

**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**“DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE  
DATOS DEL CANAL PRINCIPAL DEL LABORATORIO DE  
HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CUENCA”**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**DIRECTOR:**                    **Ing. Danny Ochoa Correa**

**AUTORES:**                    **Luis Fernando Bravo**  
   **David Guamán Aguilar**

**CUENCA - ECUADOR**

**2012**

CERTIFICO QUE EL PRESENTE TRABAJO DE TESIS  
HA SIDO DESARROLLADO POR LOS SRS.

Luis Bravo Andrade  
David Guamán Aguilar

---

Ing. Danny Ochoa Correa.  
DIRECTOR DE TESIS

TODO LO EXPUESTO EN LA PRESENTE TESIS ES  
DE RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES.

---

Luis Bravo Andrade.

---

David Guamán Aguilar.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, a nuestros padres, familia y amigos por estar presentes directa o indirectamente en cada momento de nuestras vidas dándonos su apoyo incondicional.

A la Universidad de Cuenca, de manera especial al Ingeniero Danny Ochoa por brindarnos su apoyo constante y colaboración en la realización del presente trabajo.

**DEDICATORIA:**

A mi madre por su abnegada preocupación, a quien debo la  
culminación de mi carrera universitaria.

A mi hermana Adriana por su apoyo.

Luis.

## **DEDICATORIA:**

A mis padres por creer siempre en mí y darme el apoyo para seguir luchando cada día de mi vida, a mis hermanos Andrés y Paúl por estar siempre presentes en cada momento, a mi familia y amigos.

David.



---

---

## Resumen

En la presente tesis se han analizado los diferentes sistemas de control y accesorios para la adquisición de datos presentes en el mercado y que son empleados ampliamente en procesos industriales, así como de experimentación e investigación.

Al ser este diseño de control aplicado a la Hidráulica de canales, también se incluye una guía básica de los diferentes conceptos empleados en esta rama para de esta manera entender los procesos que se realizan en el canal.

Existe un estudio de las variables con las que se trabajan en el canal (nivel y caudal), y se explica la importancia de los criterios para la selección de un sensor y así evitar problemas que se puedan presentar y que influyan en el normal funcionamiento del sistema.

También se hace un análisis de los diferentes sistemas de control y adquisición de datos que existen en el mercado para aprovechar el avance tecnológico en sistemas HMI (Interfaz Hombre-Máquina), así también se analizan los sistemas de control de motores, variadores de frecuencia y sistemas de protección para motores.

La presente tesis es un estudio que pretende convertir al canal en una herramienta ágil, y fácil de utilizar para estudiantes e investigadores, ya que con este sistema se obtendría una mayor confiabilidad de los resultados debido al grado de precisión de los equipos y sensores empleados; además puede ser



un punto de partida para cualquier estudiante que desee complementar el presente trabajo con la fase de implementación.

## Índice de contenido

RESUMEN .....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	8
ÍNDICE DE FIGURAS .....	11
<b>CAPITULO 1.....</b>	<b>14</b>
1.1 ANTECEDENTES:.....	14
1.2 ALCANCE: .....	16
1.3 JUSTIFICACIÓN: .....	16
1.4 OBJETIVOS:.....	17
1.4.1 <i>Objetivo general:</i> .....	17
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	18
1.5 METODOLOGÍA DE EJECUCIÓN:.....	19
1.6 DESCRIPCIÓN DEL CANAL.....	22
1.7 INSTRUMENTOS DISPONIBLES PARA LAS PRÁCTICAS .....	26
1.7.1 <i>Datos técnicos del canal:</i> .....	26
<b>CAPITULO 2.....</b>	<b>27</b>
2.1 INTRODUCCIÓN: .....	28
2.1.1 <i>Flujo en canales abiertos. (Ven Te Chow, 1994)</i> .....	28
2.2 CANALES ABIERTOS EN LABORATORIO. ....	30
2.3 ENERGÍA ESPECÍFICA (E).(VENNARD, N.D.) .....	31
2.4 RESALTO O SALTO HIDRÁULICO.(FREDERICK S. MERRIT, M. KENT LOFTIN, 1999),(VEN TE CHOW, 1994) .....	35



2.5	VERTEDEROS .....	37
2.5.1	<i>Tipos de vertedero.....</i>	37
2.5.2	<i>Vertederos de cresta ancha.....</i>	39
2.5.3	<i>Vertedero Creager (Silva, n.d.).....</i>	40
2.5.4	<i>Compuertas.....</i>	41
2.5.5	<i>Compuerta de admisión inferior.....</i>	42
2.6	FLUJO GRADUALMENTE VARIADO .....	44
2.7	COEFICIENTE DE RUGOSIDAD EN CANALES (VEN TE CHOW, 1994) .....	46
<b>CAPITULO 3.....</b>		<b>48</b>
3.1	MEDIDAS DE CAUDAL .....	48
3.1.1	<i>Medidores de área variable .....</i>	49
3.1.2	<i>Medidores de desplazamiento positivo .....</i>	50
3.1.3	<i>Medidores máscos.....</i>	51
3.1.4	<i>Medidores por presión diferencial.....</i>	53
3.1.5	<i>Medidores electromagnéticos.....</i>	54
3.2	FACTORES DE SELECCIÓN DEL MEDIDOR DE FLUJO.....	55
3.3	MEDIDAS DE NIVEL .....	56
3.3.1	<i>Medidor por desplazamiento (flotador) .....</i>	57
3.3.2	<i>Medidor por presión diferencial.....</i>	58
3.3.3	<i>Medidor por Burbujeo .....</i>	59
3.3.4	<i>Medidor Radiactivo .....</i>	60
3.3.5	<i>Medidor Capacitivo .....</i>	61
3.3.6	<i>Medidor por Ultrasonidos.....</i>	62
3.3.7	<i>Medidor conductivímetro.....</i>	63
3.3.8	<i>Medidor servoposicionador.....</i>	65
<b>CAPITULO 4.....</b>		<b>66</b>
4.1	REQUISITOS MÍNIMOS PARA EL DISEÑO DEL TABLERO. ....	66



