



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA
CONTROL DE CAUDAL DE LIQUIDOS.”**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

CRISTIAN GEOVANNY CHÁVEZ GARCÍA

RIOBAMBA - ECUADOR

2014

HOJA DE FIRMAS

| NOMBRE | FIRMA | FECHA |
|---|--------------|--------------|
| Ing. Cesar Avalos DECANO FAC. CIENCIAS | _____ | _____ |
| Ing. Mario Villacrés DIRECTOR ESC. ING. QUIM. | _____ | _____ |
| Ing. José Usiña DIRECTOR DE TESIS | _____ | _____ |
| Ing. Mónica Andrade MIEMBRO DEL TRIBUNAL | _____ | _____ |
| DIRECTOR CENTRO DOCUMENT. | _____ | _____ |
| NOTA DELA TESIS | _____ | |

Yo, Cristian Geovanny Chávez García soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

AGRADECIMIENTO

La presente investigación refleja los conocimientos adquiridos durante mi vida estudiantil en la Facultad de CIENCIAS de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO y de la ayuda técnica de los docentes de la misma.

Mi agradecimiento sincero y a la vez grato al Ing. JOSE USIÑA, docente de la Facultad de Ciencias, quien me guió para sacar adelante este trabajo, a mi asesora la Ing. MONICA ANDRADE quien supo brindarme orientación durante el tiempo de realización de mi investigación, gracias a su colaboración y apoyo fue posible la realización y finalización de dicha Investigación.

DEDICATORIA

*Este trabajo de investigación va dirigido a mi querida hija **Samantha** quien ha sido la luz que me ha guiado en este camino hacia la excelencia, a mi querida Esposa **Cecilia** quien ha sido mi compañera y apoyo incondicional en todos los retos que me ha puesto la vida y a mis queridos padres **Italo** y **Gladys**, por el apoyo brindado desde mis primeros pasos hasta hoy, gracias a ustedes queridos padres por su comprensión y apoyo a todos ustedes les dedico todo mi esfuerzo.*

CRISTIAN

TABLA DE CONTENIDOS

HOJA DE FIRMAS

AGRADECIMIENTO

DEDICATORIA

HOJA DE RESPONSABILIDAD

| | |
|--|--------|
| RESUMEN..... | I |
| SUMARY..... | II |
| INTRODUCCION..... | III |
| ANTECEDENTES..... | V |
| JUSTIFICACION..... | VII |
| OBJETIVOS..... | IX |
| GENERAL..... | IX |
| ESPECIFICOS..... | IX |
| | |
| 1.-CAPÍTULO I..... | - 10 - |
| 1.1.- MARCO TEORICO..... | - 10 - |
| 1.1.1.-FUNDAMENTOS DE MEDICION DE FLUIDO..... | - 10 - |
| 1.1.1.1.- FLUIDO..... | - 10 - |
| 1.1.1.2.- FLUIDOS INCOMPRESIBLES..... | - 11 - |
| 1.1.1.3.-MEDICIÓN DE FLUJO..... | -12- |
| 1.1.2.-PROPIEDADES PRIMARIAS O TERMODINÁMICAS..... | -12- |
| 1.1.2.1.-PRESION..... | -12- |
| 1.1.2.2.-DENSIDAD..... | -13- |
| 1.1.2.3.-TEMPERATURA..... | - 13 - |
| 1.1.2.4.-ENERGÍA INTERNA..... | - 15 - |
| 1.1.2.5.-ENTALPÍA ESTÁNDAR O NORMAL..... | -15- |
| 1.1.2.6.- ENTROPÍA..... | - 16 - |
| 1.1.2.7.-CALOR ESPECÍFICO..... | - 16 - |

| | |
|---|--------|
| 1.1.2.8.-VISCOSIDAD..... | - 17 - |
| 1.1.3.-PROPIEDADES SECUNDARIAS..... | - 17 - |
| 1.1.3.1.-COMPRESIÓN Y EXPANSIÓN..... | - 17 - |
| 1.1.3.2.-DIFUSIÓN..... | - 18 - |
| 1.1.3.3.-FORMA Y VOLUMEN..... | - 19 - |
| 1.1.3.4.-VISCOSIDAD..... | - 19 - |
| 1.1.3.5.-FLUJO EN TUBERIAS..... | - 20 - |
| 1.1.3.-MEDIDORES DE FLUJO..... | - 24 - |
| 1.1.3.1.-MEDIDORES DE CAUDAL..... | - 25 - |
| 1.1.3.2.-CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS MEDIDORES DE FLUJO..... | - 26 - |
| 1.1.3.3.-MEDIDORES VOLUMÉTRICOS..... | - 28 - |
| 1.1.3.3.1.-MEDIDOR TIPO TURBINA..... | - 30 - |
| 1.1.3.3.2.-MEDIDOR MAGNÉTICO..... | - 33 - |
| 1.1.3.3.3.-MEDIDOR DE ÁREA VARIABLE..... | - 37 - |
| 1.1.3.3.4.-MEDIDOR DE FLUJO MÁSSICO TIPO CORIOLIS..... | - 38 - |
| 1.1.3.3.5.-MEDIDORES DE FLUJO POR PRESION DIFERENCIAL..... | - 40 - |
| 1.1.4.-PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO..... | - 40 - |
| 1.1.4.1.-PLACA DE ORIFICIO..... | - 41 - |
| 1.1.4.2.-TOBERA..... | - 45 - |
| 1.1.4.2.1.-TOBERA DE LAVAL..... | - 45 - |
| 1.1.4.3.-TUBO VENTURI..... | - 47 - |
| 1.1.4.4.-TUBO PITOT..... | - 49 - |
| 1.1.4.5.-TUBO ANNUBAR..... | - 50 - |
| 1.1.5.-VELOCIDAD..... | - 52 - |
| 1.1.5.1.-TURBINAS..... | - 52 - |
| 1.1.6.-MEDIDORES CAUDAL MASA..... | - 53 - |
| 1.1.4.7.-MEDICIÓN DIRECTA DE CAUDAL MASA..... | - 53 - |
| 1.1.4.8.-MEDIDORES TÉRMICOS DE CAUDAL..... | - 53 - |
| 1.2.-CONTROL DE PROCESOS..... | - 55 - |
| 1.2.1.-AUTOMATIZACIÓN..... | - 60 - |

| | |
|--|--------|
| 1.2.2.-CONTROL DISTRIBUIDO..... | - 60 - |
| 1.2.3.-CONTROL EN LAZO CERRADO (FEEDBACK)..... | - 61 - |
| 1.2.4.-CONTROL MANUAL..... | - 61 - |
| 1.2.5.-CONTROL TODO-NADA..... | - 61 - |
| 1.2.6.-CONTROLADOR..... | - 61 - |
| 1.2.7.-CONTROLADOR PROGRAMABLE..... | - 62 - |
| 1.2.8.-DERIVA..... | - 62 - |
| 1.2.9.-ELEMENTO FINAL DE CONTROL..... | - 62 - |
| 1.3.-SISTEMAS DE CONTROL..... | - 62 - |
| 1.3.1.-SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO..... | - 62 - |
| 1.3.1.1.-SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO..... | - 63 - |
| 1.3.1.2.-SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO ABIERTO..... | - 64 - |
| 1.3.1.3.-COMPARACIÓN ENTRE ESTOS DOS TIPOS DE SISTEMAS..... | - 64 - |
| 1.3.1.4.-COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONTROL..... | - 66 - |
| 1.3.1.4.1.-SENSOR-TRANSMISOR..... | - 66 - |
| 1.3.1.4.2.-CONTROLADOR..... | - 67 - |
| 1.3.1.4.3.-ELEMENTO FINAL DE CONTROL..... | - 67 - |
| 1.3.1.4.4.-ACTUADOR..... | - 68 - |
| 1.3.1.5.-CUERPO DE LA VÁLVULA..... | - 69 - |
| 1.3.1.5.-CARACTERÍSTICAS DE FLUJO DE LAS VALVULAS..... | - 70 - |
| 1.3.1.5.1.- CARACTERÍSTICAS DE FLUJO INHERENTE..... | - 71 - |
| 1.3.1.5.2.- CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DE INSTALACIÓN..... | - 71 - |
| 1.3.1.5.3.- DIMENSIONAMIENTO DE LA VALVULA DE CONTROL..... | - 72 - |
| 1.3.1.5.4.-GANANCIA DE LAS VALVULAS..... | - 73 - |
| 1.3.2.-ALGUNAS APLICACIONES DEL CONTROL DE CAUDAL DE LÍQUIDOS..... | - 74 - |
| 1.3.2.1.-EN TRATAMIENTO DE AGUAS..... | - 74 - |
| 1.3.2.1.-EN LA INDUSTRIA DE PROCESOS..... | - 75 - |
| 1.3.2.3.-INDUSTRIA ALIMENTARIA..... | - 75 - |
| 1.4.- DISEÑO..... | - 76 - |
| 1.4.1.-BALANCE DE MASA PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE CAUDAL..... | - 79 - |

| | |
|--|---------|
| 1.4.2.-ESTRUCTURA METALICA..... | - 83 - |
| 1.4.3.-TANQUE DE ALMACENAMIENTO..... | - 84 - |
| 1.4.4.-BOMBA..... | - 85 - |
| 1.4.5.-SENSOR DE FLUJO DE AGUA..... | - 86 - |
| 1.4.6.-TUBERIA PVC..... | - 88 - |
| 1.4.7.-ACCESORIOS..... | - 89 - |
| 1.4.7.1.-CODOS. | - 89 - |
| 1.4.7.2.-REDUCCIÓN BUSHING. | - 89 - |
| 1.4.7.3.-UNIÓN UNIVERSAL. | - 89 - |
| 1.4.7.4.-VÁLVULAS DE ESFERA O BOLA..... | - 89 - |
| 1.4.7.5.-TAPÓN..... | - 89 - |
| 1.4.8.-PANEL DE CONTROL..... | - 90 - |
| 1.5.- DIAGNOSTICO..... | - 92 - |
| CAPÍTULO II..... | - 93 - |
| 2.-DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN: | - 93 - |
| 2.1.-PARTE EXPERIMENTAL. | - 93 - |
| 2.1.1.-MUESTREO..... | - 93 - |
| 2.1.2.-METODOLOGIA..... | - 94 - |
| 2.1.2.1.- METODOS Y TÉCNICAS..... | - 94 - |
| 2.1.2.1.1.- METODOS..... | - 95 - |
| 2.1.2.1.2.-TECNICAS..... | - 95 - |
| 2.2.-DATOS EXPERIMENTALES..... | - 98 - |
| 2.2.1.-DATOS PARA LA BOMBA..... | - 98 - |
| 2.2.2.- DATOS DEL SENSOR DE FLUJO..... | - 101 - |
| 2.3.-DATOS ADICIONALES..... | - 102 - |
| CAPITULO III..... | - 103 - |
| 3.-DISEÑO..... | - 103 - |
| 3.1.-CALCULOS..... | - 103 - |
| 3.1.1.- CALCULOS REALIZADOS PARA EL DISEÑO DE LOS TANQUES..... | - 103 - |
| 3.1.1.1.- TANQUE DE ALMACENAMIENTO..... | - 103 - |

| | |
|--|---------|
| 3.1.2.-BOMBA..... | - 104 - |
| 3.1.3.- CALCULO REALIZADOS PARA LA VALVULA..... | - 105 - |
| 3.1.4.- CALCULOS REALIZADOS PARA EL SENSOR..... | - 106 - |
| 3.1.5.- CÁLCULOS REALIZADOS A LA BOMBA. | - 107 - |
| 3.1.6.- CÁLCULOS REALIZADOS AL SENSOR. | - 108 - |
| 3.1.7.- CÁLCULOS GENERALES REALIZADOS AL EQUIPO. | - 109 - |
| 3.1.9.- CÁLCULOS REALIZADOS DE LA INVERSIÓN. | - 109 - |
| 3.2.- RESULTADOS..... | - 112 - |
| 3.2.1.- RESULTADOS OBTENIDOS DEL CÁLCULO DE DISEÑO..... | - 112 - |
| 3.2.2.- CURVAS OBTENIDAS CON LOS DATOS ADQUIRIDOS PARA LA BOMBA..... | - 112 - |
| 3.2.6.- RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS CALCULOS GENERALES..... | - 113 - |
| 3.3.-ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | - 114 - |
| CAPITULO IV..... | - 115 - |
| 4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | - 115 - |
| 4.1.- CONCLUSIONES..... | - 115 - |
| 4.2.- RECOMENDACIONES..... | - 117 - |
| 4.3.- BIBLIOGRAFIA..... | - 118 - |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|--------|
| 1.1.3.5 COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE TUBERÍA..... | - 21 - |
| 1.1.3.6 REGIÓN DE ENTRADA, FLUJO EN DESARROLLO Y FLUJO TOTALMENTE DESARROLLADO EN UN SISTEMA DE TUBERÍA..... | - 24 - |
| 1.1.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MEDIDORES DE FLUJO SEGÚN SU PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO | - 27 - |
| 1.1.3.3.2 INSTALACIÓN RECOMENDADA DE UN MEDIDOR DE FLUJO TIPO TURBINA | - 33 - |
| 1.1.3.3.3 ELEMENTO MAGNÉTICO DE MEDIDA DE UN MEDIDOR DE FLUJO MAGNÉTICO..... | - 35 - |
| 1.1.3.3.5 MEDIDOR DE CORIOLIS..... | - 39 - |
| 1.1.4 DIFERENCIA DE PRESIONES PROVOCADA POR UN ESTRECHAMIENTO EN LA TUBERÍA..... | - 40 - |
| 1.1.4 PRINCIPIO DE BERNOULLI..... | - 41 - |
| 1.1.4.1 PLACA DE ORIFICIO..... | - 42 - |
| 1.1.4.2 GEOMETRÍA NORMALIZADA DE LA PLACA DE ORIFICIO..... | - 44 - |
| 1.1.4.2.1 GEOMETRÍA NORMALIZADA DE LA TOBERA ASME..... | - 47 - |
| 1.1.4.3 GEOMETRÍA NORMALIZADA DEL TUBO VENTURI..... | - 49 - |
| 1.1.4.4 TUBO PITOT..... | - 50 - |
| 1.1.4.5. TUBO ANNUBAR..... | - 51 - |
| 1.1.8 MEDIDOR TÉRMICO..... | - 54 - |
| 1.3.1.2 SISTEMA DE CONTROL DE LASO CERRADO..... | - 63 - |

| | |
|--|--------|
| 1.3.1.2 SISTEMA DE CONTROL EN LASO ABIERTO..... | - 64 - |
| 1.3.1.4.5 ACTUADOR DE UNA VÁLVULA DE CONTROL..... | - 68 - |
| 1.3.1.4.6 PARTES DE UNA VÁLVULA DE CONTROL..... | - 67 - |
| 1.3.1.4.6 VÁLVULAS DE CONTROL PARA FLUIDOS INCOMPRESIBLES..... | - 69 - |
| 1.3.2.3 MEDIDOR DE CAUDAL..... | - 76 - |
| 1.4 DISEÑO TRIDIMENSIONAL DEL EQUIPO..... | - 77 - |
| 1.3.1 ESTRUCTURA METÁLICA..... | - 84 - |
| 1.3.3 TANQUE DE ALMACENAMIENTO..... | - 85 - |
| 1.3.4 BOMBA DE AGUA..... | - 86 - |
| 1.3.5 SENSOR DE FLUJO DE AGUA..... | - 88 - |
| 1.3.6 TUBERÍA PVC..... | - 88 - |
| 1.3.7 ACCESORIOS PVC..... | - 90 - |
| 1.3.8 VARIADOR..... | - 91 - |
| 1.3.8 PLC..... | - 91 - |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|---------|
| 2.2.1 DATOS DE CAUDAL EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR FRECUENCIA (HZ)..... | - 99 - |
| 2.2.1-2 DATOS DE VOLUMEN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO..... | - 100 - |
| 2.2.2 DATOS DE CAUDAL EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD CON PROMEDIO DE PULSOS..... | - 101 - |
| 2.3-1 DATOS ADICIONALES..... | - 102 - |
| 3.1.5-1CAUDAL EN FUNCIÓN DEL TIEMPO..... | - 107 - |
| 3.1.9-1COSTO DE MATERIALES UTILIZADOS PARA EL ENSAMBLAJE DEL EQUIPO..... | - 110 - |
| 3.1.9-2 GASTOS OPERACIONALES DEL EQUIPO..... | - 111 - |
| 3.1.9-3 RECURSOS MATERIALES..... | - 111 - |
| 3.2.1RESULTADOS OBTENIDOS DEL CÁLCULO DE DISEÑO..... | - 112 - |
| 3.2.2 DATOS ADQUIRIDOS PARA LA BOMBA..... | - 113 - |

INDICE DE GRAFICAS

| | |
|---|---------|
| 1. 2.3 RELACIÓN VELOCIDAD FRECUENCIA DE LA BOMBA..... | - 98 - |
| 2.2.1-2DATOS DE VOLUMEN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO..... | - 100 - |
| 3.2.2 DATOS ADQUIRIDOS PARA LA BOMBA..... | - 113 - |

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

| | |
|-----------------|--|
| cm | Centímetros |
| cm ³ | centímetro cúbico |
| fig. | Figura |
| g | Gramos |
| ISO | Organización Internacional para la Estandarización |
| Kg | Kilogramos |
| mm | Milímetros |
| m ² | Metros cuadrados |
| m ³ | metros cúbicos |
| °c | Grados centígrados |
| s | Segundos |
| ρ | Densidad (kg/m ³) |
| % | Porcentaje |
| Q | caudal (L/s) |
| A | área (m ²) |
| H | altura (m) |
| a | ancho (cm) |
| l | largo (cm) |

| | |
|------------|--|
| ΔP | diferencia de presión (Psi) |
| C_v | es el flujo de agua a 15oC en gal/min que pasa a través de una válvula completamente abierta y con una caída de presión de 1Psi. |
| G | gravedad especifica del fluido que pasa a través de la válvula.(m/s ²) |
| Y | función de compresibilidad. |
| T | temperatura a la que se encuentra el líquido. (°C) |
| K_v | ganancia de la válvula |
| F | flujo (L/s) |
| Δ | diferencial derivativo |
| £ | Transformada de La Place |
| K_P | kilo Pascales |
| R | rango (adimensional) |
| $F_i(s)$ | flujo de entrada (L/s) |
| K_1 | ganancia o sensibilidad del proceso |
| C_1 | relaciona la constante de la válvula con la altura |
| A_1 | área del tanque de medida (m ²) |
| dd | Constante de tiempo del proceso se relaciona con la velocidad de respuesta.(1/s) |
| L | litros |

RESUMEN

Se diseñó y construyó un equipo para medir el control del caudal de líquidos para el laboratorio de control de procesos de la facultad de ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, para uso de los estudiantes como material didáctico e investigativo. En el laboratorio de control de procesos no existía un equipo que permitiera controlar una variable de proceso, iniciando con ello la realización del proyecto.

Se abordaron aspectos teóricos necesarios para comprender la operación del equipo, para la identificación de la planta se diseñó una etapa de experimentación, en la cual se definió la variable a medirse y la señal estímulo a ser aplicada al sistema.

Se identificó los principales componentes del control de procesos: sensor-transmisor que será el encargado de realizar la medición en el sistema de control y transmitirá el valor de transmisión correspondiente, el controlador será el cerebro del sistema de control y el elemento final de control que en este equipo será la bomba, debido a que desde aquí se presentaran las diferentes velocidades de fluido aplicarse al sistema.

El muestreo que se realizó fue aleatorio simple en periodos de tiempo, sin afectar la hora en la que se dio el mismo ya que con este equipo se pudo tomar directamente las variables que se necesitaron. Como resultado de la investigación se obtuvo un equipo automatizado con capacidad de controlar al sensor de flujo.

De todo el proceso de selección y funcionamiento del medidor, se pudo concluir que el equipo dio los resultados de eficiencia global del 90% de su capacidad total y con los materiales utilizados sabemos que será de gran utilidad para prácticas posteriores en la Facultad. Se recomienda implementar equipos como este, ya que como material didáctico que tiene miras hacia el futuro de los estudiantes. Además el equipo podrá ser utilizado en diferentes facultades ya que cuentan con una programación de prácticas de laboratorio. Además se recomienda tomar varias mediciones para realizar un mejor cálculo en las prácticas de laboratorio.

SUMMARY

An equipment to measure and control the amount of liquids for the processes control laboratory of Science Faculty at Escuela Superior Politecnica de Chimborazo has been designed and constructed, so that students can use it as a didactic and research material since there wasn't any one equipment which controls a process variable.

Theoretical aspects were studied to understand the equipment working; to identify the unit, an experimental study was designed to define the variable to be measured and the signal stimulus to be applied to the system.

The main components of the process control were identified: sensor - transmitter will be in charge of the measurement in the control system and transmit the corresponding transmission value, the controller will be the brain of this system and the pump will show the different speeds of fluid applied to the system.

Sampling was at random simple in periods of time without changing the time of it because with this equipment the variables could be taken directly. As a result from the research, an automatic equipment to control the sensor of flow was gotten.

From the selection process and gauge operation, it is concluded that the equipment got efficient results up to 90% of its total capacity. The materials which were used will be useful to experience at the Faculty. It is recommended to implement equipment like this one which can serve as a didactic material for the students. In addition, it will be able to be used in different faculties because it has laboratory practice programming. It is also recommended to take several steps to carry out a better calculus in the laboratory practices.

INTRODUCCIÓN

En todo proceso industrial se manejan variables como temperatura, flujo de fluido, presión, pH entre otras. Estas variables influyen decisivamente en el funcionamiento correcto del proceso y en el producto final, por ello es necesario monitorearlas constantemente y controlar su magnitud de lo contrario no cumplirá con la calidad requerida.

El flujo de fluidos se puede encontrar en gran porcentaje de procesos industriales ya que se presenta como una variable a controlar, por ejemplo en la mezcla de componentes líquidos bajo una determinada concentración de cada uno. Por esta razón es necesario que los ingenieros estén bien capacitados sobre las características de los fluidos y la forma en que se realiza la medición de flujo para su posterior control.

En la actualidad el uso de métodos basados en controles a través de paneles de mando o software ya sea para monitoreo o control de dichos sistemas de manera manual o automatizada. El tema que aquí se presenta se denomina diseño y construcción de un equipo para control de caudal de líquidos, el objetivo principal de este trabajo es la creación de un módulo o equipo en el cual se facilite el estudio de sistemas reales de instrumentación y control mediante el uso de sensores.

Específicamente con este trabajo se pretende la implementación de medios para la realización de pruebas de adquisición y generación de datos, manejando interfaces entre un medio real y un medio computarizado, lo cual permita el monitoreo y control de variables físicas reales.

Para llevar a cabo estos objetivos se plantea la creación de un equipo de control de caudal en el cual se desarrolla un ambiente propicio para la medición de una variable física (caudal), uso de controladores, y manejo de equipos para control.

