de demanda: establecer el perfil de demanda. Analizar su influencia en la estrategia de control y en la capacidad de almacenamiento necesaria. Evaluar alternativas de mejoras.
- Equipos de uso final: revisar equipos de uso final, estado técnico, presiones de trabajo. Evaluar posibles cambios a otros accionamientos o a equipos que trabajen a menor presión, o de instalación de capacidad de almacenamiento local.

5.6.3. Aspectos del lado del suministro

- Conjunto de compresores: evaluar si el tipo de compresor es adecuado, su estado técnico general y la eficiencia. Evaluar la instalación de los compresores en cuanto a su ubicación, conexión al sistema de enfriamiento, ventilación, etc.
- Filtros: inspeccionar su estado, caídas de presión y estimar pérdidas de energía.
- Postenfriadores: evaluar efectividad de enfriamiento, separación de humedad y valorar posibles mejoras.
- Secadores: analizar si son los apropiados para la calidad del aire que se requiere. Medir eficiencia y caída de presión.
- Drenajes automáticos: revisar funcionamiento, evaluar modificaciones o sistemas alternativos.

- Recibidores: analizar localización y capacidad de tanques recibidores para almacenar aire. Evaluar posibles soluciones a problemas de almacenamiento.

CONCLUSIONES

1. El sistema de aire comprimido es uno de los más importantes en la empresa, ya que si no existe un suministro de aire comprimido no podrían operar las máquinas neumáticas, por lo que es de vital importancia mantenerlo en operación y en óptimas condiciones.
2. Al implementarse un sistema de monitoreo de consumo de aire comprimido se logra detectar posibles fugas, lo que ayuda a tener una respuesta a tiempo para disminuir las pérdidas económicas al generar aire comprimido.
3. La principal razón de la instalación del medidor de caudal en la planta de producción es proporcionar información de gestión; esto permite que una planta trabaje con la calidad del producto necesaria.
4. El sistema de medición se puede utilizar para calcular directamente el coste de las materias primas o las fuentes de energía; esto genera mucha mayor información para el análisis financiero de la planta de producción.
5. La visualización en el sistema de medición es vital, ya que el operario que se encuentra monitoreando puede reportar un cambio inesperado en el sistema de aire comprimido, evitando así problemas del funcionamiento de la planta.

6. El aire es un gas cuyas propiedades físicas varían dependiendo de las condiciones del ambiente.

7. Internamente el medidor de flujo posee registros donde se pueden almacenar los datos totales de la medición; esto es muy importante ya que estos se encuentran en el propio medidor.

RECOMENDACIONES

1. Instalar el medidor de flujo másico térmico en la tubería principal, ya que este trabaja en cualquier condición, pues mide flujo de líquidos y gases.
2. El medidor debe configurarse para una comunicación vía HART, ya que por medio de este protocolo de comunicación se adecua a un crecimiento en instalación de nuevos medidores sin necesidad de realizar una nueva instalación.
3. El medidor se debe instalar en la tubería principal; este mide el consumo de aire comprimido de toda la planta.
4. Instalar pequeños medidores de consumo de aire en cada línea de producción, obteniendo así medición exacta por línea.
5. Antes de realizar una instalación del medidor de flujo de aire comprimido se deben tomar en consideración las condiciones de la tubería, así como la posición del medidor, debiendo ser en forma vertical a la menor distancia del sistema de aire comprimido, ya que todo influye en la exactitud de la medición.
6. La tubería de hierro para el sistema de distribución de aire comprimido no es aconsejable por poseer un mayor índice de oxidación, pues está expuesta a la evaporación de agua que contiene el aire y esto afecta a los componentes neumáticos.

7. Debe utilizarse tubería de aluminio ya que en ella se produce menos pérdida de presión y menor calentamiento.
8. Antes de instalar el medidor se debe presurizar el sistema de aire comprimido, así las lecturas que este arroje serán lo más exactas posible.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALLEN-BRADLEY, *Installation Instructions EtherNet/IP modules catalog*. [en línea]. <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/enet-um001_-en-p.pdf>. [Consulta: marzo de 2014].
2. _____. *User manual. ContolLogix HART Analog I/O Modules*. [en línea]. <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1756-um533_-en-p.pdf>. [Consulta: marzo de 2014].
3. ENDRESS + HAUSER. *Flow handbook, 2a ed. USA: Endress + Hauser, 2004*. 456 p.
4. _____, *Proline t-mass 65 Flowmeter via HART to the PlantPax Process automation system. January 2009*. [en línea]. <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/ap/proces-ap011_-en-p.pdf>. [Consulta: enero de 2014].
5. _____. *Technical Information. Proline t-mass 65F, 65I. Thermal mass flow measuring system. Direct mass flow measurement of gases. USA, 2004*. 16 p.
6. PEPSICO International. *Sistemas de aire comprimido. Conocimientos básicos*. USA: PEPSICO International, 2004. 74 p.