---

---

4.2	INTERFAZ HOMBRE - MÁQUINA (HMI).....	68
4.3	PLC .....	75
4.4	PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN PROFINET.....	77
<b>CAPITULO 5.....</b>		<b>80</b>
5.1	CONTROL DE MOTORES:.....	80
5.1.1	<i>Definición del control.</i> .....	80
5.1.2	<i>Requisitos para los mandos o controles.</i> .....	80
5.1.3	<i>Partes del control de un motor.</i> .....	80
5.1.4	<i>Tipos de control.</i> .....	84
5.1.5	<i>CONTROL DE MOTORES SÍNCRONOS.</i> .....	88
5.1.6	<i>REGULACIÓN DE VELOCIDAD DE MOTORES DE INDUCCIÓN.</i> 90	
5.2	PROTECCIONES .....	98
5.2.1	<i>Relés térmicos y diferenciales.</i> .....	98
5.2.2	<i>Relés electromagnéticos:</i> .....	114
5.2.3	<i>Relés estáticos de protección.</i> .....	117
5.3	VARIADOR DE FRECUENCIA SINAMICS G120 .....	128
<b>CAPITULO 6.....</b>		<b>129</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>131</b>



---

---

## Índice de figuras

Fig. 1.1 Ubicación del Laboratorio de Hidráulica .....	15
Fig. 1.2 Plan de trabajo .....	20
Fig. 1.3 Canal Principal .....	23
Fig. 1.4 Dimensiones del Canal.....	23
Fig. 1.5 Motobomba.....	24
Fig. 1.6 Esquema de regulación y medición de caudal. ....	25
Fig. 1.7 Motor generador de olas. ....	26
Fig. 2.1 Comparación entre flujo en tuberías y flujo en canales abiertos. Tomado de (Ven Te Chow, 1994) .....	28
Fig. 2.2 Energía Específica. Tomado de (Streeter, 1988) .....	32
Fig. 2.3 Línea de Energía. Tomado de (Vennard, n.d.) .....	32
Fig. 2.4 Tomado de (Vennard, n.d.) .....	34
Fig. 2.5 Resalto Hidráulico. Tomado de (Ven Te Chow, 1994) .....	36



Fig. 2.6 Resalto Hidráulico. Tomado de (Frederick S. Merrit, M. Kent Loftin, 1999) .....	38
Fig. 2.7 Vertedero de Pared Gruesa. Tomado de (Frederick S. Merrit, M. Kent Loftin, 1999) .....	38
Fig. 2.8 Vertedero de Cresta Ancha. Tomado de (Frederick S. Merrit, M. Kent Loftin, 1999) .....	39
Fig. 2.9 Vertedero Creager. Tomado de (“Embalses.net,” n.d.) .....	40
Fig. 2.10 Vertedero de Cimacio. Tomado de (Frederick S. Merrit, M. Kent Loftin, 1999) .....	40
Fig. 2.11 Flujo a través de Compuertas. Tomado de (“Flujo a través de compuertas,” n.d.) .....	42
Fig. 12 Compuertas de admisión inferior. Tomado de (G., 2009).....	43
Fig. 2.13 Compuerta de Admisión Inferior. Tomado de (G., 2009).....	44
Fig. 2.14 Vertedero de Canal lateral. Tomado de (Ven Te Chow, 1994).....	45
Fig. 3.1 Rotámetro.....	49
Fig. 3.2 Contador de ruedas ovaes .....	51
Fig. 3.3 Medidor másico de momento angular. ....	52
Fig. 3.4 Placas de orificio concéntrico con aristas vivas.....	53
Fig. 3.5 Esquema de Caudalímetro electromagnético .....	54
Fig. 3.6 Medición de nivel por flotador.....	57
Fig. 3.7 Medición de nivel por presión diferencial en un taque cerrado.....	58
Fig. 3.8 Medidor de nivel por burbujeo .....	59
Fig. 3.9 Medidor de nivel radioactivo.....	60
Fig. 3.10 Medidor de nivel capacitivo. ....	62
Fig. 3.11 Medición por ultrasonido. ....	63
Fig. 3.12 Medidores tipo conductivímetro.....	64
Fig. 3.13 Medición de nivel mediante sevoposicionador. ....	65
Fig. 4.1 Totally Integrated Automation.....	68



---

---

Fig. 4.2 Pantalla de inicio. ....	69
Fig. 4.3 Pantalla de medidor de flujo. ....	70
Fig. 4.4 Pantalla de los Sensores de Ultrasonicos. ....	71
Fig. 4.5 Pantalla del generador de olas. ....	72
Fig. 4.6 Pantalla de medidor de variables ....	73
Fig. 4.7 Pantalla del caudalimetro. ....	74
Fig. 4.8 Pantalla de variador de frecuencia. ....	74
Fig. 4.9 S7-1200 con accesorios ....	76
Fig. 4.10 Diagrama de control del plc.....	76
Fig. 4.11 Diagrama de control de la bomba.....	77
Fig. 4.12 Comunicación entre el PLC y el HMI.....	78
Fig. 5.1 Tipos de gobierno de los semiconductores controlados.....	86
Fig. 5.2 Diagrama de bloques de un circuito que utiliza tiristores o triacs. ....	86
Fig. 5.3 Control de un motor monofásico mediante dos tiristores en antiparalelo .....	88
Fig. 5.4 Método de polos consecuentes.....	94
Fig. 5.5 Motores de inducción de velocidad múltiple de dos devanados.....	95
Fig. 5.6 Torque constante.....	96
Fig. 5.7 Potencia constante.....	97
Fig. 5.8 Par variable .....	98
Fig. 5.9 Relé térmico bimetálico. ....	102
Fig. 5.10 Tipos de calentamiento de bimetalo.....	102
Fig. 5.11 Relé bimetálico europeo.....	103
Fig. 5.12 Curvas características del relé térmico bimetálico.....	104
Fig. 5.13 Relé de sobrecarga térmico de aleación fusible.....	104
Fig. 5.14 Relé de sobrecarga térmico bimetálico tipo disco. ....	106
Fig. 5.15 Relé inductivo térmico de aleación fusible.....	107
Fig. 5.16 Disco bimetálico termostático.....	108