El procedimiento que se seguirá dentro de la realización de este trabajo comprende la correcta selección de equipos para el diseño y construcción de la planta, el análisis del comportamiento de esta mediante la identificación del modelo que la rige, para controlar su funcionamiento y comprobación de este.

La metodología que se utiliza es un muestreo simple con el cual se toma datos de acuerdo a las necesidades que se tenga, sin tener un horario fijo para ser tomadas.

El equipo de control de caudal de líquidos cumple con las expectativas planteadas debido a la facilidad de manipulación y a la facilidad con la que se puede adquirir datos para su posterior interpretación.

ANTECEDENTES

La ingeniería química es una rama de la ingeniería, que se encarga del diseño, manutención, evaluación, optimización, simulación, planificación, construcción y operación de plantas en la industria de procesos, que es aquella relacionada con la producción de compuestos y productos cuya elaboración requiere de sofisticadas transformaciones físicas y químicas de la materia.

La ingeniería química también se enfoca al diseño de nuevos materiales y tecnologías, es una forma importante de investigación y de desarrollo. Además es líder en el campo ambiental, ya que contribuye al diseño de procesos ambientalmente amigables y procesos para la descontaminación del medio ambiente.

La ingeniería química se fundamenta en las ciencias básicas como matemática (álgebra lineal o superior, cálculo, ecuaciones diferenciales, métodos numéricos, matemática avanzada), las ciencias básicas de la ingeniería química (termodinámica, fenómenos de transporte, cinética química), y disciplinas aplicadas tales como ingeniería de procesos, diseño de reactores, diseño de equipos para procesos químicos, y procesos de separación.

También se van incorporando elementos de ciencias ambientales, biotecnología, ingeniería de alimentos e ingeniería de materiales.

En el Ecuador a nivel de la provincia de Chimborazo se encuentra ubicada dicha carrera en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, inicialmente en el año de 1999 se formaliza esta Ingeniería brindando a las diferentes provincias de nuestro país la oportunidad de formarse en una carrera con fines tecnológicos y buscar en las diferentes áreas que esta encierra la solución a muchas incógnitas de nuestra vida cotidiana.

Por esta razón el Ingeniero Químico tiene el deber de implementar gracias a su amplio conocimiento en procesos, diseño, construcción, automatización, etc., equipos que ayuden a las futuras generaciones a enriquecerse del conocimiento de estas, de esta manera dejamos nuestro aporte a la carrera que nos ha dado la oportunidad de desarrollarnos en el campo laboral como excelentes profesionales.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la industria posee cada vez procesos productivos más automatizados, complejos y en los que coexisten una gran diversidad de elementos: PLCs, computadores, accionamientos neumáticos o eléctricos, etc. Esto dio lugar a la aparición de los sistemas de producción flexibles que proporcionan respuestas rápidas al mercado fuertemente cambiante de hoy en día.

Como resultado de todas estas necesidades se originaron los llamados sistemas de control "inteligentes" basados en conceptos de: descentralización, autonomía, monitorización, los mismos que han llevado a todas las entidades e instituciones, que están vinculados con el campo tecnológico a incursionar en la investigación del desarrollo industrial es por eso que en los laboratorios de la Facultad de Ciencias existen varios equipos con los cuales los estudiantes en su etapa de formación académica van adquiriendo sus conocimientos en la parte práctica.

Sin embargo no tenemos un equipo para laboratorio de control de procesos, por lo que es necesario diseñar y construir un equipo para control de caudal de líquidos con la finalidad de representar en parte uno de estos procesos y obtener una aplicación real realizando acciones de control sobre el caudal , de esta manera incentivaremos a que los estudiantes tengan una mayor motivación en este tipo de tecnologías logrando satisfacer las investigaciones que a este tema se refieren, y contribuyan a mejorar la calidad de la enseñanza y el bienestar de los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias con el conocimiento sobre la importancia que implica la aplicación de un equipo de control de

procesos industriales que facilite la comprobación de manera práctica de estos fenómenos, se ve la necesidad de realizar esta investigación para que un equipo de estas características sea utilizado como patrón para procesos a nivel industrial, mismo que servirá también para el avance y desarrollo práctico, productivo y científico del intelecto de los alumnos de Ingeniería Química.

OBJETIVOS

GENERAL.

- Diseñar y construir un equipo para medir el control del caudal de líquidos.

ESPECÍFICOS.

- Identificar las variables de proceso que involucran controlar el caudal de líquidos dentro de un tanque.
- Plantear los cálculos de ingeniería para el módulo de control de caudal de líquidos, en base a las variables de proceso identificadas.
- Determinar la capacidad o dimensionamiento del equipo para poder controlar el caudal de un líquido.
- Determinar el tipo de materiales y controles del equipo de control de caudal para su correcta utilización.
- Determinar requerimiento presupuestario de las partes y componentes del equipo de control de nivel.
- Construir y ensamblar el equipo en base al diseño de ingeniería y a los requerimientos establecidos.
- Realizar pruebas en el laboratorio sobre el funcionamiento del equipo.

CAPITULO 1

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 FUNDAMENTOS DE MEDICION DE FLUIDO

En este capítulo se abordan los aspectos teóricos necesarios para comprender el principio de funcionamiento de los medidores de flujo. También se muestra las propiedades más importantes de los líquidos tales como la densidad, viscosidad, presión de vapor, entre otras. Por otro lado se presentan algunos aspectos de la dinámica de los fluidos tales como la ecuación de la continuidad y la ecuación de Bernoulli. Finalmente se presentan algunos conceptos de métodos de control de fluidos.

1.1.1.1 FLUIDO

Se denomina fluido a un tipo de medio continuo formado por alguna sustancia entre cuyas moléculas sólo hay una fuerza de atracción débil. La propiedad definitoria es que los fluidos pueden cambiar de forma sin que aparezcan en su seno fuerzas restitutivas tendentes a recuperar la forma "original" (lo cual constituye la principal diferencia con un sólido deformable, donde sí hay fuerzas restitutivas).

Un fluido es un conjunto de partículas que se mantienen unidas entre si por fuerzas cohesivas débiles y las paredes de un recipiente; el término engloba a los líquidos y los gases. En el cambio de forma de un fluido la posición que toman sus moléculas varía, ante

una fuerza aplicada sobre ellos, pues justamente fluyen. Los líquidos toman la forma del recipiente que los aloja, manteniendo su propio volumen, mientras que los gases carecen tanto de volumen como de forma propia. Las moléculas no cohesionadas se deslizan en los líquidos, y se mueven con libertad en los gases. Los fluidos están conformados por los líquidos y los gases, siendo los segundos mucho menos viscosos (casi fluidos ideales).

Es una sustancia o medio continuo que se deforma continuamente en el tiempo ante la aplicación de una tensión tangencial sin importar la magnitud de ésta. En un sistema de partículas que, a diferencia de los sólidos, no están unidas rígidamente y pueden moverse con una cierta libertad con respecto de las otras.

1.1.1.2 FLUIDOS INCOMPRESIBLES

Un fluido incompresible es cualquier fluido cuya densidad siempre permanece constante con el tiempo, y tiene la capacidad de oponerse a la compresión del mismo bajo cualquier condición. Estos flujos cumplen el llamado teorema de Bernoulli, enunciado por el matemático y científico suizo Daniel Bernoulli. El teorema afirma que la energía mecánica total de un flujo incompresible y no viscoso (sin rozamiento) es constante a lo largo de una línea de corriente.

Las líneas de corriente son líneas de flujo imaginarias que siempre son paralelas a la dirección del flujo en cada punto, y en el caso de flujo uniforme coinciden con la trayectoria de las partículas individuales de fluido. El teorema de Bernoulli implica una

relación entre los efectos de la presión, la velocidad y la gravedad, e indica que la velocidad aumenta cuando la presión disminuye.

1.1.1.3 MEDICIÓN DE FLUJO

La medición de flujo es la acción de medir la velocidad, el flujo volumétrico o el flujo másico de cualquier líquido o gas. La Medición de flujo es una función importante dentro de cualquier organización, empresa, industria, o cualquier otro medio que emplee fluidos para realizar sus operaciones regulares.

1.1.2. PROPIEDADES PRIMARIAS O TERMODINÁMICAS:

1.1.2.1. PRESION

La presión (símbolo p)^{1 2} es una magnitud física que mide la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie, y sirve para caracterizar cómo se aplica una determinada fuerza resultante sobre una línea. En el Sistema Internacional de Unidades la presión se mide en una unidad derivada que se denomina pascal (Pa) que es equivalente a una fuerza total de un newton actuando uniformemente en un metro cuadrado. En el Sistema Inglés la presión se mide en libra por pulgada cuadrada (pound per square inch o psi) que es equivalente a una fuerza total de una libra actuando en una pulgada cuadrada.

1.1.2.2. DENSIDAD

En física y química, la densidad (símbolo ρ) es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia. La densidad media es la razón entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa.

1.1.2.3. TEMPERATURA

La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de caliente, tibio o frío que puede ser medida con un termómetro. En física, se define como una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica.

Más específicamente, está relacionada directamente con la parte de la energía interna conocida como «energía cinética», que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, sea en un sentido traslacional, rotacional, o en forma de vibraciones. A medida de que sea mayor la energía cinética de un sistema, se observa que éste se encuentra más «caliente»; es decir, que su temperatura es mayor.

En el caso de un sólido, los movimientos en cuestión resultan ser las vibraciones de las partículas en sus sitios dentro del sólido. En el caso de un gas ideal monoatómico se trata de los movimientos traslacionales de sus partículas (para los gases multiatómicos los movimientos rotacional y vibracional deben tomarse en cuenta también).

El desarrollo de técnicas para la medición de la temperatura ha pasado por un largo proceso histórico, ya que es necesario darle un valor numérico a una idea intuitiva como es lo frío o lo caliente.

Multitud de propiedades fisicoquímicas de los materiales o las sustancias varían en función de la temperatura a la que se encuentren, como por ejemplo su estado (sólido, líquido, gaseoso, plasma), su volumen, la solubilidad, la presión de vapor, su color o la conductividad eléctrica. Así mismo es uno de los factores que influyen en la velocidad a la que tienen lugar las reacciones químicas.

La temperatura se mide con termómetros, los cuales pueden ser calibrados de acuerdo a una multitud de escalas que dan lugar a unidades de medición de la temperatura. En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de temperatura es el kelvin (K), y la escala correspondiente es la escala Kelvin o escala absoluta, que asocia el valor «cero kelvin» (0 K) al «cero absoluto», y se gradúa con un tamaño de grado igual al del grado Celsius.

Sin embargo, fuera del ámbito científico el uso de otras escalas de temperatura es común. La escala más extendida es la escala Celsius, llamada «centígrada»; y, en mucha menor medida, y prácticamente sólo en los Estados Unidos, la escala Fahrenheit. También se usa a veces la escala Rankine ($^{\circ}\text{R}$) que establece su punto de referencia en el mismo punto de la escala Kelvin, el cero absoluto, pero con un tamaño de grado igual al de la Fahrenheit, y es usada únicamente en Estados Unidos, y sólo en algunos campos de la ingeniería.

1.1.2.4. ENERGÍA INTERNA

En física, la **energía interna** (U) de un sistema intenta ser un reflejo de la energía a escala macroscópica. Más concretamente, es la suma de:

- ✓ **la energía cinética interna**, es decir, de las sumas de las energías cinéticas de las individualidades que lo forman respecto al centro de masas del sistema.
- ✓ **la energía potencial interna**, que es la energía potencial asociada a las interacciones entre estas individualidades.

La energía interna no incluye la energía cinética traslacional o rotacional del sistema como un todo. Tampoco incluye la energía potencial que el cuerpo pueda tener por su localización en un campo gravitacional o electrostático externo.

1.1.2.5. ENTALPÍA ESTÁNDAR O NORMAL

La variación de la entalpía estándar (denotada como H^0 o H^0) es la variación de entalpía que ocurre en un sistema cuando una unidad equivalente de materia se transforma mediante una reacción química bajo condiciones normales. Sus unidades son los kJ/mol en el sistema internacional.

Una variación de la entalpía estándar de una reacción común es la variación de la entalpía estándar de formación, que ha sido determinada para una gran cantidad de sustancias. La variación de entalpía de cualquier reacción bajo cualesquiera condiciones se puede computar, obteniéndose la variación de entalpía de formación de todos los reactivos y productos.

Otras reacciones con variaciones de entalpía estándar son la combustión (variación de la entalpía estándar de combustión) y la neutralización (variación de la entalpía estándar de neutralización).

1.1.2.6. ENTROPÍA

En termodinámica, la **entropía** (simbolizada como S) es una magnitud física que, mediante cálculo, permite determinar la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo. Es una función de estado de carácter extensivo y su valor, en un sistema aislado, crece en el transcurso de un proceso que se dé de forma natural.

La entropía describe lo irreversible de los sistemas termodinámicos. La palabra *entropía* procede del griego (ἐντροπία) y significa evolución o transformación. Fue Rudolf Clausius quien le dio nombre y la desarrolló durante la década de 1850;^{1 2} y Ludwig Boltzmann, quien encontró la manera de expresar matemáticamente este concepto, desde el punto de vista de la probabilidad.³

1.1.2.7. CALOR ESPECÍFICO

El calor específico es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad. En general, el valor del calor específico depende del valor de la temperatura inicial.^{1 2} Se le representa con la letra c (minúscula).

De forma análoga, se define la capacidad calorífica como la cantidad de calor que hay que suministrar a toda la masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad (kelvin o grado Celsius). Se la representa con la letra C .

1.1.2.8. VISCOSIDAD

La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales, es debida a las fuerzas de cohesión moleculares. Todos los fluidos conocidos presentan algo de viscosidad, siendo el modelo de viscosidad nula una aproximación bastante buena para ciertas aplicaciones. Un fluido que no tiene viscosidad se llama fluido ideal.

La viscosidad sólo se manifiesta en líquidos en movimiento, se ha definido la viscosidad como la relación existente entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Esta viscosidad recibe el nombre de viscosidad absoluta o viscosidad dinámica. Generalmente se representa por la letra griega μ .

1.1.3. PROPIEDADES SECUNDARIAS

1.1.3.1 COMPRESIÓN Y EXPANSIÓN

A los líquidos se les considera incomprensibles debido que dentro de ellos existen fuerzas extremas que entre sus moléculas las cuales se atraen, por otra parte cuando a un líquido se le aplica una presión su volumen no se ve afectado en gran cantidad, ya que sus moléculas tienen poco espacio entre si; por otra parte si aplicamos un cambio de temperatura a un líquido su volumen no sufrirá cambios considerables.

Cabe señalar que cuando las moléculas de un líquido están en continuo aumento de movimiento es por causa del aumento de alguna temperatura que esté experimentando el mismo lo cual inclina al líquido a aumentar la distancia de sus moléculas, a pesar de esto las fuerzas de atracción que existen en el líquido se oponen a ese distanciamiento de sus moléculas.

1.1.3.2 DIFUSIÓN

Al realizar la mezcla de dos líquidos, las moléculas de uno de ellos se difunden en todas las moléculas del otro líquido a mucha menor velocidad, cosa que en los gases no sucede. Si deseamos ver la difusión de dos líquidos, se puede observar dejando caer una pequeña cantidad de tinta (china) en un poco de agua.

Debido a que las moléculas en ambos líquidos están muy cerca, cada molécula conlleva una inmensidad de choques antes de alejarse, puede decirse que millones de choques. La distancia promedio que se genera en los choques se le llama trayectoria libre media y, en los gases es más grande que en los líquidos, cabe señalar que esto sucede cuando las moléculas están bastante separadas.

A pesar de lo que se menciona anteriormente hay constantes interrupciones en sus trayectorias moleculares, por lo que los líquidos se difunden mucho más lentamente que los gases.

1.1.3.3 FORMA Y VOLUMEN

En un líquido, las fuerzas de atracción son suficientemente agudas para limitar a las moléculas en su movimiento dentro de un volumen definido, a pesar de esto las moléculas no pueden guardar un estado fijo, es decir que las moléculas del líquido no permanecen en una sola posición.

De tal forma que las moléculas, dentro de los límites del volumen del líquido, tienen la libertad de moverse unas alrededor de otras, a causa de esto, permiten que fluyan los líquidos. Aun cuando, los líquidos poseen un volumen definido, pero, debido a su capacidad para fluir, su forma depende del contorno del recipiente que los contiene.

1.1.3.4 VISCOSIDAD

Algunos líquidos, literalmente fluyen lentamente, mientras que otros fluyen con facilidad, la resistencia a fluir se conoce con el nombre de viscosidad. Si existe una mayor viscosidad, el líquido fluye más lentamente. Los líquidos como la maleza y el aceite de los motores son relativamente viscosos; el agua y los líquidos orgánicos como el tetracloruro de carbono no lo son.

La viscosidad puede medirse tomando en cuenta el tiempo que transcurre cuando cierta cantidad de un líquido fluye a través de un delgado tubo, bajo la fuerza de la gravedad. En otro método, se utilizan esferas de acero que caen a través de un líquido y se mide la velocidad de caída. Las esferas más lentamente en los líquidos más viscosos.

1.1.3.5 FLUJO EN TUBERIAS

El flujo de fluidos se presenta en la vida cotidiana de las personas y en un enorme porcentaje de los procesos industriales, de ahí viene la importancia de conocer el comportamiento del flujo en tuberías o ductos. El flujo se puede definir de manera concreta como el transporte o movimiento de un fluido a través de un conducto.

El flujo de un fluido se puede controlar por diversas razones como: prolongar la vida de la tubería, estar dentro de los límites de presión de la tubería. La fuerza motriz que moviliza al fluido es una bomba (líquidos) o un compresor (gases). Los conductos varían en geometría, pero de forma general se usan los tubos (conductos de sección transversal redonda), aunque hay conductos de otras secciones transversales (ductos).

En la figura 1.1.3.5 se muestran algunos de los componentes básicos de un sistema de tubos típico. Los componentes incluyen a los tubos mismos, los diversos accesorios usados para conectar a los tubos individuales a fin de formar el sistema deseado, los dispositivos de control de flujo (válvulas) y las bombas o turbinas que agregan o retiran energía del fluido respectivamente.

Si las trayectorias de todas las partículas del fluido en un conducto son paralelas al eje del mismo y si las velocidades de estas partículas son bajas y difieren muy poco en sus valores, se dice que el flujo es laminar o viscoso. Cuando las trayectorias de las partículas que están

fluyendo continuamente difieren una de otra, o cuando las trayectorias no son paralelas al eje de la tubería el flujo es turbulento.

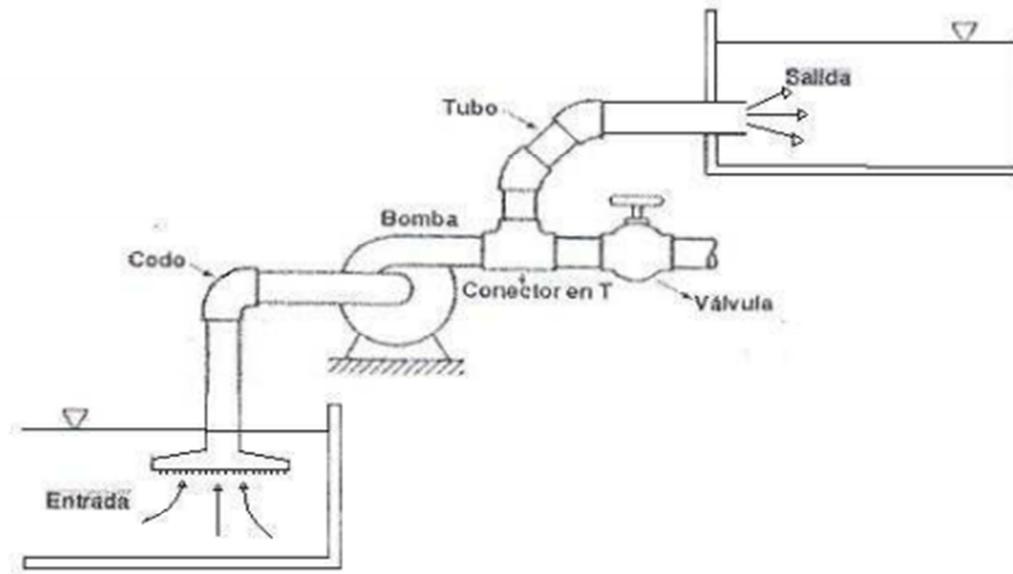


Figura 1.1.3.5 Componentes básicos de un sistema de tubería.

Para flujo en tuberías, el parámetro adimensional más importante es el número de Reynolds, el cual se define como la relación de los efectos inerciales y los efectos viscosos en el flujo, este permite conocer el régimen del fluido

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

El flujo en una tubería es laminar si $Re \leq 2100$, el flujo en una tubería es turbulento si $Re \geq 4000$. Para números de Reynolds entre estos límites, el flujo puede cambiar entre condiciones laminares o turbulentas de manera aparentemente aleatoria (flujo de transición).

La región de flujo cerca del sitio en el que el fluido entra al tubo se denomina región de entrada. Como se muestra en la figura 1.6, el fluido por lo general entra a la tubería con un perfil de velocidad casi uniforme en la sección 1, a medida que el fluido se desplaza por la tubería, los efectos viscosos hacen que se adhiera a la pared de la tubería debido a la condición de no deslizamiento. Lo anterior se cumple sin importar que el fluido sea aire relativamente no viscoso o aceite muy viscoso.

Así, a lo largo de la pared de la tubería se produce una capa límite en donde los efectos viscosos son importantes, de modo que el perfil de velocidad inicial cambia con la distancia a lo largo de la tubería hasta que el fluido llega al final de la longitud de entrada (sección 2) más allá de la cual el perfil de velocidad no varía en la dirección axial.

El grosor de la capa límite ha aumentado hasta llenar por completo la tubería. Los efectos viscosos son considerablemente importantes dentro de la capa límite. Para el fluido fuera de la capa límite (dentro del núcleo no viscoso que rodea la línea central de 1 a 2), los efectos viscosos son insignificantes.

La forma del perfil de velocidad en la tubería y la región de entrada l_e , dependen de si el flujo es laminar o turbulento. Así como con muchas otras propiedades del flujo en tuberías, la longitud de entrada adimensional, l_e/D , se correlaciona con el número de Reynolds.

Las longitudes de entrada características están dadas por:

$$\frac{l_e}{D} = 0.06 Re \quad \text{Para flujo laminar}$$

$$\frac{l_e}{D} = 0.44(Re)^{1/6} \quad \text{Para flujo turbulento}$$

Para flujos con muy bajo número de Reynolds la longitud de entrada puede ser bastante corta ($l_e = 6.0 D$ si $Re = 10$), en tanto que para flujo con un gran número de Reynolds puede asumir una longitud de muchos diámetros de tubería antes de llegar al final de la región de entrada ($l_e = 120D$ si $Re = 2000$). Para muchos problemas prácticos de ingeniería $10^4 < Re < 10^5$, de modo que $20D < l_e < 30D$.

El cálculo del perfil de velocidad y de la distribución de presión dentro de la región de entrada es bastante complejo, sin embargo, una vez que el fluido llega al final de la región de entrada (sección 2 de la figura 1.1.3.6) es más fácil describir el flujo, porque la velocidad es función solo de la distancia a la línea central, r , y es independiente de x . Lo anterior es cierto hasta que la tubería cambia de alguna manera, como un cambio en el diámetro, o el fluido circula a través de un codo, válvula o algún otro componente en la sección 3.

El flujo entre (2) y (3) se denomina totalmente desarrollado. Más allá de la interrupción del flujo totalmente desarrollado (en la sección 4), el flujo comienza gradualmente a regresar a su carácter totalmente desarrollado (sección 5), y continúa con este perfil hasta llegar al siguiente

componente del sistema de tubos (sección 6).

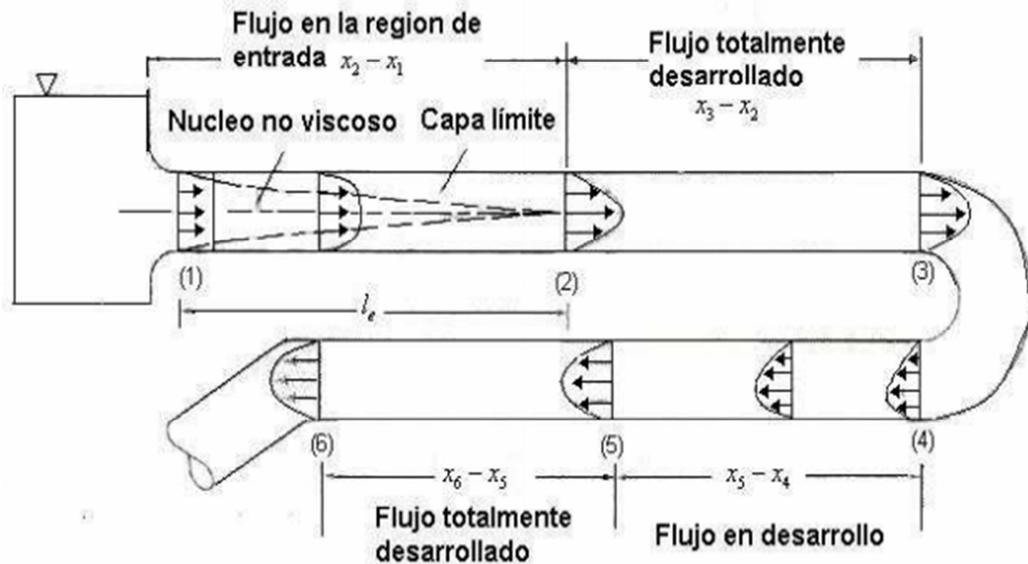


Figura 1.1.3.6 Región de entrada, flujo en desarrollo y flujo totalmente desarrollado en un sistema de tubería.

Gran parte de los medidores de flujo, sobre todo los de presión diferencial requieren que se garantice la condición de flujo desarrollado para que la medición sea confiable.

1.1.3 MEDIDORES DE FLUJO

En este capítulo se proporciona un panorama general de los medidores de flujo, se describe el principio de funcionamiento de los medidores de flujo que se van a incluir en la instalación a calcular, así como sus ventajas, desventajas y aplicaciones.

Se obtiene matemáticamente la ecuación para obtener el flujo a partir de un medidor por presión diferencial. Además, se muestran los aspectos que se deben cubrir para instalar un medidor de flujo por presión diferencial de acuerdo a la norma ISO 51671.

Por último se presentan diferentes consideraciones a tomar en cuenta en la selección de un medidor de flujo.

1.1.3.1 MEDIDORES DE CAUDAL

Los instrumentos de medición y control permiten el mantenimiento y la regulación de magnitudes (presión, caudal, nivel, temperatura, etc.) en condiciones más idóneas de lo que haría el operador.

Se generaliza las aplicaciones de la medición, y se puede clasificar a los tipos de aplicación en tres categorías importantes:

- ✓ Monitoreo de los procesos y operaciones, se dan en situaciones en donde los aparatos de medición se usan para medir cantidades. (Termómetros, barómetros, radares, etc.)
- ✓ Control de los procesos y operaciones, se refiere a un sistema automático de control por retroalimentación; el principio de todos los sistemas de control por retroalimentación establece que se debe medir la variable que se desea controlar, compararla con un valor deseado y con base al error manipular al elemento final de control de tal manera que impulse la variable controlada a alcanzar el valor deseado.

- ✓ Análisis de ingeniería experimental, desarrollo e investigación de ingeniería que se apoya en pruebas de laboratorio de una clase u otra para dar respuesta a preguntas.

En estos tipos de aplicación existen elementos definidos como el elemento de medida, el transmisor, el controlador, el indicador, el registrador y elemento final. La medición de caudal en la industria es de suma importancia, en la gran parte de los procesos existe la necesidad de controlar el caudal, pero para mantener este control lo primero que se debe hacer es medirlo.

Existen diferentes técnicas e instrumentos para medir el caudal, la técnica a utilizar dependerá de la necesidad y condiciones en las cuales se esté. El caudal es una indicación de que tanto fluido en peso o volumen se está moviendo, o sea es que tanta cantidad de fluido esta pasando por un determinado punto dentro de un período específico de tiempo. Para realizar esta medición se utilizan los flujómetros.

En el monitoreo y control de los procesos y operaciones, y además en el análisis de ingeniería experimental es muy importante la medición de los caudales de líquidos o de gases. Existen varios sistemas para medir el caudal según sea el tipo de caudal volumétrico o másico.

1.1.3.2 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS MEDIDORES DE FLUJO

La medición de flujo es un proceso complejo debido a que otras magnitudes tienen una influencia determinante en el comportamiento de los fluidos. Los medidores de flujo se emplean en operaciones tan diversas, como el control de procesos, control en componentes de mezcla, la transferencia de fluidos como el petróleo y sus derivados entre otras. En la mayor parte de las operaciones realizadas en los procesos industriales y en las efectuadas en laboratorio y en plantas piloto es muy importante la medición del flujo de líquidos o de gases. Los elementos primarios de flujo que se usan en la industria se clasifican según su principio de funcionamiento, como se muestra en la figura 1.1.3.2

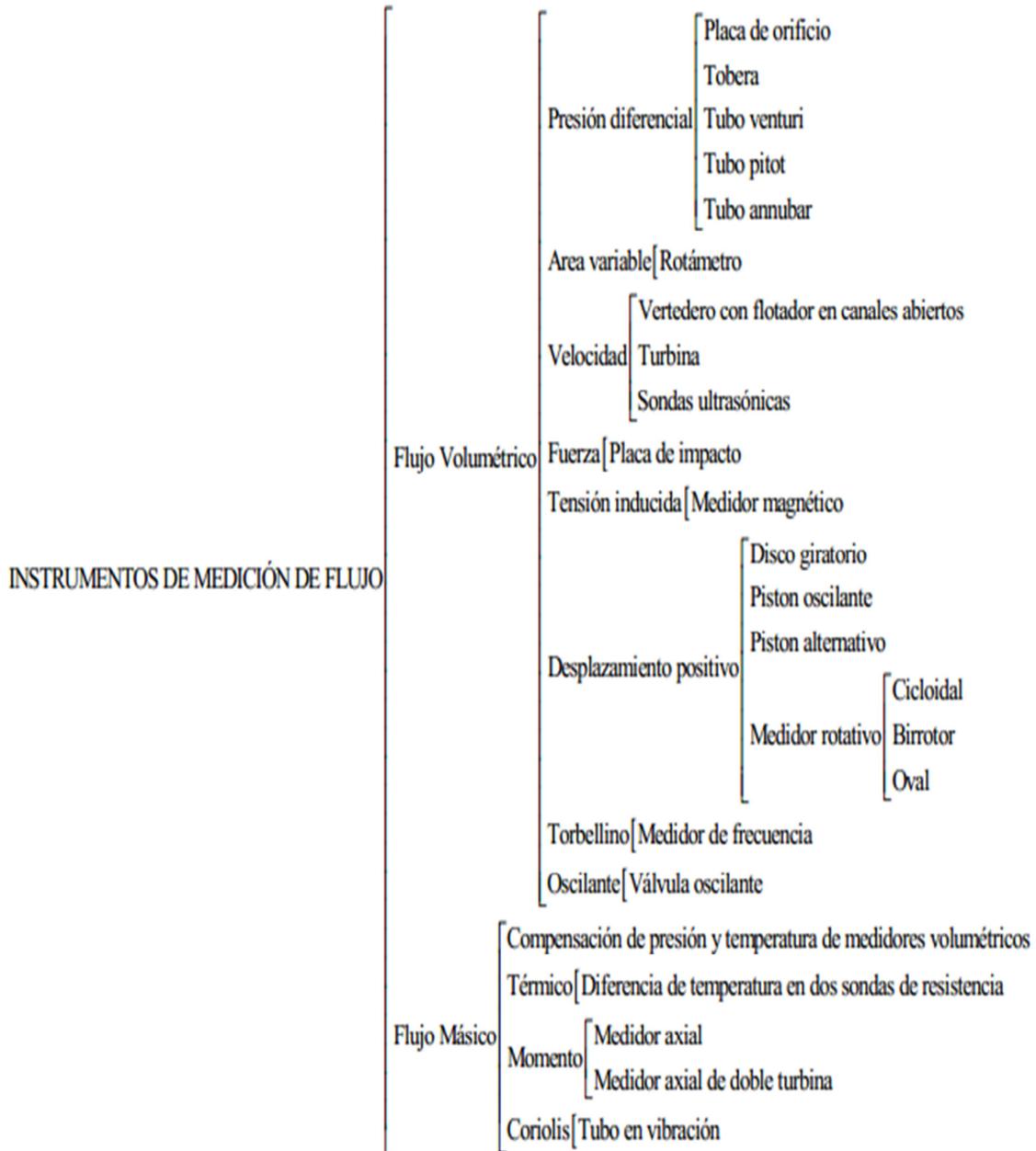


Figura 1.1.3.2 Clasificación de los medidores de flujo según su principio de funcionamiento [7].

1.1.3.3 MEDIDORES VOLUMÉTRICOS

La mayoría de los medidores de flujo determinan el volumen que pasa a través de un tubería por unidad de tiempo, a este tipo de medidores se les denomina medidores de flujo volumétrico, los principios de funcionamiento para este tipo de medidores son muy variados. Los medidores de flujo magnético, tipo turbina y por presión diferencial son algunos ejemplos de medidores de flujo volumétrico, a continuación se mencionan algunos de estos medidores de flujo.

Dentro del área de los medidores volumétricos (generalmente de fluidos como agua, aceite, etc.), se observa que son clasificados en micromedidores y macromedidores, cuya clasificación depende del caudal que manejan, observamos que los micromedidores son los que manejan diámetros de alimentación y descarga en un rango de 0.5 - 1.0 in. Y los macromedidores son los que vienen diseñados para manejar caudales mayores a los que proporcionan este diámetro.

Generalmente este tipo de medidores son de uso domiciliario, y su función básicamente es la de ejercer un control sobre el consumo de agua potable. Con el fin de poder observar el funcionamiento y bajo que principios se rige un medidor volumétrico, contamos con un medidor marca SOCAM, de 1 in, de diámetro tanto en la succión como en la descarga.

Sabemos que MEDIDORES KENT S.A. es una empresa colombiana que nació en 1961 y que en sus inicios simplemente se dedicaba a ensamblar y distribuir medidores volumétricos de marcas extranjeras, en el año de 1981 cambia su razón social y bajo el

nombre de MEDKA. S.A. empieza a fabricar sus propios medidores volumétricos y producir todas las partes que los componen.

Aunque ellos producen sus propios medidores, todavía distribuyen medidores de marcas extranjeras como lo es con el caso de nuestro medidor de marca SOCAM, el cual vamos a describir a continuación.

Este medidor está catalogado dentro de la rama de micromedidores tipo NM de chorro único. Con las siguientes características:

- **LEGIBILIDAD:** Los 8 rodillos numerados permiten una lectura fácil. La unidad de registro orientable a 350° de transmisión magnética, está protegido por una caja herméticamente sellada y contiene una cápsula higroscópica. Su aptitud a funcionar en todas las posiciones, permite una lectura fácil cualesquiera que sean las condiciones de utilización.
- **CONFIABILIDAD:** Un filtro de entrada y un tamiz de asiento protegen con eficacia el mecanismo de las impurezas contenidas en el agua. La transmisión magnética situada entre el elemento de medición y la Unidad de Registro, está protegida contra las influencias magnéticas exteriores. Un indicador de detección permite localizar las fugas o las intenciones de fraude por presión mecánica sobre la Unidad de Registro.

- **FABRICACIÓN:** El medidor NM se fabrica según la norma ISO 4064/1 - 1977.
- **EXACTITUD:** El medidor NM es clase metrológica C lo que garantiza alta exactitud a bajos consumos.

1.1.3.3.1 MEDIDOR TIPO TURBINA

El medidor de flujo tipo turbina consiste de un rotor con varios álabes, suspendido sobre chumaceras en la corriente de un fluido, el número de álabes del rotor está en función del intervalo de medición del medidor y de su resolución. El eje de rotación del rotor es paralelo a la dirección del flujo, y las aspas del rotor ocupan casi todo el diámetro de la tubería. El fluido, al chocar con las aspas, produce el movimiento del rotor. La velocidad angular de rotación es directamente proporcional al flujo volumétrico.

La velocidad de rotación se monitorea por una bobina detectora electromagnética, la cual se encuentra colocada en el exterior del alojamiento del medidor. Existen dos tipos de bobinas detectoras.

- ✓ En el tipo de reluctancia, la velocidad viene determinada por el paso de las palas individuales de la turbina a través del campo magnético creado por un imán permanente montado en una bobina captadora exterior. El paso de cada pala varía la reluctancia del circuito magnético. Esta variación cambia el flujo induciendo en la bobina captadora una corriente alterna que es proporcional al giro de la turbina.

- ✓ En el tipo inductivo el rotor lleva incorporado un imán permanente y el campo magnético giratorio que se origina induce una corriente alterna en la bobina captadora exterior.

La mayoría de los medidores de flujo por turbina incorporan una unidad totalizadora con una función de factorización y escalación. El pulso de salida de la turbina no está en unidades directas de ingeniería. Por ejemplo, cada pulso podría representar 0.001 231 gal. El factorizador se ajusta a este valor y los pulsos de entrada se multiplican por 0.001 231. Las ventajas de este medidor son su incertidumbre baja, son usados para fluidos con viscosidades de baja a media.

Los medidores de este tipo ofrecen buena rangeabilidad de flujo (hasta 30:1) y son adecuados para prácticamente presiones ilimitadas y temperaturas extremas altas y bajas, son fáciles de instalar, tienen poco peso y tamaño en relación al diámetro de la tubería. La exactitud es muy elevada, del orden de $\pm 0.3\%$. La menor incertidumbre se consigue con un flujo totalmente desarrollado, instalando el instrumento en una tubería recta de longitudes mínimas 10 diámetros corriente arriba y 5 diámetros corriente abajo.

Las desventajas principales son la incompatibilidad con líquidos altamente viscosos, posibles daños en caso de que se presente cavitación y la necesidad de equipo adicional, es relativamente caro. Debido a sus excelentes características de desempeño, el medidor de turbina se usa ampliamente para la medición de flujo de precisión alta, transferencia de

aceite crudo, hidrocarburos refinados y otros líquidos valiosos. Los medidores de turbina se utilizan en la industria petroquímica como elementos primarios para el control de procesos. Aplicaciones más especializadas son la medición del flujo de líquidos criogénicos (oxígeno y nitrógeno) y la medición de combustible en aeronaves.

Para su instalación mecánica, es recomendable que la aplicación de flujo máximo sea aproximadamente de 70% a 80% del flujo máximo del medidor. Otro aspecto que debe ser considerado es la presión disponible en la línea. Los medidores de turbina tienen una pérdida de 20.7 kPa a 34.5 kPa a flujo máximo. La pérdida de presión se reduce sobre una ley cuadrática con la reducción del régimen de flujo. En consecuencia si el medidor está operando al 50% de su capacidad, la pérdida de presión es de 25% de la que tendría con el flujo máximo.

El medidor debe ser instalado de tal modo que siempre esté lleno de líquido aunque el flujo sea nulo, ya que, en la puesta en marcha, el choque del fluido a alta velocidad podría dañarlo seriamente. Es necesario el empleo de un filtro a la entrada del instrumento, incluso para mediciones de flujo de agua, ya que la más pequeña partícula podría desgastar los alabes de la turbina y afectar a la exactitud de la medida. La frecuencia generada por el medidor de turbina se transmite a un convertidor indicador o totalizador. Para evitar longitudes excesivas de tubería recta, generalmente se instala un enderezador de flujo en donde se requiera buena exactitud, la instalación recomendada se muestra en la figura

1.1.3.3.2 [14].

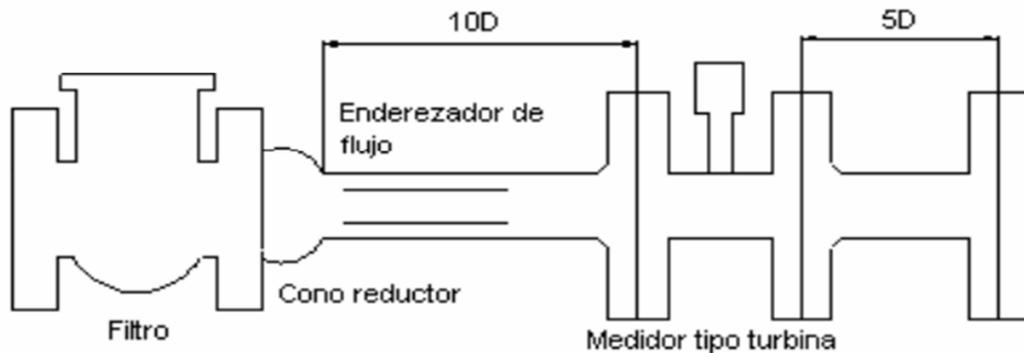


Figura 1.1.3.3.2 Instalación recomendada de un medidor de flujo tipo turbina [14].

La frecuencia de salida de la bobina detectora varía en frecuencia y amplitud con el intervalo del flujo. A flujos pequeños, la señal puede ser tan baja como 20 mV pico a pico. En consecuencia si el medidor y el equipo de lectura electrónico no proceden del mismo fabricante, se deberá tener cuidado con respecto a la forma del pulso (onda senoidal u onda cuadrada), frecuencia de la señal, amplitud y ancho del pulso. Cuando se tengan grandes distancias de transmisión o el área sea eléctricamente ruidosa, se deberá acoplar un preamplificador al medidor.

1.1.3.3.3 MEDIDOR MAGNÉTICO

Un medidor de flujo magnético es un instrumento diseñado para medir un flujo volumétrico de fluidos eléctricamente conductivos que pasan a través de una tubería. El principio de operación de un medidor de flujo magnético está basado en la ley de Faraday de la inducción electromagnética que establece que la tensión inducida a través de cualquier

conductor, al moverse éste perpendicularmente a través de un campo magnético, es proporcional a la velocidad del conductor.

En el medidor magnético de flujo el conductor es el líquido y E_s es la tensión generada, esta es captada por dos electrodos que rozan con la superficie interior del tubo y diametralmente opuestos.

$$E_s = KmBDv$$

Donde K_m es una constante y para la mayoría de los líquidos con una conductividad razonable es igual a 1. Como se observa en la ecuación 2-1 la tensión generada depende, no solo de la velocidad del fluido, sino también de la densidad del flujo B , la cual a su vez está influida por la tensión de la línea y por la temperatura del fluido.

Para obtener una señal que dependa únicamente de la velocidad, la señal de tensión del medidor se compara en el receptor con otra tensión denominada tensión de referencia E_r . Como las dos señales derivan a la vez del campo magnético, la tensión de la línea y las variaciones de temperatura y de conductividad no influyen en la incertidumbre de la medida.

El medidor de flujo magnético produce una señal de tensión eléctrica del orden de μV a algunos mV para toda la escala que pueden ser manejados por un microprocesador para

control por computadora. En general, la fuente de impedancia de estos medidores es del orden de $k\Omega$ para la mayoría de los líquidos comerciales que pueden ser medidos.

Los elementos básicos del medidor de flujo son una sección de tubo no conductor tal como vidrio reforzado con poliéster o sección de tubo no magnético recubierto con un conductor eléctrico apropiado como el teflón, u otros como el kinar, esmalte vítreo, caucho, neopreno, o poliuretano. En lados alternados de la sección del tubo de medición están las bobinas magnéticas que producen el campo magnético perpendicular al flujo del líquido. Montado en el tubo, pero aislado de él y en contacto con el líquido se localizan el par de electrodos, los cuales están en ángulo recto con el campo magnético y el eje del tubo. Cada medidor de flujo magnético requiere de un instrumento asociado para convertir una señal de tensión eléctrica de bajo nivel a una señal de proceso analógica o digital. El convertidor se puede montar sobre el medidor de flujo localmente o remotamente.

La figura 1.1.3.3.3 muestra un ejemplo de este convertidor.

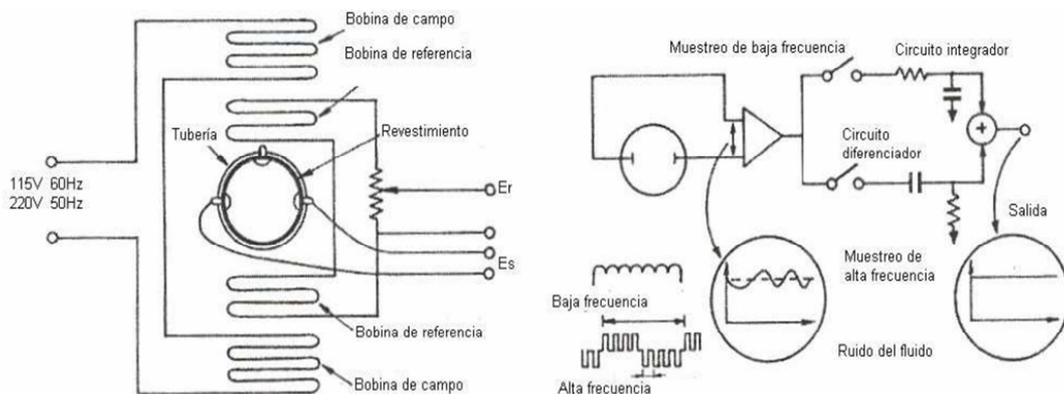


Figura 1.1.3.3.3 Elemento magnético de medida de un medidor de flujo magnético [7].

La mayoría de los líquidos o suspensiones son conductores eléctricos y por lo tanto se puede utilizar este medidor. Si la conductividad del líquido es igual a $20 \mu\text{S cm}$ / o mayor, se puede usar la mayoría de los medidores magnéticos convencionales.