---

---



---

---

Fig. 5.17 Shunt inductivo de saturación.....	109
Fig. 5.18 Transformador de corriente de saturación.....	110
Fig. 5.19 Conexión de un relé diferencial. ....	110
Fig. 5.20 Conexión de un relé diferencial .....	111
Fig. 5.21 Falla externa.....	112
Fig. 5.22 Falla interna.....	113
Fig. 5.23 Sistema con diversas conexiones .....	113
Fig. 5.24 Relé de sobrecarga magnético de disparo instantáneo.....	115
Fig. 5.25 Relé de sobrecarga magnético de acción retardada. ....	115
Fig. 5.26 Curvas de tiempos de disparo en función de la corriente .....	117
Fig. 5.27 Esquema funcional del principio de un relé electrónico de protección .....	119
Fig. 5.28 Elemento de conversión de un relé electrónico de una magnitud. ..	120
Fig. 5.29 Filtros para la alimentación de tensión. ....	121
Fig. 5.30 Montajes separadores .....	122
Fig. 5.31 (a) Características de la tensión de Schmitt y (b) Convertidor de señal analógica en señal (entrada) binaria “Bascula de Schmitt” .....	123

## Capítulo 1.

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Antecedentes:

La Universidad de Cuenca, para la formación de profesionales técnicos en miras al desarrollo de la región, crea en 1939 la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas con la Escuela de Ingeniería Civil. En el año de 1978 se adquiere por parte de la Universidad los equipos para el Laboratorio de Hidráulica, entre los que se encuentran: equipos para hidráulica de canales (un canal principal y un canal pequeño), un equipo para determinación de pérdidas por frotamiento en cañerías y accesorios, un túnel de viento, máquinas hidráulicas (Turbinas hidráulicas Pelton y Francis), los mismos que emplean diferentes motores y tableros de control acordes a la tecnología de la época.



**Fig. 1.1 Ubicación del Laboratorio de Hidráulica**

El Laboratorio de Hidráulica, permite a los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Civil simular los fenómenos y poner en práctica los conocimientos adquiridos en las Aulas, para de esta forma reafirmar los conceptos aprendidos



---

en las áreas de Hidráulica Básica, hidráulica de canales, hidráulica de máquinas y obras hidráulicas.

En todos estos años la Universidad de Cuenca ha venido siendo referente de la educación superior debido a su planta docente y adecuadas instalaciones que han permitido a los alumnos e investigadores, con los equipos allí existentes realizar diferentes estudios e investigaciones como el “Proyecto de control de inundaciones Bulubulu-Cañar-Naranjal” en el cual se realizó el diseño de la derivadora Cañar, el Azud y el cuenco amortiguador.

### **1.2 Alcance:**

El presente proyecto de tesis que se realizara en el Laboratorio de Hidráulica pretende analizar el equipo existente para el control del Canal principal, estudiar las diferentes prácticas que en él se realizan, hallar las necesidades presentes, identificar los problemas y las mejores soluciones para los mismos, para de esta manera realizar el diseño del sistema de control y adquisición de datos mas apropiado, el mismo que servirá de referencia para una posterior implementación por parte de la Universidad.

### **1.3 Justificación:**

Los equipos existentes en el Laboratorio de Hidráulica se han desempeñado de una manera óptima en su mayoría por más de 30 años, pero debido al número de años y al cada vez creciente número de estudiantes, que representan un aumento en el número de prácticas por ende un mayor desgaste de los



equipos, ha causado que algunos elementos estén obsoletos y simplemente no se los utilice, lo que representa una pérdida significativa en lo que se refiere al aprendizaje de las y los estudiantes, ya que algunas prácticas se las realiza a medias o sencillamente no se las realiza.

Debido a que los mecanismos de control han venido actualizándose vertiginosamente en los últimos años con el avance de la microelectrónica en lo referente a mecanismos de control, como son sistemas de supervisión y adquisición de datos (SCADA), controladores Lógicos Programables PLC, sistemas de interfaz hombre-máquina (HMI) los mismos que facilitan de sobremanera la calidad y precisión del control realizado así como una mayor confiabilidad de los resultados obtenidos y su vez permite una mayor gama de posibilidades a un costo cada vez menor.

El canal principal del laboratorio de hidráulica es un equipo fundamental, ya que en él se realizan prácticas de vertederos (regular, controlar y medir caudal) que consiste en las prácticas de un ciclo completo, por esta razón se ve la necesidad de iniciar el estudio de modernización de los equipos de control del laboratorio con el Canal principal para tener una referencia de los dispositivos que son necesarios en el mismo y de esta manera tener un diseño preliminar, mediante el cual la Universidad de Cuenca pueda basarse para su posterior implementación.

#### **1.4 Objetivos:**

##### **1.4.1 Objetivo general:**

El presente proyecto pretende dar una solución de ingeniería mediante el diseño del sistema de control y adquisición de datos para agilizar los procesos



---

---

experimentales realizados en el Canal Principal del laboratorio y reducir errores de medición, repotencializar el canal al incrementar el número de prácticas, emplear el canal para estudios de investigación debido a la mayor confiabilidad que se obtendría de los resultados de las practicas allí realizadas, lo que permitiría al laboratorio vincularse aun mas con la comunidad y al prestar sus servicios a empresas tanto públicas como privadas.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Analizar cada una de las prácticas que se realizan en el Canal principal del laboratorio, para de esta manera conocer los procedimientos, las variables necesarias y los diferentes equipos se emplean actualmente.
2. Estudiar cada una de las variables a controlar y los diferentes mecanismos de control que se emplearán, así mismo se realizara un análisis de los diferentes sistemas de control que se encuentran en el mercado.
3. Realizar el diseño de un sistema de control y adquisición de datos para el canal principal del Laboratorio de Hidráulica, mediante el empleo de herramientas como Win CC, Interfaz hombre máquina (sistemas HMI), empleo de sistemas de adquisición de datos de última generación (sensores), de esta manera se podrá obtener resultados mas confiables en cada una de las prácticas, permitir a los estudiantes acceder a una base de datos en la cual se pueda disponer de registros históricos y realizar diferentes gráficos de tendencias, curvas de caudales y niveles en tiempo real, todo esto en un sistema de control con una interfaz gráfica amigable.