Una ventaja muy significativa de este medidor es que la tensión inducida depende solamente de la velocidad del líquido y no es afectada por la temperatura, viscosidad, turbulencia o la conductividad eléctrica, procurando que esté por encima de $20 \mu\text{S /cm}$; sin embargo, también se dispone de sistemas especiales los cuales pueden medir el flujo de líquidos con conductividades tan bajas como $0.1 \mu\text{S /cm}$. Una ventaja significativa es que este instrumento tiene nula caída de presión. El costo podría ser la principal desventaja de este medidor

Este medidor tiene aplicaciones para casi todos los líquidos, desde líquidos limpios hasta aguas negras, pulpa de tomate, pulpa de papel, cerveza, suspensiones, y ácidos corrosivos. La mayoría de estos medidores se utilizan como dispositivos unidireccionales, pero los fabricantes ofrecen opciones específicas de convertidores con una señal de salida para condiciones de flujo directo o inverso.

Los medidores de flujo magnéticos se deben usar siempre con tubería llena para asegurar mediciones precisas, una instalación conservadora del medidor deberá contar con 5 diámetros de tubería recta antes y 3 diámetros de tubería después del medidor [14].

1.1.3.3.4 MEDIDOR DE ÁREA VARIABLE

Los medidores de área variable se caracterizan por el cambio de área que se produce entre el elemento primario en movimiento y el cuerpo del medidor. Pueden asimilarse a una placa de orificio cuyo diámetro interior fuera variable dependiendo del flujo y de la fuerza de arrastre producida por el fluido.

En los medidores de flujo de área variable en un flotador cambia su posición dentro de un tubo, en proporción al flujo del fluido. El flotador está en equilibrio entre su peso, la fuerza de arrastre del fluido y la fuerza de empuje del fluido sobre el flotador. El flujo depende del peso específico del fluido, de su viscosidad y de los valores de la sección interior del tubo, ya que la misma cambia según sea el punto de equilibrio del flotador.

La caída de presión se puede determinar a partir del peso del flotador. Mediante la selección adecuada del peso y diámetro del flotador se puede seleccionar el valor de la caída de presión la cual es constante para todo el intervalo de medición del medidor, se puede hacer tan baja como se desee.

Sus ventajas son incertidumbre baja, fácil instalación, poco mantenimiento, fácil de lectura, fácil detección de fallas de operación, no necesitar enderezador de flujo, no es necesario condiciones especiales en la entrada y salida del flujo. En algunas instalaciones el tubo se puede reemplazar, o se puede cambiar el flotador para cambiar el alcance del instrumento, sin quitar el medidor de la línea.

Algunas desventajas son: debe usarse en posición vertical, no se puede usar en fluidos que lleven grandes cantidades de materia en suspensión, es relativamente costoso, frágil y propenso a romperse. Se utiliza para la medición de fluidos especiales como ácidos, alcoholes, fluidos opacos, temperaturas de operación de hasta 400 °C y presiones de hasta 60 000 kPa. Este medidor no requiere tramos de tubería, se instala de manera que quede siempre vertical, hay rotámetros de tipo bypass que se montan perpendiculares a la tubería, y los hay montados en línea a la tubería, en estos últimos, el tubo de medición se monta con el extremo más angosto en la parte de abajo en la tubería para que el fluido entre por esta parte y salga por la parte superior del medidor.

1.1.3.3.5 MEDIDOR DE FLUJO MÁSIICO TIPO CORIOLIS

El medidor de flujo másico tipo Coriolis se basa en el teorema de Coriolis, el cual indica que un objeto de masa m que se desplaza con una velocidad lineal v a través de una superficie giratoria de velocidad angular constante ω experimenta una velocidad tangencial $v = \omega r$. En el medidor de flujo tipo Coriolis la generación de la fuerza de Coriolis puede producirse por inversión de las velocidades lineales del fluido mediante una desviación del flujo en forma de omega (Ω) en estado de vibración controlada.

La vibración del tubo, perpendicular al sentido de desplazamiento del fluido, crea una fuerza de aceleración en la tubería de entrada del fluido y una fuerza de desaceleración en la de salida, con lo que se crea un par, cuyo sentido va variando de acuerdo con la vibración

y con el ángulo de torsión del tubo, que es directamente proporcional a la masa instantánea de fluido circulante.

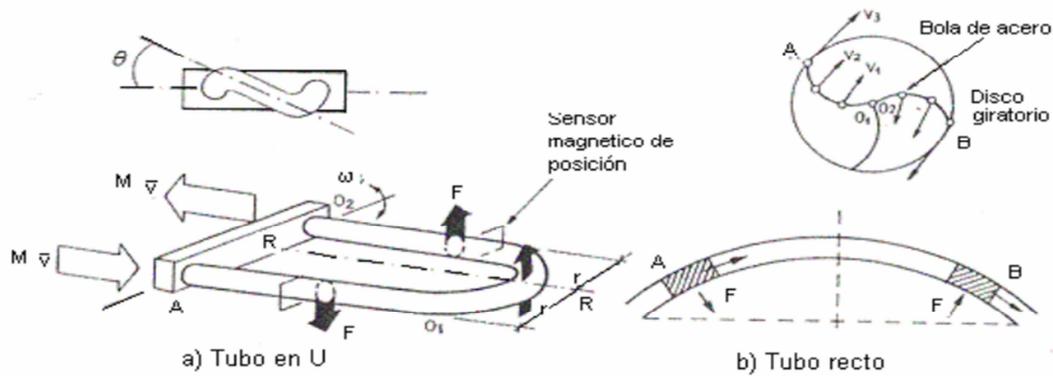


Figura 1.1.3.3.5 Medidor de Coriolis [7].

Sus principales ventajas son; su salida lineal con el flujo másico, no requiere compensación por variaciones de temperatura o presión porque la medición es independiente de estas variables, además también es independiente de la densidad.

Este medidor de flujo no es apto para flujos elevados, solo para flujos medios, pueden ser muy voluminosos. Es ideal para procesos delicados de lotes por peso, sirve para facturar líquidos o gases, es adecuado para casos de viscosidad variable, permite la medición de flujos másicos de líquidos difíciles de medir como adhesivos, nitrógeno líquido entre otros.

Este tipo de medidor no requiere de tramos mínimos de tubería porque la medición no depende de la velocidad del fluido o de la turbulencia se puede instalar vertical u horizontalmente.

1.1.3.3.6 MEDIDORES DE FLUJO POR PRESION DIFERENCIAL

Este tipo de medidores de flujo fueron de los primeros que se utilizaron y actualmente se emplean mucho en la industria porque son económicos y confiables; pero es necesario tener en cuenta los requerimientos de manufactura e instalación de este tipo de medidores.

1.1.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de medición del flujo por el método de presión diferencial se deriva de la aplicación de la ecuación de continuidad (ecuación 1-11) y de la ecuación de Bernoulli (ecuación 1-13) aplicada a un estrechamiento en la tubería, un estrechamiento en la tubería provoca en el fluido una diferencia de presiones considerable, esta diferencia de presiones se mide y en base a ella se determina el flujo.

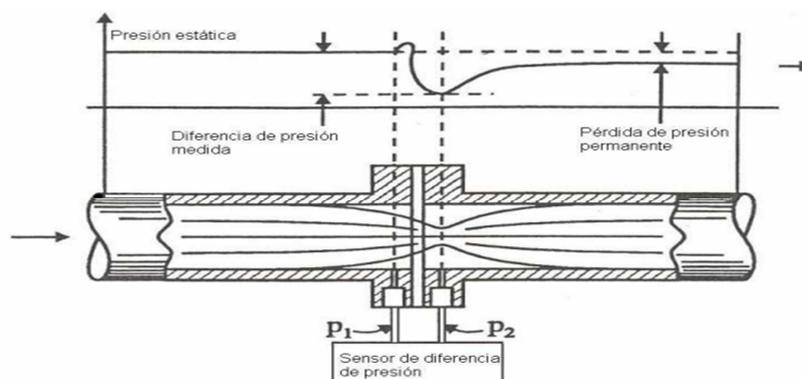


Figura 1.1.4 Diferencia de presiones provocada por un estrechamiento en la tubería.

El flujo se mide por la aplicación de la conservación mecánica a través de la conversión de la velocidad del fluido a presión (Teorema de Bernoulli) y el principio de la continuidad.

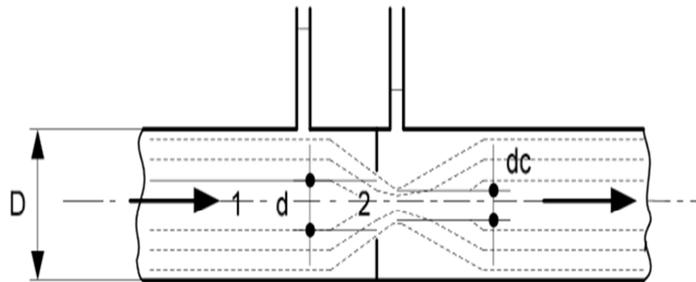


Figura 1.1.4 Principio de Bernoulli

1.1.4.1 PLACA DE ORIFICIO

La forma más simple y flexible para medir flujo es la placa de orificio, se trata de una placa delgada, plana y circular con un orificio, que mediante tornillos y bridas se monta en la tubería en donde se va a medir el flujo.

Es muy importante que el borde del orificio tenga un acabado afilado. Las pruebas que se han hecho muestran que un pequeño redondeo en el borde del orificio introduce un error del 2 al 10% de la capacidad máxima del medidor. La corrosión influirá sobre el afilado del borde del orificio en la medición de fluidos corrosivos, provocando una reducción en la exactitud de la medición con el paso del tiempo.

Cuando el flujo pasa a través del extremo afilado del orificio, el flujo no llena 33 completamente la abertura del orificio, sino que continúa disminuyendo en diámetro después de pasar a través del orificio hasta que el chorro alcanza un área mínima conocida

como vena contracta, el área de este chorro es aproximadamente 0.61 veces el área del orificio.

Las placas de orificio, generalmente se fabrican de manera que el orificio sea concéntrico a la tubería, pero también hay orificios excéntricos y segmentales como se muestra en la figura 1.1.4.1

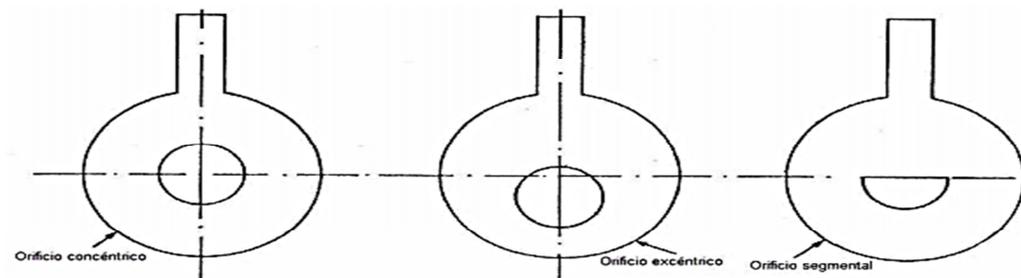


Figura 1.1.4.1 Placa de orificio

La placa de orificio concéntrico es la más universalmente usada, se emplean para relaciones de diámetros β de hasta 0.75, el límite máximo del uso del orificio es de 6 860 kPa y 420 °C. Generalmente se fabrican de acero inoxidable, pero para tubería de 20" hasta 48" de diámetro pueden hacerse de acero al carbono y con acero inoxidable alrededor del orificio. Para fluidos muy corrosivos como coke, gas de alto horno, licor negro y petróleo, se usa níquel u acero inoxidable.

La placa de orificio excéntrico es parecida a la placa concéntrica, con la excepción de que el orificio se encuentra desviado. Este orificio se maquina fuera del centro de la placa de tal forma que quede al mismo nivel de uno de los lados del diámetro interior del tubo, se

localiza directamente opuesto a las tomas de presión y se emplea en donde el espesor de las bridas no permite la instalación de tomas de presión tan cerca del orificio. Este tipo de orificio se usa comúnmente para medir fluidos que transportan pequeñas cantidades de sólidos no abrasivos.

La placa de orificio segmental tiene un orificio, el cual es un segmento de círculo. Las conexiones de las tomas de presión se instalan en línea con la sección segmental. La relación de diámetros β , es la relación entre el diámetro de un círculo teórico equivalente en área a la abertura segmental, dividida entre el diámetro interior de la tubería. El orificio segmental se usa para relaciones β hasta de 0.85.

Este tipo de orificio, permite distancias aun más grandes en las conexiones de las tomas de presión y pueden usarse con bridas más gruesas, otra ventaja es que evita la acumulación de sedimentos, esta placa puede medir líquidos o gases los cuales lleven impurezas no abrasivas tal como líquidos ligeramente pastosos o gases muy sucios.

Los tipos de placas de orificio excéntrico y segmental tienen el orificio taladrado tangente a la pared interna del tubo, o más comúnmente a un círculo concéntrico con un diámetro no menor al 98% del diámetro interno del tubo. El arco de segmento de la placa es paralelo a la pared del tubo.

Debe tenerse cuidado en la instalación de modo que ninguna parte de la brida o el empaque interfieran con el orificio en cualquier tipo de placa. La geometría normalizada de la placa

de orificio concéntrico según la norma ISO 5167-1 se muestra en la figura 1.1.4.1 [9]

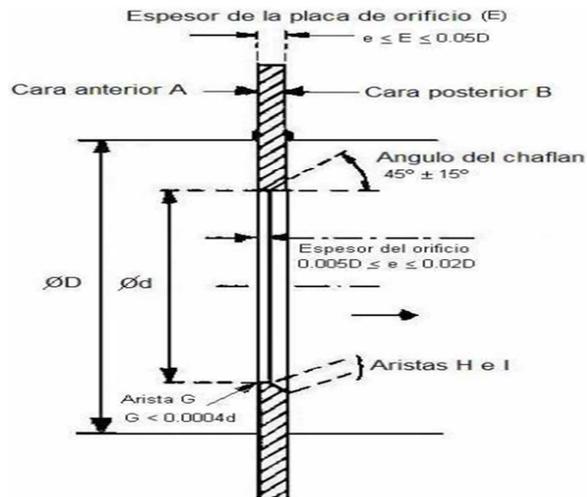


Figura 1.1.4.1 Geometría normalizada de la placa de orificio [9].

Los límites de uso para las placas de orificio se muestran a continuación [9].

- Para placa de orificio con tomas de presión en la brida.

$$D \geq 12.5 \text{ mm}$$

$$50 \text{ mm} \leq D \leq 1\,000 \text{ mm}$$

$$0.1 \leq \beta \leq 0.75$$

$$Re_D \geq 4\,000 \text{ y } Re_D \geq 170 \beta^2 D$$

- Para placas de orificio con tomas en la vena contracta ($1D$ y $\frac{1}{2} D$) y tomas esquinadas (Corner tappings).

$$D \geq 12.5 \text{ mm}$$

$$50 \text{ mm} \leq D \leq 1\,000 \text{ mm}$$

$$0.1 \leq \beta \leq 0.75$$

$$Re_D \geq 4\,000 \text{ para } 0.1 \leq \beta \leq 0.5$$

$$Re_D \geq 16\,000 \beta^2 \text{ para } \beta \geq 0.5$$

Las placas de orificio tienen un coeficiente de descarga aproximadamente de 0.6 y la pérdida de presión es proporcional a la presión diferencial

1.1.4.2 TOBERA

La tobera está situada en la tubería con dos tomas, anterior y posterior en el centro de la sección más pequeña. La tobera permite caudales superiores a 60 % de la de placa orificio en las mismas condiciones de servicio, su pérdida de carga es de 30 a 80 % de la presión diferencial. Una **tobera** es un dispositivo que convierte la energía térmica y de presión de un fluido (conocida como entalpía) en energía cinética. Como tal, es utilizado en turbo máquinas y otras máquinas, como inyectores, surtidores, propulsión a chorro, etc.

El fluido sufre un aumento de velocidad a medida que la sección de la tobera va disminuyendo, por lo que sufre también una disminución de presión y temperatura al conservarse la energía. Existen diseños y tipos de tobera muy usados en diferentes campos de la ingeniería, como la de Laval, Rateau, Curtis, etc.¹

1.1.4.2.1 TOBERA DE LAVAL

Gustav de Laval estudió el flujo supersónico en toberas y resolvió el problema de aceleración máxima dentro de la tobera llegando al diseño de toberas con sección convergente-divergente en las que se logra un flujo sónico $M = 1$ ($M =$ número de Mach) en la garganta para posteriormente expandir la tobera y lograr flujos supersónicos $M > 1$.

Estas toberas deben tener una expansión adecuada para evitar la generación de ondas de choque o de contracción dentro del flujo.

La tobera es la encargada de convertir energías, adaptando las presiones y velocidades de los gases eyectados. Son de uso común a régimen de vuelo subsónico ($M < 1$) y supersónico ($M > 1$). En el caso supersónico se hace necesaria la existencia de un sistema de ondas de choque al inicio del difusor de entrada para decelerar el fluido y así producirse la combustión en condiciones óptimas. La tobera que usan los cohetes experimentales se denomina De Laval y los flujos que recorren dicha tobera se consideran compresibles al moverse a velocidades supersónicas, por lo que, las diferentes secciones transversales, producen durante el avance de los gases, variaciones en la densidad y en la velocidad del fluido.

Todo ello está supuesto para condiciones de flujo isentrópico, es decir, condiciones adiabáticas y sin rozamiento. En la práctica, no existe la condición de flujo isentrópico ideal, por lo que se aplica un coeficiente de rendimiento que ajusta el cálculo.

La ley de la conservación de la energía se encarga de aumentar la velocidad en el cono de salida, no por cumplimiento de la dinámica de fluidos, ya que aquí aparecen como compresibles, sino por la conservación del producto «Velocidad x Temperatura».

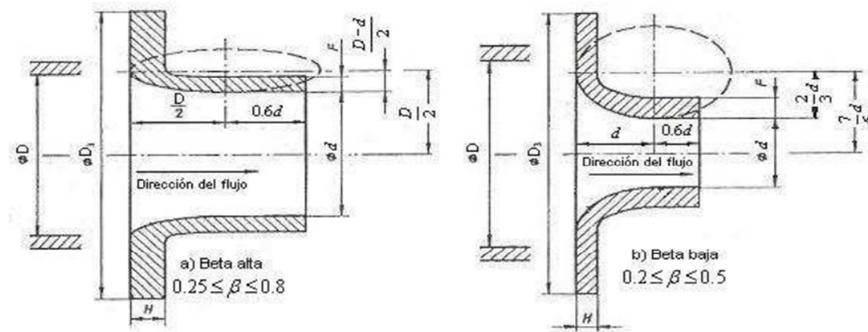


Figura 1.1.4.2.1 Geometría normalizada de la Tobera ASME [9].

Puede emplearse para fluidos que arrastren sólidos en pequeña cantidad.

1.1.4.3 TUBO VENTURI

Este elemento posee un cono convergente que va reduciendo gradualmente el diámetro hasta llegar a lo que se conoce como garganta, posteriormente hay un cono divergente, el cual expande el flujo otra vez al diámetro de tubería inicial. La presión varía en la proximidad de la sección estrecha; así, al colocar un manómetro o instrumento registrador en la garganta se puede medir la caída de presión y calcular el flujo instantáneo. 39El tubo Venturi permite la medición de flujos 60% superiores a los de la placa orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de presión de sólo 10% a 20% de la presión diferencial.

Posee una incertidumbre baja y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos, sin embargo los sólidos abrasivos influyen en su forma afectando la

exactitud de la medida. El costo del tubo Venturi es elevado, del orden de 20 veces el de un diafragma y su exactitud es del orden de $\pm 0.75\%$.

La geometría del tubo Venturi se muestra en la figura **1.1.4.3** la entrada cilíndrica debe tener un diámetro D y no debe diferir del diámetro de la tubería por más de $0.01 D$. En el caso de cono convergente maquinado el tramo de entrada cilíndrica debe ser igual a D . El cono convergente debe ser cónico y debe tener un ángulo de $21^\circ \pm 1^\circ$ para cualquier tipo de tubo Venturi. La longitud del cono convergente promedio paralela a la línea de centro del tubo Venturi es aproximadamente igual a $2.7 (D - d)$. El cono convergente está conectado con la entrada cilíndrica por medio de una curvatura de radio R_1 , el cual en el caso de cono convergente maquinado debe ser menor a $0.25 D$, pero de preferencia debe ser igual a cero.

La garganta está conectada al cono convergente por una curvatura de radio R_2 y al cono divergente por una curvatura de radio R_3 . En el caso del tubo Venturi de cono convergente maquinado el radio R_2 debe ser menor a $0.25 d$, pero de preferencia debe ser igual a cero. El tramo entre el radio R_2 y el plano de la toma de presión de la garganta no debe de ser menor a $0.25 d$.

El tramo entre el plano de las tomas de presión de la garganta y el principio del radio de curvatura R_3 no debe ser menor a $0.3 d$. El radio R_3 debe ser menor a $0.25 d$, pero de preferencia debe ser igual a cero.

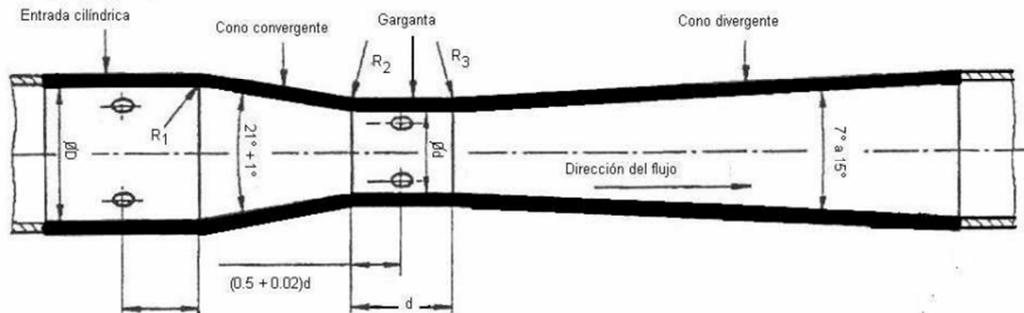


Figura 1.1.4.3 Geometría normalizada del Tubo Venturi [9].

1.1.4.4 TUBO PITOT

El tubo Pitot mide la diferencia entre la presión total y la presión estática que es proporcional al cuadrado de la velocidad. El tubo de Pitot se utiliza para calcular la presión total, también denominada *presión de estancamiento*, *presión remanente* o *presión de remanso* (suma de la presión estática y de la presión dinámica).

Lo inventó el ingeniero francés Henri Pitot en 1732.¹ Lo modificó Henry Darcy, en 1858.² Se utiliza mucho para medir la velocidad del viento en aparatos aéreos y para cuantificar las velocidades de aire y gases en aplicaciones industriales. Mide la velocidad en un punto dado de la corriente de flujo, no la media de la velocidad del viento.³

El tubo de Pitot, inventado por el ingeniero y físico francés Henri Pitot en el año 1732. Henri Pitot fue el primero en medir la rapidez del agua en el río Sena utilizando el tubo pitot, aparato de su invención que más adelante se adaptó a los aviones para medir su rapidez en el aire.

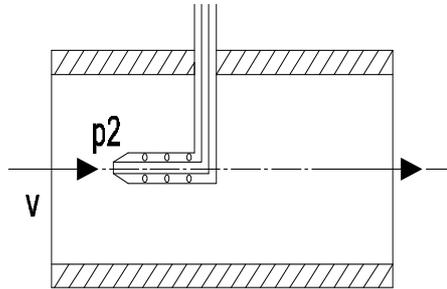


Figura 1.1.4.4 Tubo Pitot

1.1.4.5 TUBO ANNUBAR

El tubo Annubar es una innovación del tubo Pitot. Consta de un tubo exterior situado a lo largo de un diámetro transversal de la tubería, y de dos tubos interiores. El tubo exterior consta de cuatro orificios en la cara aguas arriba de la corriente, que se utilizan para interpolar los perfiles de velocidad y poder realizar un promedio, y otro orificio en el centro del tubo pero en la cara aguas debajo de la corriente.

De los dos tubos que están en el interior, uno sirve para promediar las presiones obtenidas en los cuatro orificios, midiendo la presión total, mientras que el otro tubo que se encuentra en la parte posterior, mide la presión estática en el orificio central aguas debajo de la corriente. Tiene mayor precisión que el Pitot y baja pérdida de carga.

El tubo Annubar es una innovación del tubo Pitot; consta de dos tubos, uno de presión total y presión estática.

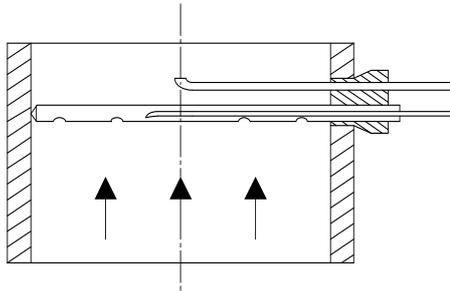


Figura 1.1.4.5. Tubo Annubar

El tubo que mide la presión total está a lo largo de la sección transversal de la tubería, que consta de orificios ubicados en posición crítica determinado por computadora, que cubre cada uno la presión total en un anillo de área transversal de la tubería. Estos anillos tienen áreas iguales, en tuberías de tamaño mayor a 1 plg se dispone en el interior del tubo otro que promedia las presiones obtenidas en los orificios.

El tubo que mide la presión estática se encuentra detrás del tubo de presión total con el orificio en el centro de la tubería. El tubo Annubar es más preciso que el tubo Pitot, de 1 – 3 %, tiene baja pérdida de carga y se emplea para pequeños y grandes caudales de fluidos y gases.

1.1.5 VELOCIDAD

1.1.5.1 TURBINAS

Turbina es el nombre genérico que se da a la mayoría de las turbomáquinas motoras. Éstas son máquinas de fluido, a través de las cuales pasa un fluido en forma continua y éste le entrega su energía a través de un rodete con paletas o álabes.

Es un motor rotativo que convierte en energía mecánica la energía de una corriente de agua, vapor de agua o gas. El elemento básico de la turbina es la rueda o rotor, que cuenta con palas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar.

Esta energía mecánica se transfiere a través de un eje para proporcionar el movimiento de una máquina, un compresor, un generador eléctrico o una hélice. Las turbinas constan de una o dos ruedas con paletas, denominadas rotor y estátor, siendo la primera la que, impulsada por el fluido, arrastra el eje en el que se obtiene el movimiento de rotación.

Hasta el momento, la turbina es uno de los motores más eficientes que existen (alrededor del 50%) con respecto a los motores de combustión interna y hasta algunos eléctricos. Ya en los años 20, unos inventores, entre ellos uno de apellido Thyssen, patentaron una turbina de combustión interna a la que atribuyeron un rendimiento termodinámico del 31%.

El término turbina suele aplicarse también, por ser el componente principal, al conjunto de varias turbinas conectadas a un generador para la obtención de energía eléctrica.

1.1.6. MEDIDORES CAUDAL MASA

Los medidores de caudal masa tiene dos aplicaciones generales, la una en procesos que implican reacciones químicas y la otra es en procesos donde se manipulan materiales que se adquieren por peso y no por volumen.

La determinación del caudal masa puede efectuarse a partir de una medida volumétrica compensándola para las variaciones de densidad, presión o temperatura del fluido o bien directamente aprovechando las características medibles de la masa del fluido.

1.1.7 MEDICIÓN DIRECTA DE CAUDAL MASA

Los medidores caudal masa aprovechan las características medibles de la masa. Existen tres sistemas básicos, los instrumentos térmicos, los de momento angular y los de Coriolis; y en menor escala se utilizan los de presión diferencial.

1.1.8 MEDIDORES TÉRMICOS DE CAUDAL

Los medidores térmicos se basan en dos principios físicos:

- a. La elevación de temperatura del fluido en su paso por un cuerpo caliente
- b. La pérdida de calor experimentada por un cuerpo caliente inmerso en el fluido.

El primer utilizado industrialmente, conocido también como medidores de caudal Thomas. El medidor consta de una fuente eléctrica de alimentación de precisión que proporciona un calor constante al punto medio del tubo por el cual circula caudal. En puntos equidistantes de la fuente de calor se encuentran sondas de resistencia para medir la temperatura.

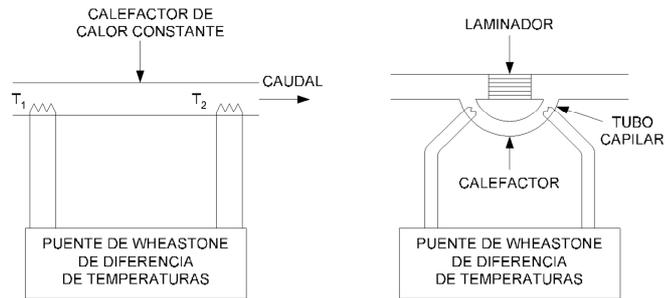


Figura 1.1.8 Medidor térmico

Cuando el fluido está en reposo, la temperatura es igual en las dos sondas, cuando el fluido circula transporta una cantidad de calor hacia el segundo elemento T2, y se presenta una diferencia de temperatura que va aumentando progresivamente a medida que aumenta el caudal, esta diferencia es proporcional a la masa que circula a través del tubo, de acuerdo con la ecuación:

$$Q = mCe (t_2 - t_1)$$

Dónde:

Q = caudal transferido

m = masa del fluido

Ce = calor específico

t1 = temperatura anterior

t2 = temperatura posterior

Este sistema está conectado a un puente de Wheatstone que determina la diferencia de temperaturas y la amplifica con un señal de la salida de 0-5 V CC en 1000 Ω de impedancia,

estás señal puede ser utilizada en un registrador, indicadores digitales y controladores que pueden estar situados hasta 300 m del instrumento.

La precisión del elemento primario es de $\pm 1\%$ de toda la escala, la repetibilidad de $\pm 0.2\%$ de la escala y al constante de tiempo de 0.5 a 3 s11.

La medida es apta para bajos caudales de gas que van según los modelos de 0 - 10 cm.

Para aumentar el caudal medible se deriva con un capilar el fluido y se intercala un laminado que garantiza el mismo flujo laminar que en el capilar. De este modo los caudales medibles llegan a 15 lpm en gases y a 20 Kg/h en líquidos.

El instrumento es adecuado para gases tales como el aire, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, helio, amoníaco, argón, monóxido de carbono, anhídrido carbónico, ácido clorhídrico, etano. Etileno, metano, fosfórico y otros. También pueden emplearse en líquidos pero con caudales muy bajos.

1.2 CONTROL DE PROCESOS

La Instrumentación y el control de Procesos, como especialidad de Ingeniería, es aquella parte de la ingeniería que es responsable de definir el nivel de automatización de cualquier planta de proceso e instalación industrial, la instrumentación de campo y el sistema de control para un buen funcionamiento del proceso, dentro de la seguridad para los equipos y personas, de acuerdo a la planificación y dentro de los costos establecidos y manteniendo la calidad. Otro

concepto más técnico, diría que la instrumentación y control son aquellos dispositivos que permiten:

- ✓ Capturar variables de los procesos.
- ✓ Analizar las variables de los procesos.
- ✓ Modificar las variables de los procesos.
- ✓ Controlar los procesos.
- ✓ Traducir los procesos a unidades de ingeniería.

Los procesos industriales exigen el control de la fabricación de los diversos productos obtenidos. Los procesos son muy variados y abarcan muchos tipos de productos como pueden ser derivados del petróleo, agua, vapor, gases, ácidos, pasta para producir papel, etc. teniendo todos ellos la necesidad de ser medidos y controlados, así como se deben mantener unas constantes dentro de unos márgenes establecidos.

Haciendo un poco de historia, la instrumentación y el control nace de la necesidad de:

- ✓ Optimizar los recursos humanos, materias primas, y productos finales.
- ✓ Producir productos competitivos con un alto rendimiento.
- ✓ Producir productos con características repetitivas.
- ✓ Fomento del Ahorro Energético.
- ✓ Fomento de la Conservación del Medio Ambiente.

Para lo anterior, en los inicios de la industria, todas estas operaciones se llevaban de una manera manual utilizando instrumentos sencillos como pueden ser manómetros, termómetros, columnas manométricas, válvulas manuales, etc.

Esta forma de medir y controlar un proceso era totalmente manual y localizada en el área de proceso. Como se puede entender, este tipo de control tiene unos inconvenientes como son:

- ✓ Simplicidad de los procesos. Difícil evolución debido al difícil control.
- ✓ Poca repetibilidad de los productos finales.
- ✓ Pérdidas energéticas.
- ✓ Necesidad de muchos operadores.

Debido a las necesidades de mejora continua, los procesos se han ido desarrollando progresivamente lo que ha exigido que el grado de automatización de las instalaciones haya evolucionado en consecuencia. El siguiente paso fue el centralizar los instrumentos antes mencionados (termómetros, manómetros, etc.) en un panel centralizado.

De esta manera el proceso pasó a ser totalmente manual y localizado fuera del área de proceso. Este tipo de control tiene como inconveniente, adicionalmente a los ya comentados antes, el inconveniente de tener que llevar la variable de proceso hasta el panel de control con el peligro que ello conlleva.

Pero tiene la ventaja de que el operador ya no tiene que estar localizado en el proceso, ahorrando a su vez las horas/hombreen horas de supervisión y control, así como haciendo más cómoda la situación delos operadores.

Un gran avance cualitativo fue la aparición de la instrumentación neumática, que básicamente consistía en instrumentos que traducían las variables de proceso, caudal, presión, etc. en señales neumáticas. Este paso evita que las variables de proceso sean conducidas hasta un panel local. En el propio proceso se convierte la señal de proceso en señal neumática.

Para ello se estandarizó como rango para las señales neumáticas de control 3-15psi. Así por ejemplo, la conversión de una señal de temperatura a señal de control sería de la forma: 0-100° C 3-15 psi De esta manera el proceso sigue siendo totalmente manual y localizado fuera del área de proceso. Los inconvenientes que tiene este tipo de control son:

- ✓ Consumo elevado de aire comprimido.
- ✓ Limitación de distancia entre el proceso y el panel de control (150 m)
- ✓ Poca repetibilidad de los productos finales.
- ✓ Pérdidas energéticas.

El siguiente avance fue la aparición del primer controlador neumático. El controlador neumático dio una independencia al proceso que antes no existía. La principal misión del controlador era el tomar la variable del proceso, compararla con una referencia establecida y en función de la diferencia, actuar sobre la variable manipulada. Todo ello utilizando señales

neumáticas, tanto para las entradas del proceso como para las salidas a elementos finales de control.

De esta manera el proceso pasa a ser automático y localizado fuera del área de proceso. Tiene como ventajas:

- ✓ Reducción de operadores
- ✓ Mayor precisión.
- ✓ Ahorro Energético.
- ✓ Mejor producto final.

Los inconvenientes que tiene este tipo de control son:

- ✓ Consumo elevado de aire comprimido.
- ✓ Limitación de distancia entre el proceso y el panel de control (150 m)

El último gran paso conceptual ocurrió con la aparición de la instrumentación electrónica, cuya principal diferencia es que desaparece parte del protagonismo del aire comprimido, pasando este a las señales eléctricas. Los transmisores pasan de convertir la señal de proceso a señal eléctrica.

Los primeros paneles electrónicos, sinópticos, registradores de señales, indicadores electrónicos, etc. Por último indicar, que posteriormente aparecieron conceptos como:

- ✓ Sistemas de Control.
- ✓ PLC's
- ✓ SCADAS
- ✓ Buses de campo

1.2.1. AUTOMATIZACIÓN

Acción por la cual se ejecuta un proceso de producción sin la intervención del operador de forma permanente. Control Avanzado: Técnicas que se apartan del control convencional PID y que se aplican en procesos muy complejos, no lineales, con retardos importantes y acoplamiento entre las variables.

Se emplean en general para mejorar el rendimiento económico del proceso.

1.2.2 CONTROL DISTRIBUIDO

Control digital realizado "distribuyendo" el riesgo del control único por ordenador en varios controladores o tarjetas de control de tipo universal con algoritmos de control seleccionables por software. Los transmisores electrónicos de campo, las tarjetas de control y la estación del operador están unidos mediante una red de comunicaciones y cada componente se ubica en el lugar más idóneo de la planta.

1.2.3 CONTROL EN LAZO CERRADO (FEEDBACK)

La variable controlada se mide constantemente y se compara con el valor de referencia. Si se produce desviación entre ambos valores se aplica una acción correctora al elemento final de control para retornar la variable controlada al valor deseado. Equivale a mantener el controlador en modo automático.

1.2.4 CONTROL MANUAL

El operador mantiene la variable controlada en su valor de referencia modificando directamente el valor de la variable manipulada.

1.2.5 CONTROL TODO-NADA

La salida del controlador se conmuta de abierta a cerrada cuando la señal de error pasa por cero. Es la forma más simple de control, donde el elemento final de control sólo puede ocupar una de las dos posiciones posibles.

1.2.6 CONTROLADOR

Instrumento o función de software que compara la variable controlada con un valor deseado y ejerce automáticamente una acción de corrección de acuerdo con la desviación.

1.2.7 CONTROLADOR PROGRAMABLE

Instrumento basado en microordenador que realiza funciones de secuencia y enclavamiento de circuitos y, como complemento, funciones de control PID.

1.2.8 DERIVA

Desviación permanente de una señal que se produce de forma muy lenta a lo largo de un cierto periodo de tiempo.

1.2.9 ELEMENTO FINAL DE CONTROL

Recibe la señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control. La válvula de control es el **elemento** final típico.

1.3 SISTEMAS DE CONTROL

1.3.1 SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO

El control automático desempeña un papel importante en los procesos de manufactura, industriales, navales, aeroespaciales, robótica, biológicos, etc. Va ligado a prácticamente todas las ingenierías (eléctrica, electrónica, mecánica, sistemas, industrial, química, etc.) Son sistemas que pretenden la ausencia de un operador para que se realicen las operaciones necesarias dentro de un proceso cualesquiera. Pueden ser en lazo abierto o en lazo cerrado los cuales se describen a continuación.

1.3.1.1 SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO

También llamado sistema de control realimentado, es aquel que compara la salida del sistema con la entrada de referencia y usa la diferencia como medio de control para poder obtener una salida deseada. Dicha señal de error es llevada al controlador a fin de reducir el error y llevar al sistema a un valor conveniente.

Tienen además la característica de que no requieren de un operador al poseer un sistema de medición y actuación, por lo que también se los llama sistemas de control automático.

Son sistemas de tipo robusto que resisten perturbaciones internas y externas por lo que debido a la realimentación la salida se mantendrá en valores convenientes.

El diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado se muestra en la figura 1.3.1.1

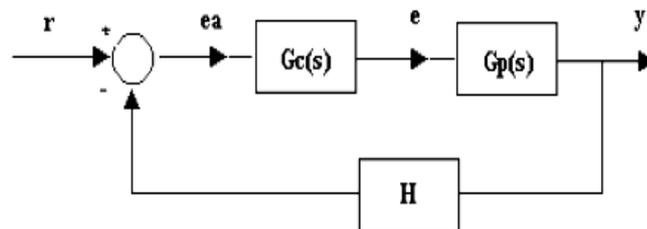


Figura. 1.3.1.1 Sistema de control de laso cerrado

1.3.1.2 SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO ABIERTO

Son sistemas en los cuales la salida no afecta la señal de control, es decir, que el sistema de control en laso abierto no mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. En

cualquier sistema de control de lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia, por tanto a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija: como resultado la precisión del sistema depende de la calibración.

Ante la presencia de perturbaciones, este sistema de control no realiza la tarea deseada. En la práctica este tipo de sistemas de control solo se usa si se conoce la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas o externas. El diagrama de bloques de un sistema de control en lazo abierto se muestra en la figura.

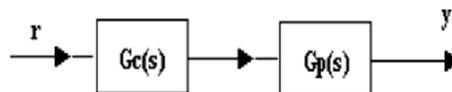


Figura. 1.3.1.2 Sistema de control en lazo abierto

1.3.1.3 COMPARACIÓN ENTRE ESTOS DOS TIPOS DE SISTEMAS

Una ventaja del sistema de control de lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema. Por tanto, es posible usar componentes relativamente precisos y baratos para obtener el control adecuado de una planta determinada, en tanto que hacer eso es imposible en el caso de un sistema en lazo abierto.

Desde el punto de vista de la estabilidad, el sistema de control en lazo abierto, es más fácil de desarrollar, porque la estabilidad del sistema no es un problema importante. Por otra parte, la estabilidad es una función principal en el sistema de control en lazo cerrado, lo cual puede

conducir a corregir en exceso errores que producen oscilaciones de amplitud constante o cambiante.

Para los sistemas en los que se conocen con anticipación las entradas y en los cuales no hay perturbaciones, es aconsejable usar un control en lazo abierto. Los sistemas de control en lazo cerrado solo tienen ventajas cuando se presentan perturbaciones impredecibles en los componentes del sistema. La cantidad de elementos utilizados en un sistema de control en lazo cerrado es mayor que la que se utiliza para un sistema de control en lazo abierto equivalente.

Por lo tanto, el sistema de control en lazo cerrado suele tener costos y potencias más grandes. Para disminuir la energía requerida de un sistema, se emplea un control en lazo abierto cuando puede aplicarse. Por lo general, una combinación adecuada de controles en lazo abierto y lazo cerrado es menos costosa y ofrecerá un desempeño satisfactorio del sistema en general.”²”

1.3.1.4 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONTROL

1.3.1.4.1 SENSOR-TRANSMISOR

Realizan la medición en el sistema de control y se transmite el valor de transmisión correspondiente. En el sensor se produce un efecto mecánico eléctrico o electrónico, el cual se relaciona con la variable medida.

El transmisor a su vez, convierte este fenómeno en una señal que se puede transmitir por tanto esta señal tiene relación con la variable de proceso. Existen tres términos importantes que se relacionan con la combinación sensor/transmisor, estos tres términos importantes son la escala, el rango, el cero instrumento.

- ✓ **LA ESCALA.-** como escala del instrumento se define por los valores superiores e inferior de la válvula medida.
- ✓ **EL RANGO.-** es la diferencia entre el valor superior y el inferior de la escala.
- ✓ **EL CERO INSTRUMENTO.-** es siempre el valor inferior de la escala.

La ganancia del sensor/transmisor.- es fácil de calcular una vez que se conoce el rango.

$$K = \frac{\Delta entrada}{\Delta salida}$$

1.3.1.4.2 CONTROLADOR

El controlador es el cerebro del sistema de control, compara la medición de la variable controlada que realiza el sensor/transmisor con el punto de control, y en base a esa comparación, decide qué hacer, y esa decisión la envía al elemento final de control.

Existen dos tipos de controladores como son los continuos y los discontinuos. Controladores discontinuos de dos posiciones.-conocido como controlador on-off mientras más pequeña es la

banda proporcional el control tiene que ser preciso y cuando es muy pequeña el controlador se vuelve inestable, es el más barato y utilizado cuando no se requiere un control exacto.

1.3.1.4.3 ELEMENTO FINAL DE CONTROL

El 90% de los elementos finales de control utilizados en las industrias son las válvulas pero en una minoría tenemos que son también bombas, transportadores motores, etc.

Las válvulas automáticas de control generalmente constituyen el último elemento en un lazo de control instalado en la línea de proceso y se comportan como un orificio cuya sección de paso varía continuamente con la finalidad de controlar un caudal en una forma determinada.

Las válvulas de control constan básicamente de dos partes que son: la parte motriz o actuador y el cuerpo.

1.3.1.4.4 ACTUADOR

El actuador también llamada accionador o motor, puede ser neumático, eléctrico o hidráulico, pero los más utilizados son los dos primeros por ser las más sencillas y de rápida acciones. Aproximadamente el 90% de las válvulas utilizadas en la industria son accionadas neumáticamente.

Los actuadores neumáticos constan básicamente de un diafragma, un vástago y un resorte tal como se muestra en la figura. Lo cual se busca en un actuador de tipo neumático es que cada valor de la presión recibida por la válvula corresponda una posición determinada del vástago.

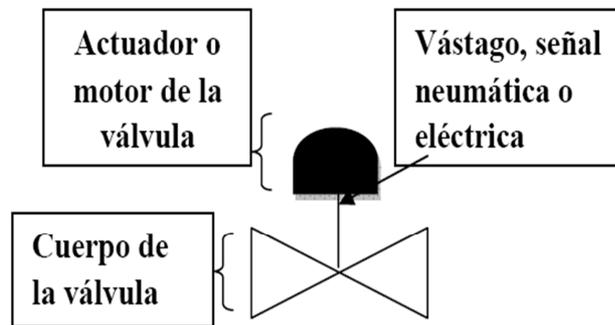


Figura. 1.3.1.4.5 Partes de una válvula de control

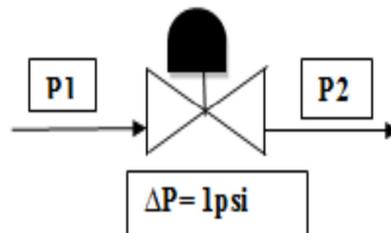


Figura. 1.3.1.4.5 válvulas de control para fluidos incompresibles

Para fluidos incompresibles

$$F = KA \frac{\sqrt{2g\Delta P}}{\gamma}$$

$$F = Cv \frac{\sqrt{\Delta P}}{g}$$

Dónde: G= gravedad específica del fluido

C_v = el flujo en galones de agua a 60 oF que pasa por un minuto a través de una válvula completamente abierta y que tiene una caída de presión constante de 1 Psi.

Según Mazoneilan la ecuación para calcular el C_v es.³

$$C_v = \frac{F\sqrt{cT}}{836cf P1 (y - 0.148Y3)}$$

1.3.1.5 CARACTERISTICAS DE FLUJO DE LAS VALVULAS

Es la relación entre el flujo de la válvula y la posición del vástago de la misma conforme varía la posición de 0% a 100%. Se distinguen dos tipos de características:

1.3.1.5.1 CARACTERÍSTICAS DE FLUJO INHERENTE

Es la relación entre el flujo y la posición de la válvula a una caída de presión constante de la válvula.