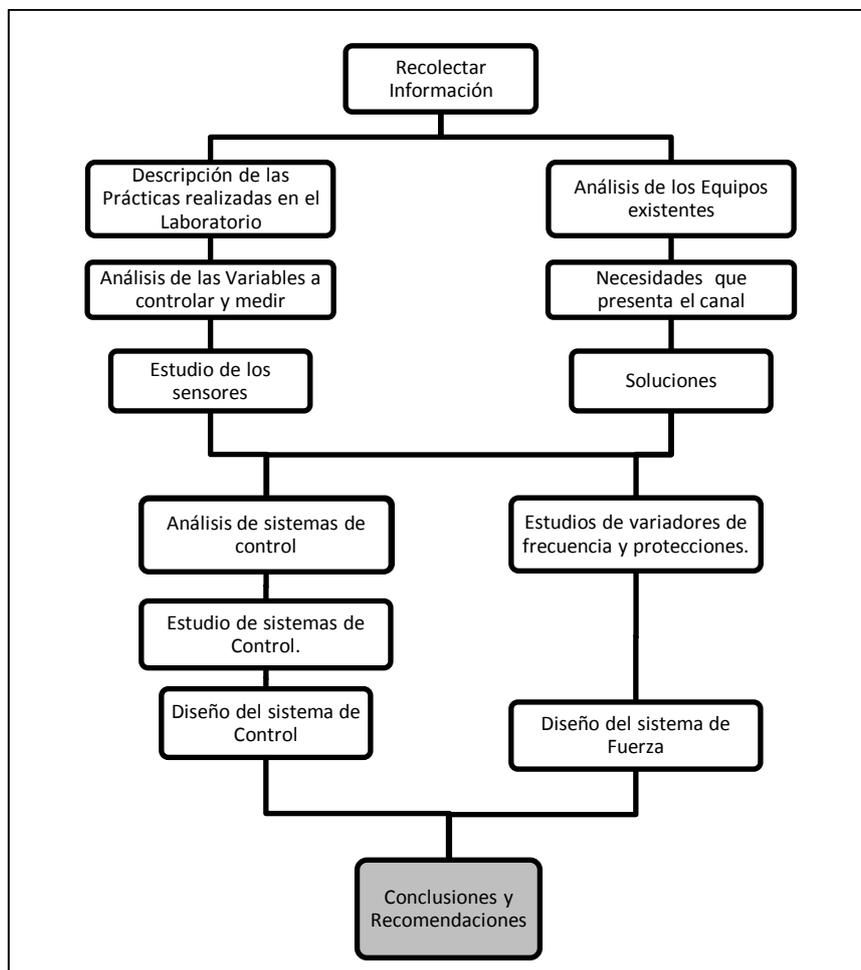


- 
4. Simular el proyecto mediante software, que nos permitan alcanzar resultados preliminares, y de esta manera obtener una visión general del proyecto.
  5. Realizar pruebas en el canal con equipo existente en el laboratorio de electrónica.
  6. Recomendar a la Universidad de Cuenca la implementación de este sistema para controlar el laboratorio, debido a las diferentes prestaciones, facilidades y posibilidades que este puede aportar para los estudiantes y profesionales de la Ingeniería Civil.

#### **1.5 Metodología de ejecución:**

Para la realización del presente proyecto se ha determinado una metodología, la cual comprende una serie de pasos que permitirán mediante el uso de bibliografía especializada, consultas en internet, análisis de sistemas de control, y diferentes mecanismos de consulta los mismos que nos permitirán la consecución del diseño y recomendaciones definitivas.

Para esto se ha visto necesario dividir nuestros objetivos de la siguiente manera:



**Fig. 1.2 Plan de trabajo**

- **Recolectar información**  
 En esta etapa se realizara visitas al laboratorio, entrevistas a los encargados del mismo y se recolectara la mayor información posible acerca de las características del canal, placas de motores, sistemas de medicion de nivel y caudal.
- **Prácticas realizadas en el Laboratorio.**



---

---

Análisis de los diferentes prácticas que se realizan en el canal, los resultados que se obtienen y los diferentes controles que en ellas intervienen.

- Análisis de los equipos

Toda la información recolectada anteriormente sera analizada y los datos mas relevantes serán tomados en cuenta para su posterior uso.

- Variables a controlar

Las variables que emplearemos seran analizadas a profundidad con los diferentes mecanismos que existen para su medicion y control.

- Observación de necesidades encontradas en el laboratorio.

Estas necesidades nacen principalmente de los encargados del Laboratorio y de las y los estudiantes, los cuales seran consultados y cuyas inquietudes y sugerencias serán de mucha ayuda al momento de iniciar la busqueda de soluciones.

- Análisis de sistemas de control

Se realizara un estudio de los diferentes sistemas de control y adquisición de datos, protocolos de comunicación y la manera mas conveniente de acoplar y/o reemplazar los mecanismos existentes.

- Estudio de variadores de frecuencia y proteccion de motores

Aquí se realizará un estudio de los diferentes variadores de frecuencia y cuál es su mecanismo de operación, así mismo se analizara distintos relés de protección, y se revisará los variadores de frecuencia presentes en el mercado.



- Diseño del esquema de control

La parte netamente ingenieril, en la cual se va a realizar el esquema de control y el acoplamiento de los diferentes sistemas que intervienen en el proceso (Sensores, PLC, HMI, Variadores de Frecuencia, etc).

- Conclusiones y recomendaciones.

Se presentara a la Universidad las diferentes soluciones que podamos haber obtenido del presente proyecto, con las respectivas recomendaciones de nuestra parte hacia los directivos de la Facultad.