Dentro de estas tenemos tres tipos de válvulas:

- ✓ **Válvulas lineales.**- se usan generalmente en circuitos de nivel de líquido y en otros procesos en la que la caída de presión a través de la válvula sean prácticamente constante.

- ✓ **Válvulas de porcentaje igual o iso-porcentuales.-** son las más comunes se usan generalmente en sitios donde se espera grandes variaciones en la caída de presión. Se utilizan en los procesos rápidos cuando no se conoce bien la dinámica del sistema.
- ✓ **Válvulas de apertura rápida.-**no son buenas para regulación ya que no afecta al flujo en la mayor parte de su desplazamiento.

1.3.1.5.2 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DE INSTALACIÓN

Es la que se observa cuando la válvula instalada ya entra en servicio, y hay variaciones en la caída de presión. De acuerdo al funcionamiento de y seguridad de la instalación tenemos:

- ✓ **Abierta en falla.-** si se va la energía la válvula queda abierta, son válvulas que necesitan aire para cerrar.
- ✓ **Cerradas en falla.-** si se va la energía la válvula queda cerrada, son válvulas que necesitan aire para abrir.

1.3.1.5.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA VALVULA DE CONTROL

Siguiendo el método Cv

- ✓ **Ajuste del rango.-** se define como la relación entre el flujo máximo que se puede controlar y el flujo mínimo que se puede controlar.

$$R = \frac{F \text{ maxiam que se puede controlar}}{F \text{ minimo que se puede controlar}}$$

El flujo máximo que se puede controlar es del 90-95 % de la apertura de la válvula.

El flujo min que se puede controlar es el 10-15 % de la apertura de la válvula.

- ✓ **Flujo de diseño = flujo nominal * el factor de seguridad**

$$F = Cv \frac{\sqrt{\Delta P}}{g}$$

Dónde:

ΔP = la caída de presión de todo el sistema.

REGLAS PRÁCTICAS PARA SELECCIONAR LA CAÍDA DE PRESIÓN DE LA VÁLVULA.

- ✓ **1 regla.-** la caída de presión de la válvula debe ser del 20% al 50% de la caída dinámica de presión total de todo el sistema.
- ✓ **2 regla.-** otra regla consiste en especificar la caída de presión de diseño de la válvula al 25% de la caída dinámica total de todo el sistema o 10 Psi escogiendo la que sea mayor.

Las válvulas de apertura rápida tienen bajo ajuste de rango 1-5. Las válvulas lineales o de porcentaje igual tienen ajustes de rango altos de 15-1 de 20-1 o más.

1.3.1.5.4 GANANCIA DE LAS VALVULAS

Ganancia de las válvulas.-

$$F = Cv \int (vp) = 1 \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}$$

$$Cv \int (vp) = 1(vp)$$

$$F = Cv \int (vp) = 1(vp) \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}$$

$$F = \frac{\delta Cv \int (vp) = 1(vp) \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}}{\delta(vp)}$$

$$Kv = \frac{\delta F}{\delta(VP)}$$

$$Kv = \frac{\delta(Cv)vp = 1(vp) \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}}{VP}$$

$$Kv = \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}$$

1.3.2 ALGUNAS APLICACIONES DEL CONTROL DE CAUDAL DE LÍQUIDOS

1.3.2.1 EN TRATAMIENTO DE AGUAS

Los caudalímetros magnéticos tienen dos áreas de aplicación principales en la industria de gestión de aguas:

- ✓ Tratamiento y distribución de agua potable a los consumidores (instalaciones acuáticas, usuarios domésticos, etc.).
- ✓ Control de recolección de aguas (tanto residuales como agua de lluvia) para su purificación en plantas de tratamiento de aguas de deshecho para su devolución responsable al medio.

Las leyes y normativas aplicables al control de aguas en sistemas de agua potable, sistemas de alcantarillado y plantas de tratamiento de agua son cada vez más estrictas, y el seguimiento detallado de las aguas desde su fuente hasta el consumidor es esencial. Los caudalímetros magnéticos son la elección ideal para la medición en varios puntos en estos sistemas y ayudan a identificar y reducir los puntos de fuga.

1.3.2.2 EN LA INDUSTRIA DE PROCESOS

Muchas y variadas son las demandas que se exige cumplir a los caudalímetros en la industria de procesos: resistencia a fluidos agresivos, requisitos para su uso en zonas de riesgo, adecuación para su integración en sistemas de instrumentación y control de procesos, y una buena relación coste-efectividad para su instalación.

1.3.2.3 INDUSTRIA ALIMENTARIA

En la industria alimentaria son tan importantes las características técnicas de los dispositivos como su adecuación para cumplir con los estándares de higiene exigidos por la norma. La adecuación de los sistemas para permitir la limpieza es crítica en este contexto, y se aplica a

los sistemas de medición con el mismo rigor que a cualquier otro aparato del equipamiento de la planta.

Este hecho impone unos requisitos de durabilidad del revestimiento, que deben adecuarse al fluido que se mide. Los factores críticos son los siguientes: a) Diversos procesos de producción se desarrollan a temperatura ambiente o inferior. b) Las temperaturas típicas involucradas en los procesos de limpieza (CIP) y esterilización (SIP) comprenden un campo de valores entre +70 y +140 °C (160 y 285 °F). Para mejorar los efectos de la limpieza se suelen añadir sustancias alcalinas/cáusticas o sustancias orgánicas.



FIGURA 1.3.2.3 Medidor de caudal

1.4 DISEÑO

El Módulo Didáctico para Control de caudal de Líquidos, tiene como objetivo fundamental, comenzar a implementar el laboratorio de control de proceso, con el diseño y construcción de un equipo en el cual los estudiantes puedan realizar prácticas.

La operación de la planta de control de caudal consiste en controlar el caudal de un líquido en un tanque por medio de un sensor de flujo (controlador), el tanque en el cual se va a realizar la medición de caudal es alimentado a través de una bomba.

La perturbación del sistema, que sirve para observar la capacidad de respuesta de la planta, está a cargo de un variador que simula el caudal de consumo del tanque. Variando la apertura de esta válvula logramos manipular el sistema, y observar la respuesta del mismo.

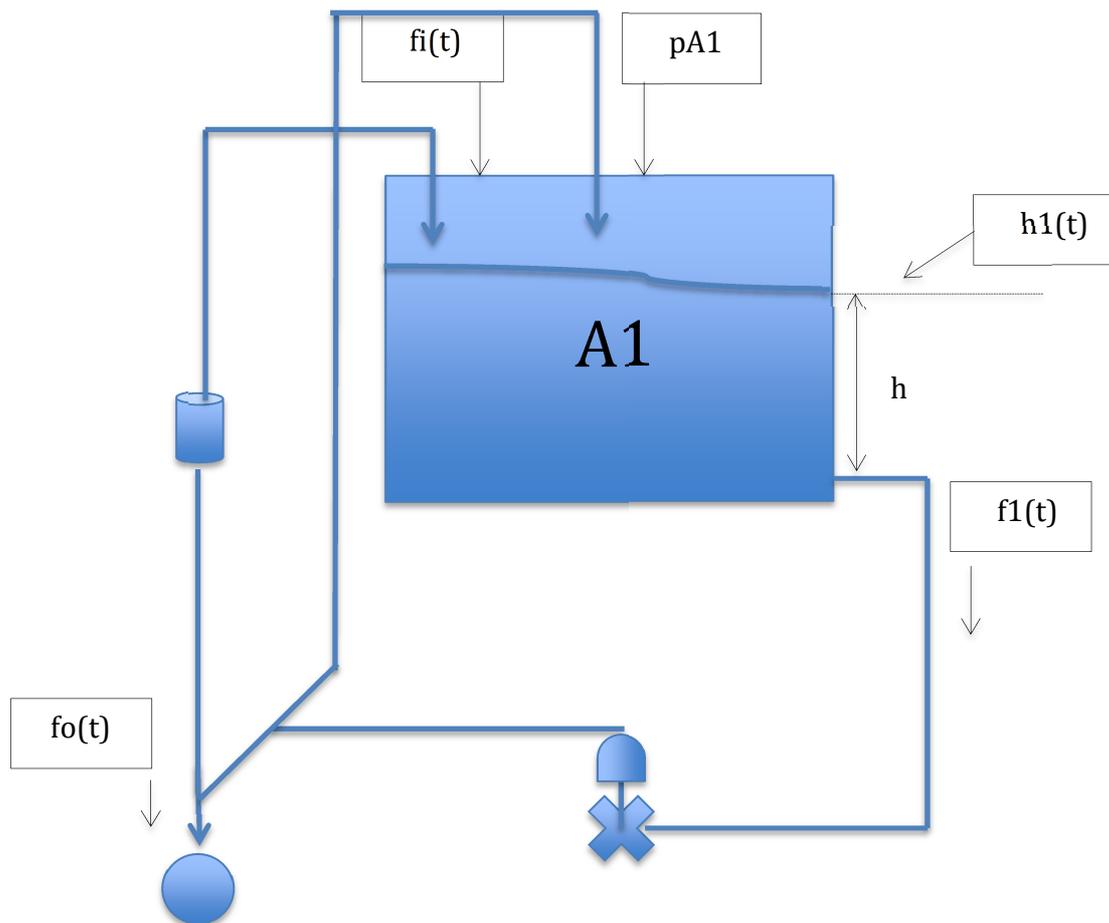
EQUIPO TERMINADO



Fuente CHAVEZ C.; 2014

Figura 1.4 Equipo para control de caudal

**1.4.1 BALANCE DE MASA PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE CAUDAL DE
LIQUIDOS**



Fuente: CHAVEZ C.

Fig. 1.4.1 Balance de masa para sistemas de control de caudal.

Donde:

ρ = densidad del fluido.

A_1 = área transversal del tanque.

El flujo de entrada al tanque $f_i(t)$ y el flujo de salida del tanque a través de la bomba es $f_o(t)$

$$f = Cv \frac{\sqrt{\Delta P}}{g}$$

Donde:

Cv = es el flujo de agua a 15°C en gal/min que pasa a través de una válvula completamente abierta y con una caída de presión de 1Psi.

G = gravedad específica del fluido que pasa a través de la válvula.

ΔP = es la caída de presión a través de la válvula.

$$f = Cv \frac{\sqrt{\Delta P}}{g}$$

$$f = Cv \frac{\sqrt{(\Delta P)}}{g} \Delta P = P_0 - P_1$$

$$\Delta P = P_0 - P_1 \quad \text{Ec. 1.4.1.1}$$

$$\Delta P = P_0 + \rho g h_1(t) - P_1$$

$$f_1(t) = Cv_1 * c \sqrt{h_1(t) Cv_1} = Cv_1 * c$$

$$f_1(t) = Cv_1 * \sqrt{h_1(t)} \quad \text{Ec. 1.4.1.2}$$

BALANCE DINÁMICO DE MASA

$$f_{m \text{ entra}} - f_{m \text{ sale}} = f_{m \text{ acumulada}} \quad \text{Ec. 1.4.1.3}$$

$$\rho f_i(t) - \rho f_1(t) - \rho f_o(t) = \frac{\delta(\rho A_1 h_1(t))}{\delta t}$$

$$\rho f_i(t) - \rho f_1(t) - \rho f_o(t) = \frac{\rho A_1 \delta(h_1(t))}{\delta t}$$

$$f_i(t) - f_1(t) - f_o(t) = \frac{A_1 \delta(h_1(t))}{\delta t} \quad \text{Ec. 1.4.1.4}$$

Ahora reemplazamos $f_1(t)$ obtenidos en la ecuación de la constante de la válvula en las ecuaciones de los balances realizados de la siguiente manera:

$$f_i(t) - C v_1 \sqrt{h_1(t)} - f_o(t) = \frac{A_1 \delta(h_1(t))}{\delta t} \quad \text{Ec. 1.4.1.5}$$

$f_i(t) - C v_1 \sqrt{h_1(t)}$ Esta ecuación es no lineal, vamos a linealizar por el método de aproximación lineal de las series de Taylor.

$$f_1(t) \approx f_1 + \frac{\delta f_1(t)}{\delta h_1(t)} (h_1(t) - h_1) \quad C_1 = \frac{\delta f_1(t)}{\delta h_1(t)}$$

$$f_1(t) \approx f_1 + C_1 (h_1(t) - h_1) \quad C_1 = \frac{\delta C v_1 \sqrt{h_1(t)}}{\delta h_1(t)}$$

$$f_1(t) \approx f_1 + C_1 (H_1(t)) \quad C_1 = \frac{1}{2} C v_1 h^{-1/2}$$

Volvemos a reemplazar $f_1(t)$ que acabamos de calcular:

$$f_i(t) - (f_1 + C_1 H_1(t)) \cdot -f_o(t) = \frac{A_1 \delta h_1(t)}{\delta t}$$

Realizamos un balance en condiciones iniciales estables

$$\rho f_i(t) - \rho f_o(t) - \rho f_1(t) = 0$$

$$f_i(t) - f_o(t) - f_1(t) = 0$$

A la ecuación anterior le restamos la ecuación del balance de masa estándar y se tiene:

$$f_i(t) - (f_1 + C_1 H_1(t)) \cdot -f_o(t) = \frac{A_1 \delta h_1(t)}{\delta t} - f_i(t) - f_o(t) - f_1(t) = 0$$

$$(f_i(t) - f_i(t)) - C_1 H_1(t) - (f_o(t) - f_o(t)) = \frac{A_1 \delta h_1(t)}{\delta t} \quad (1)$$

$$F_1(t) - C_1 H_1(t) - F_o(t) = \frac{A_1 \delta h_1(t)}{\delta t}$$

$$\frac{A_1 \delta (H_1(t))}{\delta t} + C_1 H_1(t) = F_1(t) - F_o(t)$$

$$\frac{1}{C_1} \left(\frac{A_1 \delta (H_1(t))}{\delta t} + C_1 H_1(t) \right) = \frac{1}{C_1} (F_1(t) - F_o(t))$$

$$\frac{1}{C_1} \frac{A_1 \delta (H_1(t))}{\delta t} + \frac{1}{C_1} C_1 H_1(t) = \frac{1}{C_1} F_1(t) - \frac{1}{C_1} F_o(t) \quad K_1 = \frac{1}{C_1}$$

$$\frac{1}{C_1} \frac{A_1 \delta (H_1(t))}{\delta t} + H_1(t) = \frac{1}{C_1} F_1(t) - \frac{1}{C_1} F_o(t) \quad \tau_1 = \frac{A_1}{C_1}$$

$$\tau_1 \frac{\delta(H_1(t))}{\delta t} + H_1(t) = \frac{1}{c_1} F_1(t) - \frac{1}{c_1} F_o(t) \quad \text{Ec. 1.4.1.6}$$

$$\tau_1 \frac{\delta(H_1(t))}{\delta t} + H_1(t) = K_1 F_1(t) - K_1 F_o(t) \quad \text{Ec. 1.4.1.7}$$

Se resuelve utilizando el método de transformadas de la place como se explica a continuación:

$$\tau_1 \frac{\delta(H_1(t))}{\delta t} + H_1(t) = K_1 F_1(t) - K_1 F_o(t)$$

$$\tau_1 \mathcal{L}\left\{\frac{\delta(H_1(t))}{\delta t}\right\} + \mathcal{L}\{H_1(t)\} = K_1 \mathcal{L}\{F_1(t)\} - K_1 \mathcal{L}\{F_o(t)\}$$

$$\tau_1 s H_1(s) + H_1(s) = K_1 F_1(s) - K_1 F_o(s)$$

$$H_1(s)(\tau_1 s + 1) = K_1 F_1(s) - K_1 F_o(s)$$

$$H_1(s) = \frac{K_1}{(\tau_1 s + 1)} F_1(s) - \frac{K_1}{(\tau_1 s + 1)} F_o(s) \quad \text{Ec. 1.4.1.8}$$

1.4.2 ESTRUCTURA METALICA

Para el montaje del equipo de control de caudal se diseñó una estructura metálica con un diseño básico, una mesa que cuenta con dos compartimientos uno en su parte inferior (donde se ubica la bomba y el panel de control) y otro en la superior, donde se ubican el tanque de medición con el sensor.



Fuente CHAVEZ C.; 2014

Figura 1.3.1 Estructura Metálica

1.4.3 TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Este tanque está construido de una lámina de acrílico de 5 mm de espesor. Posee una base rectangular de dimensión 40cm por 40cm y una altura de 50cm. Se hizo un orificio de 1/2" de diámetro en la parte frontal inferior del tanque, donde sale una tubería que se conecta directamente a la bomba, que se utiliza para realizar las perturbaciones al sistema y para la recirculación del líquido.

Calculo del Área transversal del tanque

$$A = a * l \quad \text{Ec. 1.4.3.1-1}$$

Volumen del Tanque

$$V \text{ tanque } 1 = a * l * h \quad \text{Ec. 1.4.3.1-2}$$

Para construir este tanque se utilizó el acrílico transparente para que sea posible tener una visión clara del nivel y de este modo hacer una comparación de los datos obtenidos con el sensor / transmisor.

Las dimensiones del tanque se ajustaron tratando de cubrir el rango de operación de la bomba, pero al mismo tiempo existieron factores que influyeron como lo fue el espacio, costo de fabricación del mismo y el hecho de ser un elemento para uso académico, además de su traslado en el laboratorio de control de proceso.



Fuente CHAVEZ C.; 2014

Figura 1.4.3 Tanque de Almacenamiento

1.4.4 BOMBA

El equipo posee una bomba, con la cual el agua es llevada del tanque principal a través de una tubería. La bomba es un elemento que puede ser seleccionado a través de los siguientes criterios:

- ✓ Modelo 1313480103 HP 1.5
- ✓ Capacidad Máxima 3HP
- ✓ Cabezal máximo (Altura máxima de descarga)
- ✓ Altura máxima de succión 50 metros
- ✓ Potencia
- ✓ Diámetro bomba 30 cm
- ✓ Revoluciones por minuto 3450 rpm
- ✓ Voltaje 220 a 415 voltios



Fuente CHAVEZ C.; 2014

Figura 1.4.4 Bomba de Agua

1.4.5 SENSOR DE FLUJO DE AGUA

Este sensor de flujo de agua se compone de un cuerpo de válvula plástica, un rotor de agua, y un sensor de efecto Hall. Cuando el agua fluye a través de los rodillos del rotor, el rotor gira.

Su velocidad cambia con diferentes tasas de flujo. El sensor de efecto Hall emite la señal de pulso correspondiente.

CARACTERÍSTICAS

- ✓ Compacto, fácil de instalar
- ✓ Enroscado hermético
- ✓ Sensor de efecto Hall de alta calidad
- ✓ Cumple con la norma RoHS

ESPECIFICACIONES

- ✓ Voltaje de operación: 5V-24V
- ✓ Corriente máxima: 15mA (DC 5V)
- ✓ Peso: 194 gramos
- ✓ Diámetros externo: 41mm
- ✓ Rango de caudal: 1 ~ 90 L / min
- ✓ Temperatura de funcionamiento: 0 ° C ~ 80 ° C
- ✓ Temperatura del líquido: <120 ° C
- ✓ Humedad de funcionamiento: 35% ~ 90% RH
- ✓ Presión de trabajo: por debajo de 1.75 Mpa
- ✓ Tienda temperatura: -25°C ~ +80°C



Fuente CHAVEZ C.; 2014

Figura 1.4.5 Sensor de Flujo de Agua

1.4.6.-TUBERIA PVC

El caudal de salida del tanque principal es llevado al tanque reservorio a través de una tubería en la cual se tiene una servoválvula, formando así un circuito cerrado de agua.

Como se trata de agua se utiliza tubería pvc se caracteriza por sus altas propiedades físicas y resistencia a la corrosión, soporta temperaturas de hasta 60°C sin embargo es vulnerable a algunos hidrocarburos clorinados y aromáticos. Su apariencia es en el caso del Cedula 80 Gris oscuro y el Cedula 40 es de un color Crema Claro, se utiliza tubería de 1/2 “.



Fuente CHAVEZ C.; 2014

Figura 1.4.6 Tubería PVC

1.4.7 ACCESORIOS

Los accesorios utilizados en la construcción del equipo son:

1.4.7.1 Codos: Cambia la dirección del flujo original, con un ángulo específico ya sea 180° , 90° , 45° , etc. Puede reducirse o conservar su mediada original.

1.4.7.2 Reducción bushing: A diferencia de todas las reducciones que hemos visto que reducen dos conexiones macho la bushing reduce de hembra a macho. Por lo regular es roscada o cementar en los plásticos, aunque no es muy común, cuando socket well se le llama inserto.

1.4.7.3 Unión universal: Su función es la de unir dos conexiones con terminación macho de el mismo diámetro, mantiene la misma dirección e invariablemente sus extremos son hembras.

1.4.7.4 Válvulas de Esfera o bola: Una esfera perforada en su centro es colocada en el interior de esta válvula, permitiendo que al girar 90° la esfera el flujo sea interrumpido inmediatamente, estas válvulas son más propensas a crear un golpe de ariete en fluido que no se comprimen.

1.4.7.5 Tapón: Ya sea cachucha o macho su función es bloquear o terminar con una línea de tubería.



Fuente CHAVEZ C.; 2014

Figura 1.4.7 Accesorios PVC

1.4.8 PANEL DE CONTROL

El módulo didáctico de control de caudal de líquidos construido permite trabajar modo de operación MANUAL Este modo de operación permite realizar las siguientes operaciones:

- ✓ Prender bomba.
- ✓ Apagar bomba.
- ✓ Encendido de sensor de medición de caudal.
- ✓ Visualizar el caudal del líquido a través del tanque.
- ✓ Visualizar el estado de las variables del sistema mediante el encendido automático del sensor cuando se encuentra desde lo mínimo hasta alcanzar el punto máximo.

OPLC UNITRONICS JAZZ: Características: alimentación 24VDC, pantalla HMI tipo texto de 2 líneas x16 caracteres, 9 entradas Digitales, 2 entradas digitales/analógicas (0...10Vcd), 2 entradas analógicas (0/4...20mA), 2 entradas analógicas (PT100, termocupla), 5 salidas a Relé,

5 salidas a Transistor, 5 salidas analógicas ($\pm 10V$, 4-20mA), 1 puerto de comunicación RS232/RS485. Incluye software gratuito de programación y otras herramientas de software. Marca UNITRONICS, origen ISRAELI.



Fuente CHAVEZ C.; 2014

Figura 1.4.8 Variador



Fuente CHAVEZ C.; 2014

Figura 1.4.8 PLC

1.5 DIAGNOSTICO

Para la adquisición de datos en el laboratorio se realiza un montaje simple con el cual tomamos datos de llenado y de funcionalidad del sensor y de la bomba, estos datos fueron ordenados y tabulados.

Los inconvenientes que se tuvo es la utilización de vidrio para el tanque el cual no dio buen resultado ya que debido a la fragilidad que estos poseen no se puede realizar agujeros sobre ellos ya que se fisura y rompe con facilidad, también se tuvo dificultad al realizar el diseño ya que iba a succionar el agua directamente de un tanque y retornar al mismo formando un circuito cerrado de agua, llegando a la conclusión que el tanque debía ser un material más resistente que el vidrio debido a las vibraciones de la bomba en el equipo montado, por lo que este tanque se construyó en acrílico por su facilidad de manipulación y transportación.

Mientras que una vez adquiridos los datos en el laboratorio se los analiza obteniendo un comportamiento lineal con una eficiencia del 95%, dando a conocer que el procedimiento si cumple con las expectativas planteadas esperando tener el mismo resultado o uno aparente una vez construido el equipo.

CAPÍTULO II

2.-DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN:

2.1.-PARTE EXPERIMENTAL.

2.1.1.-MUESTREO

Un modelo nunca puede ser aceptado como una verdadera descripción del sistema. Sin embargo puede ser reconocido como una descripción lo suficientemente buena de ciertos aspectos que son de particular interés para el usuario. El muestreo que se realiza es aleatorio simple en periodos de tiempo, sin afectar la hora en la que se dé el mismo ya que con este equipo se puede tomar directamente las variables que se necesitan.

Lo que se espera con la identificación de la planta es obtener un modelo que represente las características de la misma para las condiciones en las cuales esta va a trabajar. Una vez hallado un modelo se procederá a trabajar con este para así predecir el comportamiento de la planta ante ciertas situaciones.

Para la identificación de la planta de control de caudal se tuvo que llevar a cabo el diseño de una etapa de experimentación, en la cual se definió la variable a medirse, la señal estímulo a ser aplicada al sistema, el periodo de experimentación, en fin las condiciones bajo las cuales se realizaría el experimento.

Debemos tener en cuenta el efecto de la no linealidad de la planta de control de caudal. Sin embargo dentro de las estimaciones realizadas para la implementación de este experimento tenemos que:

- ✓ Se escogerá un rango alrededor de un punto de operación, rango sobre el cual se tomaran las mediciones.
- ✓ La apertura de la válvula de salida se mantendrá en diferentes aperturas a lo largo de la realización del experimento.
- ✓ El análisis del modelo teórico del equipo de medición de caudal es muy importante ya que nos sirve de apoyo o guía dentro del proceso de la identificación de la planta.
- ✓ Además nos da un conocimiento previo de las leyes que rigen el comportamiento de dicha planta, lo que nos ayuda a mejorar el proceso de identificación.

2.1.2.-METODOLOGIA

2.1.2.1.- METODOS Y TÉCNICAS

A continuación se explican métodos y técnicas indispensables para poder cumplir con satisfacción este proyecto:

2.1.2.1.1.- METODOS

Se fundamenta en el método cuantitativo, utilizando como procesos lógicos la inducción y la deducción ya que es necesario conocer los hechos importantes que ocurren en el proceso, es decir las variables que presenta el equipo de control de caudal para poder llegar a lo general que está identificado como la construcción del equipo. Mediante estos se puede despejar muchas interrogantes que se crean durante el proceso de diseño y construcción así como presión a la que va a medir el caudal, valores de tiempo de llenado y vaciado del tanque de medición, para poder determinar rangos de medición.

2.1.2.1.2.-TECNICAS

Durante este proyecto utilizaremos algunas técnicas para poder obtener variable que necesitamos entre las cuales tenemos:

PRUEBAS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL SENSOR DE FLUJO DE AGUA

| FUNDAMENTO | SUSTANCIAS Y REACTIVOS | EQUIPOS Y MATERIALES | PROCEDIMIENTO | CALCULOS |
|--|------------------------|----------------------|---|--|
| <p>determinar el comportamiento de la válvula al momento del desalojo del agua</p> | <p>Agua</p> | <p>Cronómetro</p> | <p>En el caso del sensor de flujo de agua su correcto funcionamiento se determina realizando la siguiente prueba importantes: el caudal de salida para diferentes porcentajes de apertura de la válvula</p> <p>Para esta prueba se regula el porcentaje de apertura de la válvula de manera manual.</p> <p>La prueba de posición de apertura de la válvula se asigna varios porcentajes de apertura y se toman los valores decimales correspondientes a la posición de la misma y con ello se saca el error.</p> <p>Para la prueba apertura de la válvula se toma el tiempo que el fluido pasa cuando la válvula se encuentra totalmente cerrada, $\frac{1}{4}$ de apertura, $\frac{1}{2}$ apertura $\frac{3}{4}$ de apertura y totalmente abierta de fluido en el tanque</p> <p>Con esto determinamos el caudal de del fluido para determinar si el sistema es estable.</p> | <p>El caudal se calcula de la siguiente manera:</p> $Q = \frac{A \cdot h}{t}$ <p>Donde:</p> <p>Q= caudal en (L/s)</p> <p>A= área expresada en (m²)</p> <p>h= altura expresada en (m)</p> <p>t = tiempo de llenado (s)</p> <p>a = ancho del tanque (m)</p> <p>l = largo del tanque (m)</p> <p>Para calcular el rango tenemos la siguiente ecuación:</p> $\text{RANGO} = \text{CAUDAL MAXIMO} - \text{CAUDAL MINIMO}$ |

RELACIÓN VELOCIDAD FRECUENCIA DE LA BOMBA

La expresión matemática que relaciona la velocidad de la máquina con los parámetros mencionados es:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot f}{P}$$

Donde:

- f: Frecuencia de la red a la que está conectada la máquina (Hz)
- P: Número de pares de polos que tiene la máquina
- p: Número de polos que tiene la máquina
- n: Velocidad de sincronismo de la máquina (revoluciones por minuto)

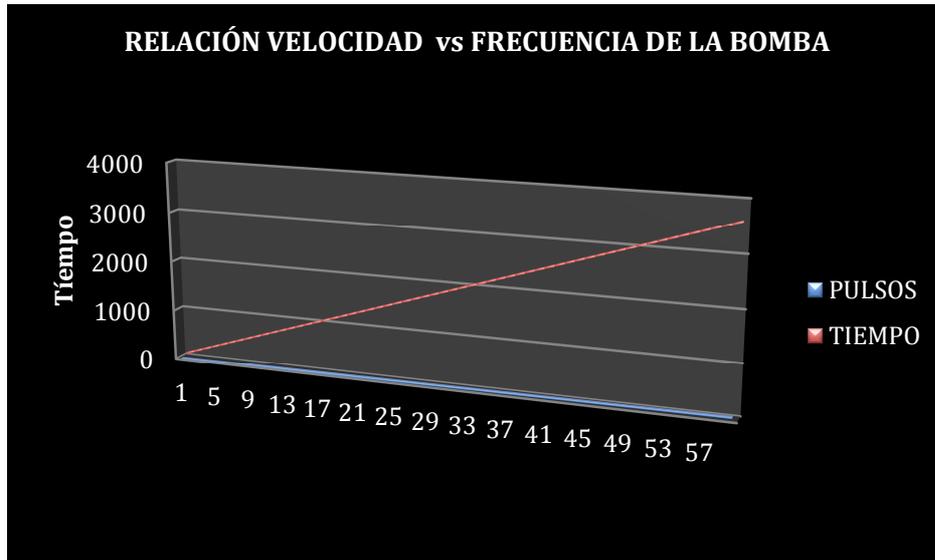
Es decir si variamos la frecuencia de alimentación de la bomba variara su velocidad en nuestro caso tendríamos la siguiente curva de velocidad (n) VS frecuencia.

Donde:

$$P=1$$

F=Variable de 0 a 60

$$n = \frac{60 \cdot f}{1}$$



GRAFICA 1. Relación Velocidad Vs Frecuencia De La Bomba

2.2.-DATOS EXPERIMENTALES

2.2.1.-DATOS PARA LA BOMBA

Se realiza pruebas del caudal que sale de la bomba y en las diferentes aperturas de la válvula de bola para poder calcular que tan eficiente es la bomba y la eficiencia del equipo, luego de o tomar estos datos se procede a graficar una curva característica la misma que tiene un comportamiento lineal ascendente. A continuación se detalla los datos tomados

Tabla2.2.1-1

DATOS DE CAUDAL EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR

FRECUENCIA (HZ)

| FRECUENCIA (Hz) | TIEMPO(min) | VOLUMEN(L) | PULSOS DEL SENSOR |
|-----------------|-------------|------------|-------------------|
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 15 | 1 | 1.1 | 1800 |
| 15 | 1 | 1.2 | 1837 |
| 15 | 1 | 1.4 | 1829 |
| 30 | 1 | 3.10 | 2967 |
| 30 | 1 | 3.16 | 2835 |
| 30 | 1 | 3.18 | 2909 |
| 45 | 1 | 5.26 | 3829 |
| 45 | 1 | 5.31 | 3789 |
| 45 | 1 | 5.45 | 3790 |
| 60 | 1 | 5.99 | 4360 |
| 60 | 1 | 6.02 | 4232 |
| 60 | 1 | 6.05 | 4363 |

Fuente CHAVEZ C.; 2014

Donde:

F. Frecuencia (Hz).G

T. Tiempo (min)

V. Volumen (l)

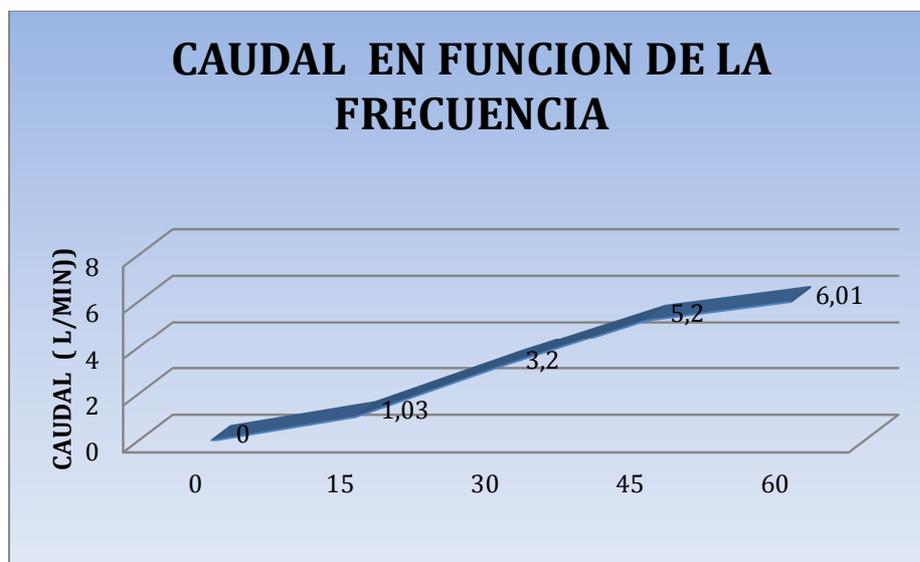
Para la determinación del caudal que sale de la bomba también se lo realiza directamente de la tubería para tomar un valor de caudal real y poder obtener la eficiencia del equipo.

Tabla 2.2.1-2

DATOS DE VOLUMEN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

| FRECUENCIA (Hz) | Q (L/min) | V (L) | T (min) |
|-----------------|-----------|-------|---------|
| 0 | 0 | 0 | 1 |
| 15 | 1,03 | 1,03 | 1 |
| 30 | 3,20 | 3,20 | 1 |
| 45 | 5,20 | 5,20 | 1 |
| 60 | 6,01 | 6,01 | 1 |

Fuente CHAVEZ C.; 2014



Fuente CHAVEZ C.; 2014

2.2.2 DATOS DEL SENSOR DE FLUJO

Para determinar la eficiencia del sensor de flujo realizamos análisis de tiempo de paso del líquido mediante la frecuencia del motor, en este caso con diferentes frecuencias programadas desde el variador hasta llegar a una frecuencia máxima de 60 Hz. a continuación los datos tomados con sus respectivas curvas características.

Tabla 2.2.2

**DATOS DE CAUDAL EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR
FRECUENCIA (HZ) EN PROMEDIO DE PULSOS ELECTROMAGNÉTICOS**

| FRECUENCIA (Hz) | TIEMPO (min) | VOLUMEN(L) | PROMEDIO DEL VOLUMEN | PULSOS DEL SENSOR | PROMEDIO DE PULSOS |
|-----------------|--------------|------------|----------------------|-------------------|--------------------|
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | | | |
| 0 | 1 | 0 | | | |
| 15 | 1 | 1,1 | 1,23 | 1800 | 1822 |
| 15 | 1 | 1,2 | | | |
| 15 | 1 | 1,4 | | | |
| 30 | 1 | 3,1 | 3,15 | 2967 | 2903,67 |
| 30 | 1 | 3,16 | | | |
| 30 | 1 | 3,18 | | | |
| 45 | 1 | 5,26 | 5,34 | 3829 | 3802,67 |
| 45 | 1 | 5,31 | | | |
| 45 | 1 | 5,45 | | | |
| 60 | 1 | 5,99 | 6,02 | 4360 | 4318,33 |
| 60 | 1 | 6,02 | | | |
| 60 | 1 | 6,05 | | | |

Fuente CHAVEZ C.; 2014

2.3.-DATOS ADICIONALES

A más de los datos obtenidos se necesita conocer las dimensiones del tanque para poder desarrollar los cálculos.

Tabla. 2.3-1 DATOS ADICIONALES

| A(cm) | L(cm) | H (cm) | ρ . (Kg/m ³) |
|-------|-------|--------|-------------------------------|
| 40 | 40 | 50 | 1000 |

Fuente CHAVEZ C.; 2014

Donde:

- ✓ **L.** largo de los tanques (cm)
- ✓ **A.** ancho de los tanques(cm)
- ✓ **H.** Altura del tanque (cm)
- ✓ **ρ .** Densidad del agua (Kg/m³)

CAPITULO III

3.-DISEÑO

3.1.-CALCULOS

3.1.1.- CALCULOS REALIZADOS PARA EL DISEÑO DEL TANQUE

3.1.1.1.- TANQUE DE ALMACENAMIENTO

El área transversal de este tanque que se calculó de acuerdo a la ecuación 1.3.3.1-1 es la siguiente:

Dimensiones para el tanque de almacenamiento

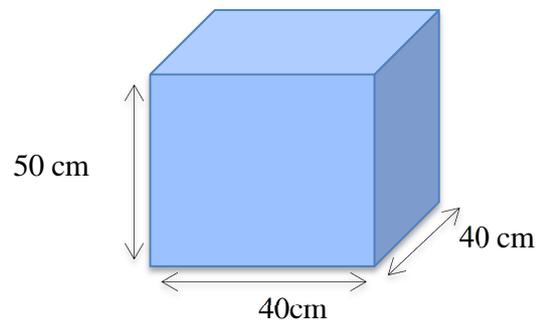


Fig. 3.1.1.1-1.- área del tanque de almacenamiento

Área transversal del tanque de almacenamiento

$$A = (40 * 40)cm^2$$

$$A = 1600 cm^2$$

Volumen del tanque 1 de acuerdo a la ecuación 1.3.3.1-1 es el siguiente

$$V \text{ tanque} = (40 * 40 * 50) \text{cm}^3$$

$$V \text{ tanque} = 80000 \text{cm}^3 \frac{L}{1000 \text{cm}^3}$$

$$V \text{ tanque} = 80 L$$

3.1.2.-BOMBA

La bomba marca FRANKLIN ELECTRIC que se escogió es la que se muestra en la figura



Fig. 3.1.2-1.- Bomba

Las características de esta bomba son las siguientes:

Modelo: BOAP-1 1/2

Capacidad Máxima (L/min): 40

Cabezal Max (m): 40

Altura máxima de succión (m): 40

Potencia (HP): 0.5 220v

Diámetro bomba (1"): 1" * 1"

Peso neto (Kg): 5.3

Dimensión general (mm): 265 * 120 * 155

3.1.3.-CALCULO REALIZADOS PARA LA VALVULA

Mediante el despeje de la ecuación siguiente podemos calcular el Cv para este diseño.

$$F = Cv \frac{\sqrt{\Delta P}}{g}$$

Caída de presión:

De acuerdo a la ecuación 1.3.8.1-1 se tiene.

$$P = 1000 \frac{kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{s^2} * 0.3m = 2940 \frac{kg}{m^2}$$

$$\Delta P = (3920 - 2940) \frac{kg}{m^2}$$

$$\Delta P = 980 \frac{kg}{m^2} * \frac{Pas}{\frac{kg}{m^2}} * \frac{kPas}{1000Pas} * \frac{Bar}{100kPas} * \frac{0.069 Psi}{Bar} = 6.72 * 10^{-4} Psi$$

Constante de la válvula

$$F = 0.184 \frac{l}{s}$$

Gravedad.

$$g = 9.8 \frac{m}{s^2}$$

Calculo:

$$Cv = \frac{\text{factor de seguridad} * F}{\sqrt{\frac{\rho g h}{\gamma}}}$$

$$Cv = \frac{1.5 * 0.182 \frac{l}{s}}{\sqrt{\frac{3430 \frac{kg}{m^2}}{9.8 \frac{m}{s^2} * 1000 \frac{kg}{m^3} ms^2}}}$$

$$Cv = 0.591$$

3.1.4 CALCULOS REALIZADOS PARA EL SENSOR

Según la ecuación 1.3.8.1-1 se tiene los siguientes cálculos

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$h \text{ máxima} = 0,5 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$p = 1000 * 9.8 * 0.5$$

$$p = 3.2 \text{ Kpa}$$

Dónde:

$$1 \text{ bar} = 100 \text{ Kpa.}$$

Entonces se tiene:

$$p = 0.0392 \text{ Bar}$$

Dónde:

$$1 \text{ psi} = 0.069 \text{ bar.}$$

Entonces se tiene que la presión relativa máxima que debe soportar el sensor es:

$$P = 0,57 \text{ psi}$$

3.1.5 CÁLCULOS REALIZADOS A LA BOMBA.

Para la bomba se realiza cálculos para encontrar el caudal en L/s y poder determinar la diferencia de caudales entre la entrada y la salida del tanque, mediante las ecuaciones: 2.1.2.1.2.1-1 y 2.1.2.1.2.1-2.

Tabla.3.1.5-1

CAUDAL EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

| FRECUENCIA (Hz) | Q (L/min) | V (L) | T (min) |
|-----------------|-----------|-------|---------|
| 0 | 0 | 0 | 1 |
| 15 | 1,03 | 1,03 | 1 |
| 30 | 3,20 | 3,20 | 1 |
| 45 | 5,20 | 5,20 | 1 |
| 60 | 6,01 | 6,01 | 1 |

Fuente: CHAVEZ C.; 2014

Tabla. 3.1.5-2

OBTENCIÓN DE CAUDAL A PARTIR DEL VOLUMEN O EL TIEMPO

| APERTURA DE LA VALVULA | Caudal (L/s) | T(s) |
|------------------------|---------------|------|
| 0 | 0 | 60 |
| ¼ | 1,03 | 60 |
| ½ | 3,20 | 60 |
| ¾ | 5,20 | 60 |
| 4/4 | 6,01 | 60 |

Fuente CHAVEZ C.; 2014

3.1.6 CÁLCULOS REALIZADOS AL SENSOR.

Para medir y obtener el rango de medición del sensor se procede a tomar medidas de la altura máxima y mínima que en la que detecta la medición de nivel a través del Sensor.

Según los resultados tenemos la altura máxima que el sensor mide de 35,4cm y una altura mínima de 4,6cm con estos datos calculamos el rango de medición

$$\mathbf{Escala} = \mathbf{caudal\ menor} - \mathbf{caudal\ mayor}$$

$$\mathbf{rango} = \mathbf{caudal\ mayor} - \mathbf{caudal\ menor}$$

3.1.7.- CALCULOS GENERALES REALIZADOS AL EQUIPO

Mientras que para hallar la relación que existe entre la altura y el flujo tenemos los siguientes cálculos luego de remplazar en las ecuaciones 2.1.2.1.2.3-1, 2.1.2.1.2.3-2, obteniendo los siguientes resultados.

3.1.8.- CÁLCULOS REALIZADOS DE LA INVERSIÓN.

En la siguiente tabla se detalla los costos del equipo en los cuales se incluye costos de las partes del equipo, como costos por mano de obra funcionamiento y gastos extras en insumos que se ha tenido durante la elaboración de este proyecto.

Tabla.3.1.8-1

COSTO DE MATERIALES UTILIZADOS PARA EL ENSAMBLAJE DEL EQUIPO

| N° | MATERIALES | DESCRIPCION | Cant. | unidad | Costo unit | costo total |
|----|-------------|--|-------|----------|--------------|----------------|
| 1 | CODO | PROPILENO ROSCADO 1/2"x90 | 10 | UNIDADES | 0,45 | 4,5 |
| 2 | UNION | RED PROPILENO 1"X1/2" | 6 | UNIDADES | 0,56 | 3,36 |
| 3 | TUBO | PROPILENO 12 MTS | 1 | UNIDADES | 12,20 | 12,20 |
| 4 | T | PROPILENO ROSCADO 1/2" | 2 | UNIDADES | 1,50 | 3,00 |
| 5 | ACRILICO | ACRILICO | 1 | UNIDADES | 90 | 90 |
| 6 | UNION UNIT. | POLIPROPILENO 1/2" | 7 | UNIDADES | 0,65 | 5 |
| 7 | VALVULA | 1/4 vuelta fv | 3 | UNIDADES | 4,50 | 13,5 |
| 8 | CINTA | teflón 1/2" 10m | 2 | UNIDADES | 0,50 | 0,516 |
| 9 | BOMBA | Periférica 1 1/2 HP truper | 1 | UNIDADES | 185,00 | 185 |
| 10 | SENSOR | para flujo de agua | 1 | UNIDADES | 38,90 | 39 |
| 11 | OPLC | modelo Jazz marca unitronics | 1 | UNIDADES | 593,27 | 593,27 |
| 12 | FUENTE | Fuente de poder 110 Vca/ 24 Vca | 1 | UNIDADES | 110 | 110 |
| 13 | VARIADOR | VARIADOR DE VELOCIDAD DE 3 HP 1 F DE 220 V | 1 | UNIDADES | 330 | 330 |
| 14 | BRAKER | BRAKER 1P RIEL DOMAE | 1 | UNIDADES | 4,59 | 4,59 |
| 15 | BRAKER | BRAKER 3P RIEL DOMAE | 1 | UNIDADES | 15,48 | 15,48 |
| 16 | BASE | BASE FUSIBLE CILINDRICO 3P | 1 | UNIDADES | 4,07 | 4,07 |
| 17 | PULSADOR | PULSADOR 40M T/ HONG GIRO | 1 | UNIDADES | 2,18 | 2,18 |
| 18 | BASE | BASE FUSIBLE CILINDRICO 3P | 1 | UNIDADES | 1,38 | 1,38 |
| 19 | FUSIBLE | FUSIBLE CILINDRICO 1A | 1 | UNIDADES | 0,31 | 0,31 |
| 20 | FUSIBLE | FUSIBLE CILINDRICO 32A | 3 | UNIDADES | 0,31 | 0,93 |
| 21 | RIEL | RIEL DIN ACERO | 1 | UNIDADES | 1,64 | 1,64 |
| 22 | CANALETA | CANALETA RANUDARA | 1 | UNIDADES | 3,72 | 3,72 |
| 23 | BORNERA | BORNERA RIEL 12 AWG. 20 A. 2,5MM | 10 | UNIDADES | 0,93 | 9,3 |
| 24 | GABINETE | GABINETE MODULAR 60*40*20 PESADO | 1 | UNIDADES | 5,72 | 60,81 |
| 25 | CABLE | CONDUCTOR CONCENTRICO | 12 | METROS | 2,36 | 28,32 |
| | | | | | TOTAL | 1521,01 |

Fuente CHAVEZ C.; 2014

Se tiene un total de gastos por concepto de partes para el equipo de \$1521.01 dólares Americanos.