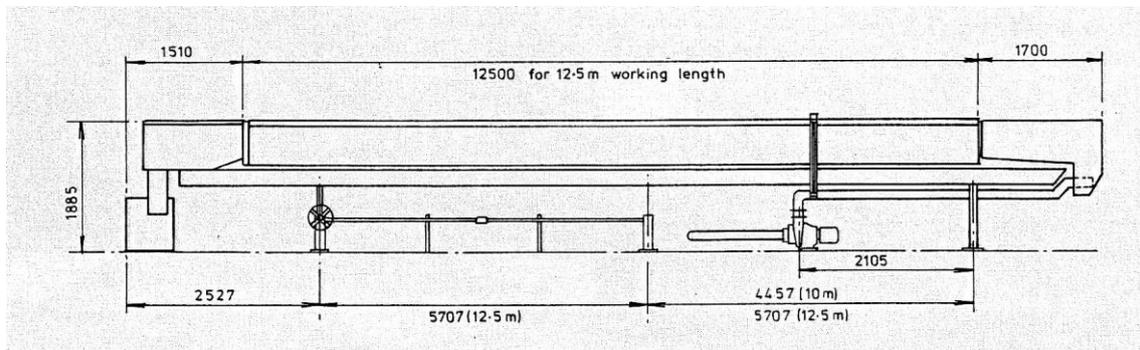
### 1.6 Descripción del canal

El canal principal, presente en el laboratorio de hidráulica, ha sido por años una fuente de estudio y observación de fenómenos hidráulicos que se presentan ante los distintos bloques de control, colocados a lo largo del trayecto del canal. De esta manera se han venido investigando, los distintos fenómenos presentes en corrientes naturales o artificiales.

**Sección de trabajo.-** El canal está construido por una sección de trabajo de 15 m. con paredes de vidrio y soportes de metal, dos soportes de aluminio con marcas representativas en milímetros. Todo esto asentado sobre una viga metálica, la que esta sobre dos soportes, uno fijo y otro con un sistema mecánico de elevación, con lo que se pueden obtener distintas pendientes y profundidades que influyen el comportamiento del canal en los diferentes proyectos de experimentación.



**Fig. 1.3 Canal Principal**



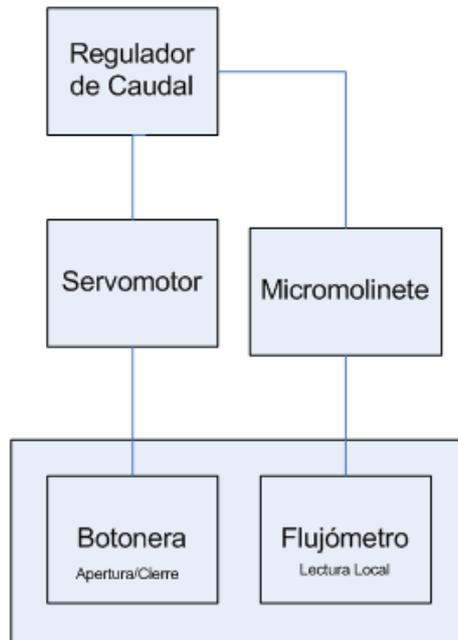
**Fig. 1.4 Dimensiones del Canal**

**Bomba.-** Está se encuentra debajo del canal y mediante un motor trifásico, permite la recirculación del flujo, por medio de un tubo de succión, desde un recipiente recolector en el que desemboca el canal.



**Fig. 1.5 Motobomba.**

**Control de caudal.-** Este se encuentra constituido por un tablero de control, servo motor y un medidor de flujo (micro molinete).



**Fig. 1.6 Esquema de regulación y medición de caudal.**

La función de este control de caudal es la de medir el valor del flujo, mediante un micromolinete, y desplegarlo en un indicador analógico, para que de manera visual, con el dato del indicador, proceder a una acción de control de forma manual en el servo motor, que a su vez controlara el nivel del flujo del agua enviada por la bomba, mediante la apertura y cierre de una válvula.

**Generador de Olas.-** Está constituido por un motor trifásico conectado a un motoreductor, el cual a su vez se encuentra conectado a una lámina de metal por medio de una barra. Esta lámina al recibir un empuje desde la barra, provoca un movimiento de vaivén en la masa líquida, generando olas. Esto permite simular condiciones marítimas.



**Fig. 1.7 Motor generador de olas.**

## **1.7 Instrumentos disponibles para las prácticas**

### **1.7.1 Datos técnicos del canal:**

- Longitud de la sección de trabajo 15m
- Ancho de la sección de trabajo 300mm
- Profundidad de la sección de trabajo 450mm
- Diámetro de la tubería de alimentación 106mm

### Características eléctricas

- Motor principal (Mp):
  - Tensión 380V 3Ø 60Hz
  - Corriente 7.5A
  - Potencia 4Hp



- Velocidad 1750 rpm
- Servo motor (Sm):
  - Tensión 220V 60Hz
  - Corriente 0.4 A
- Motor generado de olas (Mo):
  - Tensión 380V 3Ø 60Hz
  - Corriente 1.62A
  - Potencia 0.55kW
  - Velocidad 1700 rpm

## Capítulo 2.

### DESCRIPCION DE LOS PROCESOS REALIZADOS EN EL LABORATORIO

2.1 Introducción:

2.1.1 Flujo en canales abiertos. (Ven Te Chow, 1994)

El flujo de agua en un conducto puede ser flujo en canal abierto o flujo en tubería. Estas dos clases de flujo son similares en muchos aspectos, pero se diferencian en un aspecto importante. El flujo en canal abierto debe tener una superficie libre, en tanto que el flujo en tubería no la tiene, debido a que en este caso el agua debe llenar completamente el conducto. Una superficie libre está sometida a la presión atmosférica. El flujo en tubería, al estar confinado en un conducto cerrado, no está sometido a la presión atmosférica de manera directa, sino solo a la presión hidráulica.

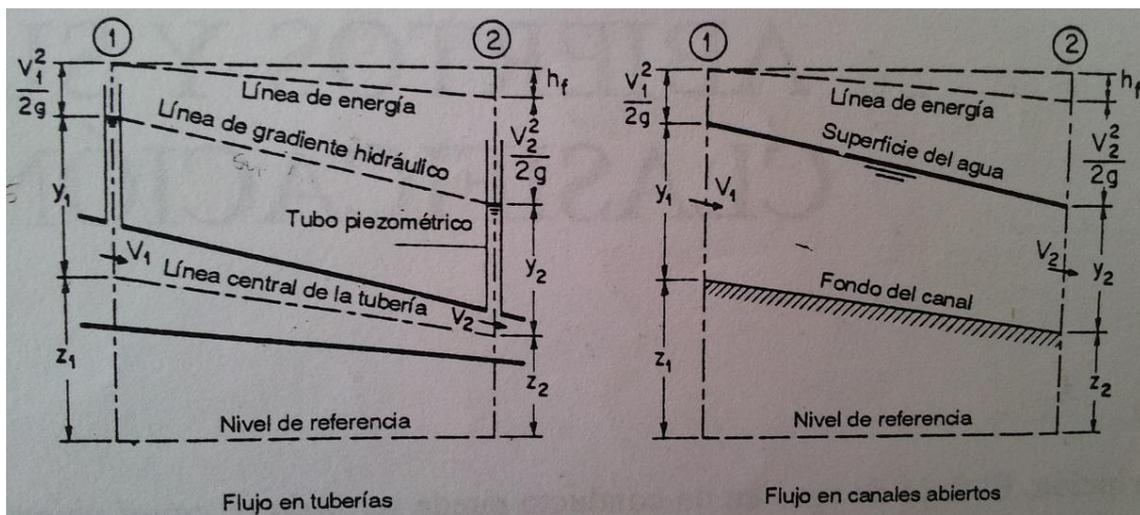


Fig. 2.1 Comparación entre flujo en tuberías y flujo en canales abiertos. Tomado de (Ven Te Chow, 1994)

Las dos clases de flujo se comparan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** A la izquierda de ésta se muestra el flujo en tubería. Dos tubos piezométricos se encuentran instalados en las secciones 1 y 2 de la tubería. Los niveles de agua en estos tubos se mantienen por acción de la presión en la tubería en elevaciones representadas por la línea conocida como



línea de gradiente hidráulico. La presión ejercida por el agua en cada sección del tubo se indica en el tubo piezométrico correspondiente, mediante la altura y de la columna de agua por encima del eje central de la tubería. La energía total del flujo en la sección con referencia a una línea base es la suma de la elevación  $z$  del eje central de la tubería, la altura piezométrica ( $y$ ) y la altura de velocidad  $V^2/2g$  donde  $V$  es la velocidad media del flujo y  $g$  es la aceleración de la gravedad. En la Figura 2.1 la energía está representada por la línea conocida como línea de gradiente de energía o, simplemente, línea de energía.

La pérdida de energía que resulta cuando el agua fluye desde la sección 1 hasta la sección 2 está representada por  $h_f$ . Un diagrama similar para el flujo en canal abierto se muestra en la parte derecha de la Figura 2.1. Con propósitos de simplificación, se supone que el flujo es paralelo y que tiene una distribución de velocidades uniforme y que la pendiente del canal es pequeña. En este caso, la superficie de agua es la línea de gradiente hidráulico, y la profundidad del agua corresponde a la altura piezométrica. Si el flujo fuera curvilíneo o la pendiente del canal fuera alta, la altura piezométrica sería, de manera apreciable, diferente de la profundidad del flujo. Como resultado, la línea de gradiente hidráulico no coincidiría exactamente con la superficie del agua.

A pesar de la similitud que existe entre estos dos tipos de flujo, es mucho más difícil resolver problemas de flujo en canales abiertos que en tuberías a presión.

Las condiciones de flujo en canales abiertos se complican por el hecho de que la posición de la superficie libre puede cambiar con el tiempo y con el espacio, y también por el hecho de que la profundidad de flujo, el caudal y las pendientes del fondo del canal y de la superficie libre son interdependientes. A menudo, es difícil obtener datos experimentales confiables en el caso de flujo



de canales abiertos. Además, las condiciones físicas de los canales abiertos varían mucho más que de las tuberías. En éstas la sección transversal de flujo es fija, debido a que está completamente definida por la geometría del conducto. La sección transversal de una tubería por lo general es circular, en tanto que la de un canal abierto puede ser de cualquier forma, desde circular hasta las formas irregulares de las corrientes naturales. En las tuberías, la superficie interior por lo general tiene rugosidades que varían desde aquellas correspondientes a tuberías nuevas de pvc, latón liso o de madera machimbrada, por un lado, hasta las tuberías de hierro o acero, viejas y corroídas, por el otro. En canales abiertos la superficie varía desde la correspondiente a metales pulidos utilizados como canaletas de prueba hasta la correspondiente a lechos rugosos e irregulares en ríos. Además, la rugosidad en un canal abierto varía con la posición de la superficie libre. Por consiguiente, la selección de los coeficientes de fricción implica una mayor incertidumbre para el caso de canales abiertos que para el de tuberías. En general, el tratamiento del flujo en canales abiertos es más empírico que el correspondiente a flujo en tuberías. El método empírico es el mejor método disponible en el presente y, si se aplica de manera cuidadosa, puede producir resultados de valor práctico.

## **2.2 Canales abiertos en laboratorio.**

Es necesario conocer algunos conceptos para entender los fenómenos que se pueden presentar al estudiar los canales abiertos, así como el uso de ciertas estructuras que son de uso común en los canales (compuertas, vertederos, etc.). Estas estructuras nos permiten controlar el flujo en el canal y adquirir información del mismo, como pueden ser lugar de emplazamiento de secciones de control, caudal, velocidad, etc.



Esta información la podemos obtener de ciertas prácticas que se realizan en laboratorio. El Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Estatal de Cuenca consta de un canal rectangular para las prácticas, por ende el somero estudio que realizaremos se centrará en este tipo de canales. Entre los conceptos y estructuras a considerar se encuentran los siguientes:

- Energía específica
- Fuerza específica
- Vertederos de cresta ancha
- Vertedero Creeger
- Compuertas sumergidas
- Compuertas de admisión inferior
- Resalto hidráulico
- Coeficiente de rugosidad en canales

### **2.3 Energía específica (E).(Vennard, n.d.)**

El uso y el concepto de “energía específica”, es decir la distancia entre el fondo del canal y la línea de energía (ver Figura 2.2), fue introducido por Bakhmenteff en 1911, resultando provechoso en la explicación de los antiguos y modernos problemas del flujo en canales abiertos.