Tabla. 3.1.8-2

GASTOS OPERACIONALES DEL EQUIPO

| Nº | DESCRIPCION | PARTES DEL EQUIPO | COSTO |
|--------------|--------------|------------------------------------|------------|
| 1 | Construcción | Estructura Metalica | 85 |
| 2 | Construcción | Tanque | 80 |
| 3 | Instalación | Sistema de programacion del sensor | 250 |
| TOTAL | | | 415 |

Fuente CHAVEZ C.; 2014

En cuanto a ensamblaje y funcionamiento del equipo se tiene \$415, oo dólares en gastos incluidos pruebas realizadas.

Tabla. 3.1.8-3

RECURSOS MATERIALES

| Nº | DESCRIPCION | COSTO |
|--------------|--------------------|------------|
| 1 | Transporte | 60 |
| 2 | Material Didáctico | 55 |
| 3 | Internet | 40 |
| | Impresiones | 85 |
| TOTAL | | 240 |

Fuente: CHAVEZ C.; 2014

En cuanto a insumos y gastos varios se invierte \$240 dólares desde el inicio del proyecto hasta su culminación.

3.2.- RESULTADOS

3.2.1.-RESULTADOS OBTENIDOS DEL CÁLCULO DE DISEÑO

Después de realizar los respectivos cálculos se llega a obtener los siguientes resultados.

Tabla. 3.2.1

RESULTADOS OBTENIDOS DEL CÁLCULO DE DISEÑO

| Nº | Área tanque (cm²) | Volumen del tanque | Cv | Presión PSI |
|-----------|-------------------------------------|---------------------------|-----------|--------------------|
| 1 | 1600 | 80 | 0,591 | 0,57 |

Fuente CHAVEZ C.; 2014

TABLA 3.2.2

CURVAS OBTENIDAS CON LOS DATOS ADQUIRIDOS PARA LA BOMBA

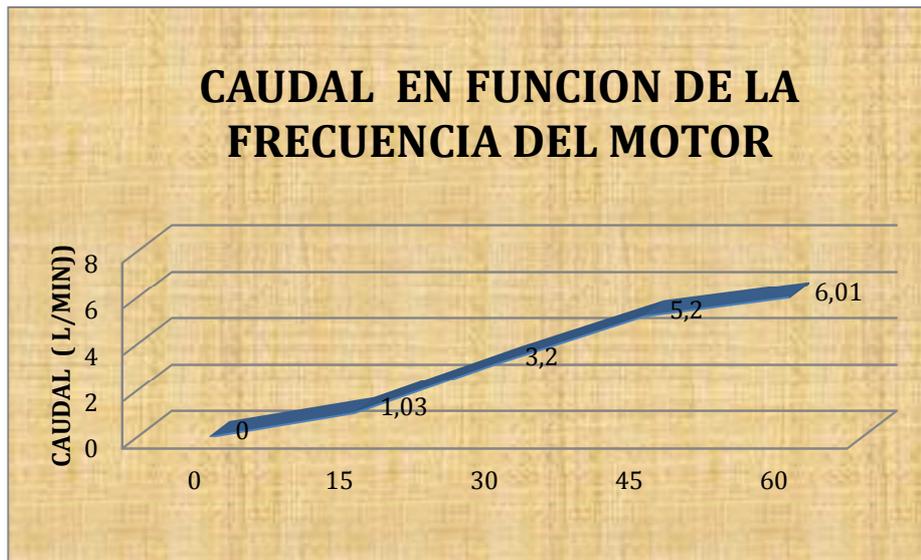
Para la tabla 3.2.2 datos de tiempo en función del caudal se tiene una curva de tipo lineal ascendente que relaciona la frecuencia del motor con el caudal

Tabla. 3.2.2

DATOS ADQUIRIDOS PARA LA BOMBA

| FRECUENCIA (Hz) | Q (L/min) | V (L) | T (min) |
|-----------------|-----------|-------|---------|
| 0 | 0 | 0 | 1 |
| 15 | 1,03 | 1,03 | 1 |
| 30 | 3,20 | 3,20 | 1 |
| 45 | 5,20 | 5,20 | 1 |
| 60 | 6,01 | 6,01 | 1 |

Fuente CHAVEZ C.; 2014



Fuente CHAVEZ C.; 2014

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez culminado el proyecto se tiene la satisfacción de haber cumplido y alcanzado los objetivos propuestos, desde la simulación de un equipo piloto para determinar cuál es el modelo que más nos conviene, estableciendo el diseño respectivo para la construcción y ensamblaje del equipo y culminando con la toma de datos y el análisis respectivo de los mismos en tiempo real.

En la gráfica 3.2.2-1 o curva característica del tiempo de llenado en función de la frecuencia del motor y se observa que va en sentido ascendente, lo que quiere decir que mientras más se acelera el motor mayor el caudal que pase por el sensor teniendo un comportamiento lineal, actuando directamente proporcional el tiempo con el caudal, ya que mientras mayor es el caudal el área de llenado va a ser mayor y por lo tanto va a llenarse más rápido el volumen ese volumen.

En cuanto al caudal que sale de la bomba tenemos una media de 0,58603216 L/s el cual se lo hace relación con el caudal que se obtiene de relacionar la altura con el tiempo de llenado y el área del tanque que tiene un valor medio de 0,52815833L/s obteniendo una eficiencia de 90,1% del equipo .

Pudiendo el mismo ser comparado con valores obtenidos al utilizar otros equipos de control de caudal. De la misma manera se realiza para determinar la eficiencia de la válvula para lo cual se realizó la medición del tiempo que se demora en vaciar el tanque a diferentes alturas

sin presencia de la válvula a lo que se conocerá como tiempo de vaciado real obteniendo un valor medio de 0,23345203 L/s además se observa que la curva va en sentido descendente determinando que mientras menor altura de vaciado tenemos el tiempo que se demora va a ser mayor porque la presión también va a disminuir y vamos a tener una menor fuerza de empuje.

Luego realizamos el mismo procedimiento cuando la válvula está instalada y a diferentes porcentajes de apertura del vástago determinando que la eficiencia es muy pequeña tocando instalar una válvula de mayor caudal al que se tiene cuando sale por el adaptador de media acondicionado al tanque. El valor medio del caudal que sale a través de la válvula se lo hace relación con el caudal real obteniendo la eficiencia que tenemos a diferentes porcentajes de apertura del vástago

En cuanto a análisis de sensor como se trata de un modelo manual procedemos tomar solamente el caudal máximo (6.1,l/s) y el caudal mínimo (0 l/s) que este sensor mide obteniendo un rango de medición de 6.1 con lo que respecta a caudales.

Se tiene valores de respuesta lentos debido al valor que presenta τ que es de 105,18 s lo que nos quiere decir que la velocidad de repuesta va a ser lenta. Además encontramos el valor de H_1 en función del flujo de entrada que tiene un valor de 35 cm y al realizar la transformada inversa de La-Place se tiene un valor de $H(t)=0,045$ con una ganancia del sistema de 0,07633 s/cm²

Todo este proyecto fue financiado con recursos propios desde el inicio hasta la culminación total del proyecto, no se tuvo gastos mayores ya que algunas partes fueron acopladas y

ensambladas por el autor del proyecto tales como la válvula de control ya que su costo es elevado, pero se tiene la misma funcionalidad y eficiencia que se tendría al tomar datos de una planta industrial por lo que el objetivo que se pretendía con el trabajo se cumple satisfactoriamente.

CAPITULO IV

4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.- CONCLUSIONES

Durante la toma de datos y los cálculos realizados se llega a las siguientes

Conclusiones:

- El tanque está constituido en acrílico de 5 mm de espesor para resistir 0,57 psi de presión la misma que es la máxima que se puede tener.
- La bomba utilizada es una bomba de tipo centrífuga con una altura de descarga de 35 cm y 1,5 HP de potencia la misma que por lo general es utilizada para cisternas, además las conexiones del equipo son de PVC la misma que resiste temperaturas de 60°C el cual es ideal ya que a nivel de laboratorio se trabaja con temperatura no mayores a 35°C.
- Luego de relacionar los caudales obtenidos por dos métodos se tiene una eficiencia de 90,1% determinando que la funcionalidad del equipo si es satisfactoria.
- El sensor mide el caudal máximo (6.1l/s) y el caudal mínimo (0 l/s) obteniendo un rango de medición de 6.1 siendo un valor bajo el cual va a ser nuestro intervalo de operación.
- La eficiencia que se tiene al utilizar una válvula de bola para el tiempo de vaciado es de 78 % porque mientras la altura disminuye vamos a tener que la presión de empuje también disminuye obteniendo valores menores a 1 PSI.

- El valor de la constante de la válvula obtenido para este diseño es de 0.863 L/s que se obtiene para una altura máxima de 35 cm de altura.
- Para $H1(s)$ en función del flujo de entrada con valor de 17,25 cm se tiene una ganancia del sistema de 0,07633s/cm².
- Luego de realizar la transformada de La-Place se tiene para $H1(t)$ un valor de 0,045 a las mismas condiciones de operación.
- La velocidad de respuesta a los cambios es de 1,75 min la cual es un poco lenta la misma que puede ser provocada por falta de calibración del sensor y por la altura que debe recorrer para dar la señal de encendido o apagado del elemento final de control como la bomba y el sensor de flujo de agua

4.2. RECOMENDACIONES

- Ya que el modulo diseñado tiene fines didácticos se recomienda añadir equipos de medición de otras variables, como por ejemplo de caudal, para así implementar las aplicaciones de control de dichas variables.
- Adicionalmente se recomienda que en el futuro los estudiantes utilicen este módulo didáctico como base para el estudio, investigación e implementación de estructuras de control más avanzadas y modernas.
- Se recomienda encender la bomba y succionar agua cada cierto tiempo ya que internamente está constituida de partes metálicas las mismas que pueden oxidarse y dañarse si no se le da uso esto debido a que el agua que se utiliza en los laboratorios es dura y presenta gran cantidad de sales como carbonatos.
- Se debe tener cuidado al transportar el equipo de un lugar a otro ya que puede romperse el acrílico utilizado para los tanques y puede tener el mismo efecto que el vidrio provocando lesiones en la epidermis.
- Para tener una mejor confiabilidad de datos se recomienda tomar varias veces ya que tendremos un rango de error mucho menor.
- Se recomienda la implementación de software para poder tener un control más automatizado y poder asignar set points que permitan el mejor desenvolvimiento del equipo.

4.3 BIBLIOGRAFIA

4.3.1 BIBLIOGRAFÍA GENERAL

4.3.1.1. EUGENE A. "Manual de Ingeniero Mecánico", Tomo 1 y 2. 9na ed., México, Mc Graw Hill. 1996

4.3.1.2. MOTT, ROBERT. "Mecánica de los Fluidos". 4ta ed. México, Prentice Hall. 1996.

4.3.1.3. VARGAS, Juan Carlos. "Manual de Mecánica para no Mecánicos", Colombia, Intermedios Editores. 1999.

4.3.2 BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA

4.3.2.1 AVALLONE, Eugene A. "Manual de Ingeniero Mecánico". 9na ed. México, Tomo 1 y 2. Mc Graw Hill. 1996. Pp. 85-110

4.3.2.2 BOLINAGA, Juan. "Mecánica elemental de los fluidos". Caracas, "Universidad Católica Andrés". Fundación Polar. 1992. Pp. 15-45

4.3.2.3 ENCICLOPEDIA SALVAT, Ciencia y Tecnología, Barcelona, Tomo 12 y 14, Salbat Editores, S.A. 1964.Pp. 20

4.3.2.4. MOTT, ROBERT. "Mecánica de los Fluidos". 4ta ed. México, Prentice Hall. 1996. Pp. 60-72.

4.3.2.5 VARGAS, Juan Carlos. "Manual de Mecánica para no Mecánicos". Colombia, Intermedios Editores. 1999. Pp. 20- 25, 32-41.

4.3.2.6 CREUSS, A. Instrumentación Industrial., 7a ed., Cataluña- España., Editorial Marcombo. 2005. Pp.193-225, 361-413

4.3.2.7 DORF, R. Sistemas Modernos de Control Teoría y Práctica., 4a ed. Addison-Wesley Iberoamericana. 1989., Pp. 33-201.

4.3.2.8 GOODWIN, G., y otros., Control DesignSystems., 2a ed., Madrid- España. Prentice Hall. 2001. Pág. 22-107.

4.3.2.9 MAZZONE, V., Controladores PID., Artículo Técnico., Buenos Aires Argentina. Universidad Nacional de Quilmes. Departamento de Automatización y Control Industrial., 2002. Pp. 3-15,

4.3.2.10 OGATA, K., Ingeniería De Control Moderna., 4a ed., Madrid-España. 2003., Pp. 7-8, 212-213

4.3.2.11 SMITH, C. y otros. Control Automático de Procesos Teoría y Práctica., México D.F-México, Editorial Limusa.1991.Pp.27-116

4.3.3 BIBLIOGRAFÍA INTERNET

4.3.3.1 MEDICIÓN DE CAUDAL,

<http://es.wikipedia.org/wiki/Caudal>, 2014-02-18

4.3.3.2 CONTROL DE PROCESOS

<http://ingelectroquimica.blogspot.com/2011/01/control-de-procesos.html>, 2014-05-18

4.3.3.3 CONTROL DE PROCESOS

http://www.cib.espol.edu.ec/digipath/d_tesis_pdf/d-37866.pdf, 2014-05-18

4.3.3.4. VÁLVULAS: INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

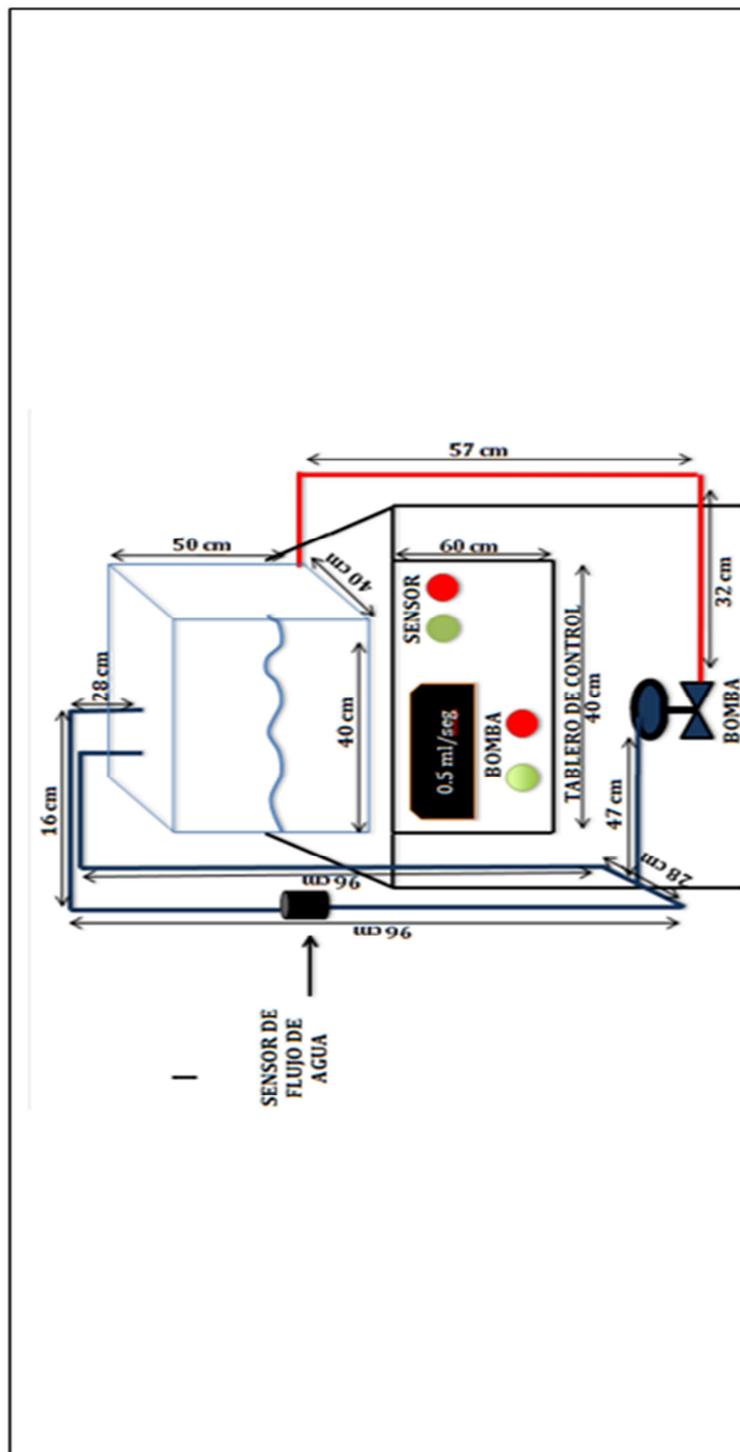
<http://www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml>, 2014- 04- 20

4.3.3.5. CAUDAL DE LÍQUIDOS,

<http://es.wikipedia.org/wiki/Caudal>, 2014- 03 -10

ANEXO I

PLANOS DEL EQUIPO CONTROL DE CAUDAL DE LIQUIDOS



| | | | | |
|--|--|--|---|-----------------------------|
| <p>PALNOS DE DISEÑO DEL EQUIPO PARA CONTROL DE CAUDAL DE LIQUIDO</p> | <p>CALIFICADO POR CALIFICAR RECHAZADO POR RECHAZAR</p> | <p>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA CRISTIAN GEOVANNY CHÁVEZ GARCÍA</p> | <p>DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA CONTROL DE CAUDAL DE LIQUIDOS</p> | |
| | | | <p>ESCALA</p> | <p>FECHA 19-09-2014</p> |
| | | | <p>LAMINA</p> | <p>1</p> |

ANEXO II

EQUIPO TERMINADO PARA EL CONTROL DE CAUDAL DE LIQUIDOS



| | | | | | |
|--|---|---|--|---------------------------|-----------------|
| <p>PLANO DE DISEÑO DEL EQUIPO PARA CONTROL DE CAUDAL DE LIQUIDO</p> | <p>CALIFICADO POR CALIFICAR RECHAZADO POR RECHAZAR</p> | <p>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA CRISTIAN GEOVANNY CHÁVEZ GARCÍA</p> | <p>DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA CONTROL DE CAUDAL DE LIQUIDOS</p> | | |
| <p>ESCALA</p> | <p>FECHA</p> | <p>LAMINA</p> | | <p>19 -09-2014</p> | <p>1</p> |

MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA CONTROL DE CAUDAL DE LIQUIDOS

OBJETIVO: Diseñar y Construir un equipo para medición de caudal

CARACTERISTICAS:

El equipo sirve para controlar el caudal de un líquido, el mismo consta de los siguientes elementos:

- ✓ Estructura metálica de acero.
- ✓ Un tanque en acrílico de 3mm de espesor y un área transversal de 40cm x 40cm
- ✓ Una bomba con una potencia de 1.5HP ya que la altura de succión no es elevada.
- ✓ Sensor de flujo de agua con un voltaje de operación: 5V-24V y una Corriente máxima: 15mA (DC 5V).
- ✓ Cuenta con un PLC que nos permite controlar al sensor de medición de líquidos.
- ✓ Tubería en PVC debido a las presiones con las cuales vamos a trabajar además por la fácil trabajabilidad con este tipo de material.
- ✓ Un variador para poder controlar la velocidad del motor de la bomba y nos va a ayudar con el funcionamiento básico y sencillo de entender en una manera didáctica.

MODO DE FUNCIONAMIENTO:

- ✓ Se tiene un tanque de almacenamiento el cual se debe llenar de agua.
- ✓ Se conecta el enchufe a un alimentador de energía de acuerdo al voltaje que se necesite en este caso 220 voltios.
- ✓ En el panel de control tenemos:

MANUAL DE USUARIO VARIADOR DE FLUJO

Antes de iniciar asegúrese que el parámetro P00.001 del variador este en cero, siguiendo los siguientes pasos:

| PASO | DESCRIPCION | TECLA | PARAMETRO EN PANTALLA |
|------|---|--|-----------------------|
| 1 | Encienda el interruptor K1 del tablero | | |
| 2 | En pantalla empezara a titilar el numero 60 | | |
| 3 | Presione la tecla |  | P00 |
| 4 | Si aparece un código distinto a P00 aplaste las teclas arriba o abajo hasta que aparezca dicho parámetro. |   | |
| 5 | Presione la tecla |  | P00.00 |
| 6 | Presione las teclas arriba o abajo hasta conseguir situarse en el parámetro P00.01. |   | P00.01 |
| 7 | Presione tecla |  | |

| | | | |
|---|--|--|-------|
| 8 | Si el número que aparece es distinto de cero utilice las flechas arriba o abajo para llevar el número a cero |   | 0 |
| 9 | Presione la tecla Prog-esc hasta que la pantalla quede titilando con el número 60.00 |  | 60.00 |

Luego de haberse cerciorado que el parámetro P00.01 es cero siga los siguientes pasos para encender el equipo:

| PASO | DESCRIPCION | TECLA | PARAMETRO EN PANTALLA |
|------|---|--|-----------------------|
| 1 | Para encender la bomba presione la tecla Run. La pantalla dejara de titilar |  | 60.00 |
| 2 | Para cambiar la velocidad de la bomba tenga presionado la tecla hacia arriba, para acelerar, o hacia abajo para frenar, esto afectara obviamente al caudal de la tubería. |   | |
| 3 | Si desea parar la bomba presione la tecla STOP |  | |

CONCLUSIONES:

Se pretende obtener datos del equipo y del sensor que representen una eficiencia del 90% min de funcionalidad del equipo para un rango de operación de 6.1 que es la diferencia entre el límite superior e inferior de medición.

RECOMENDACIONES:

Ya que es un equipo que tiene fines educativos se recomienda rediseñar para la instalación de nuevos equipos de medición de nivel para ver la velocidad de respuesta de cada uno y determinar cuál es el más eficiente, además se recomienda el encendido y funcionamiento del equipo para evitar la oxidación de las partes metálicas ocasionadas por las sales y carbonatos presentes en el agua de Riobamba y su posterior secado después de cada practica realizada.