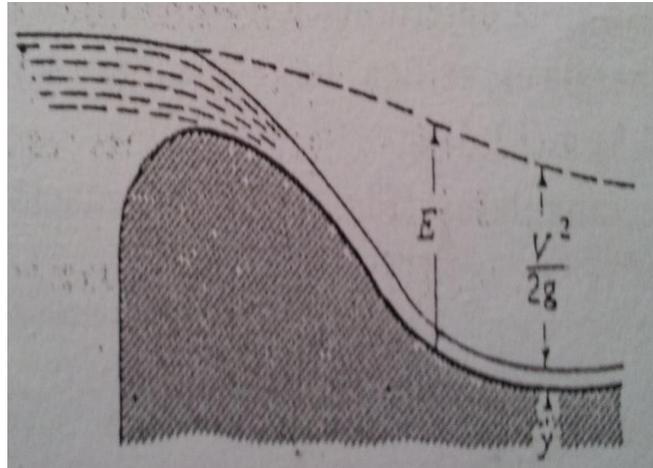


Fig. 2.2 Energía Específica. Tomado de (Streeter, 1988)

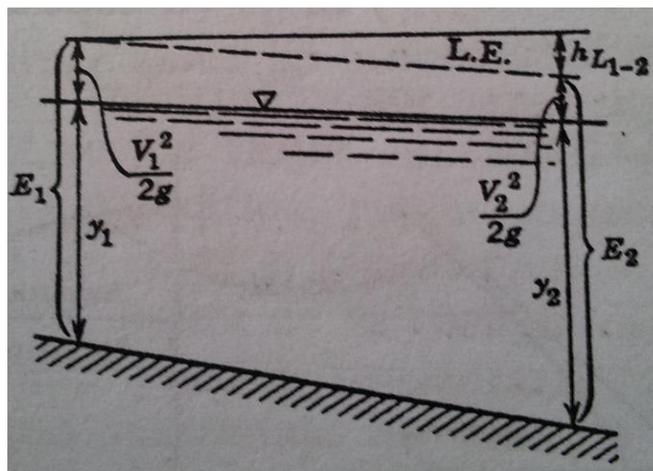


Fig. 2.3 Línea de Energía. Tomado de (Vennard, n.d.)

Considerando las posiciones relativas del fondo del canal, la superficie líquida y la línea de energía (L.E) en la extensión tipo del canal abierto que se muestra en la Figura 2.3, no es posible decir de antemano el carácter del cambio de energía específica entre las secciones 1 y 2. Aunque la línea de energía debe caer en la dirección del flujo, la energía específica puede aumentar o disminuir dependiendo del tipo de flujo que se produzca como se verá posteriormente.



Siendo la energía específica la distancia vertical entre el fondo del canal y la línea de energía:

$$E = y + \frac{V^2}{2g}$$

O, en términos de caudal (Q):

$$E = y + \frac{1}{2g} * \left(\frac{Q}{A}\right)^2$$

Tomando a q como la rapidez de variación del flujo por unidad de anchura del canal,  $Q = b * q$  y  $A = b * y$ . Así para el canal rectangular:

$$E = y + \frac{1}{2g} * \left(\frac{q}{y}\right)^2$$

Esta última ecuación da una relación clara y sencilla entre la energía específica (E), rapidez de variación del flujo (q), y nivel (y).

Cuando la profundidad del flujo se dibuja contra la energía específica para una sección dada del canal y para un caudal constante se obtiene la curva de energía específica. La práctica consiste en ir variando la pendiente del canal manteniendo en este caso el caudal, de esta forma se van obteniendo valores para E con los diversos calados obtenidos y.

Para una comprensión mejor de esta ecuación, se mantiene constante a  $E$ , y examinando la relación entre  $q$  y  $y$ , se obtiene “la curva  $q$ ”. (ver Figura 2.4)

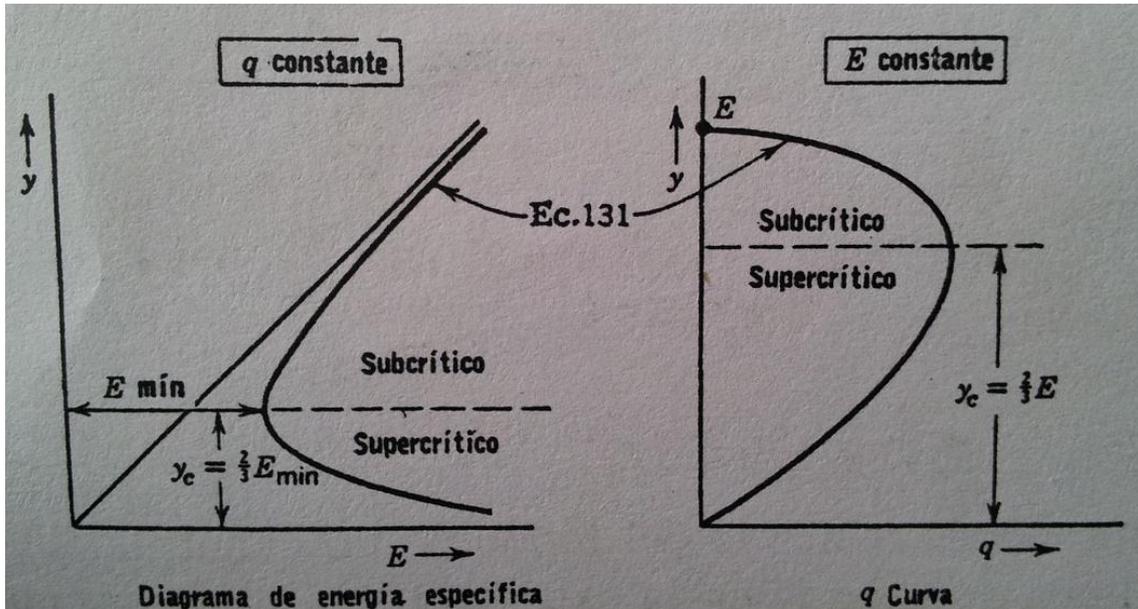


Fig. 2.4 Tomado de (Vennard, n.d.)

En vista de que estas curvas son solamente gráficas diferentes de la misma ecuación, puede esperarse que los *puntos mínimo de E y máximo de q*, sean *completamente equivalentes*. El nivel relacionado con estos puntos, se conoce como el nivel o espesor crítico,  $y_c$  y es una línea divisoria o límite entre las zonas del flujo en canal abierto que son muy diferentes desde el punto de vista físico.

Los flujos a niveles o espesores mayores que el crítico, se conocen como tranquilos o “subcríticos”; los flujos a niveles o espesores menores que el crítico se conocen como rápidos o “supercríticos”.

Un aumento en el espesor o nivel del flujo, es causa de un aumento en la energía específica en el flujo subcrítico, pero a su vez es una disminución de energía específica en el flujo supercrítico. En otras palabras, la energía



específica puede ganarse o perderse en la Figura 2.4 dependiendo de si los niveles de flujo son mayores o menores que el espesor crítico. Más aún, la forma del diagrama, muestra que para una energía específica dada, existen en general dos niveles (y por lo tanto dos situaciones diferentes de flujo) posibles, uno de flujo subcrítico, y uno de flujo supercrítico; estos dos niveles o espesores se conocen como “niveles alternos”.

Dando las relaciones de los niveles críticos esenciales para los canales rectangulares y demostrando al mismo tiempo que los puntos mínimos de E y los máximos de q, tienen las mismas propiedades, la ecuación para la comprobación del nivel o espesor crítico, puede obtenerse de:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

De donde puede verse que el espesor crítico ( $y_c$ ) puede comprobarse a partir de q solamente.

Como conclusión de lo anterior podemos decir que:

- Para cualquier valor de E existe una profundidad crítica, para la cual el caudal unitario es máximo.
- Para cualquier valor de “q” existe una profundidad crítica dada, para la cual la energía específica es mínima.
- Para cualquier condición de flujo dada, siempre que sea diferente de la crítica existe otra profundidad alterna, para la cual el mismo caudal unitario puede ser conducido con la misma energía específica.

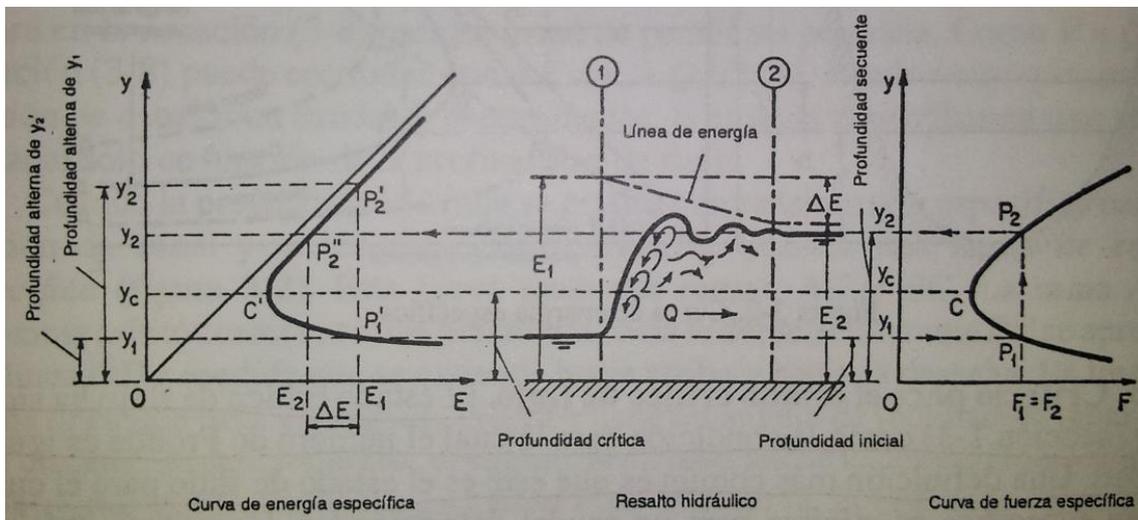
#### **2.4 Resalto o salto hidráulico.(Frederick S. Merrit, M. Kent Loftin, 1999),(Ven Te Chow, 1994)**

En los canales abiertos a menudo ocurren cambios en el estado de flujo subcrítico a supercrítico, y viceversa. Tales cambios se manifiestan con un

correspondiente cambio en la profundidad del flujo de una profundidad alta a una profundidad baja, o viceversa. Si el cambio ocurre con rapidez a lo largo de una distancia relativamente corta, el flujo es rápidamente variado y se conoce como fenómeno local. El resalto hidráulico es un tipo de fenómeno local.

El resalto hidráulico se da cuando el cambio rápido en la profundidad del flujo es desde un nivel bajo a un nivel alto, a menudo el resultado es una subida abrupta de la superficie de agua. Las dos profundidades constituyen las profundidades inicial y seciente de un resalto hidráulico. Ocurre con frecuencia en un canal por debajo de una compuerta deslizante de regulación, en la parte de aguas debajo de un vertedero o en el sitio donde un canal con alta pendiente se vuelve casi horizontal de manera súbita.

Al producirse el resalto hidráulico, el fluido pierde velocidad, y debido a esto, el salto hidráulico se emplea con frecuencia para disipar la energía cinética de un flujo abierto con el objeto de evitar la fricción sobre el revestimiento del canal.



**Fig. 2.5 Resalto Hidráulico. Tomado de (Ven Te Chow, 1994)**

La pérdida de carga en cualquier salto es igual a la diferencia en su energía específica antes y después del salto  $\Delta E$  (ver Figura 2.5.)



La forma del salto hidráulico en un canal rectangular horizontal puede ser de varios tipos, según el número de Froude ( $F$ ) del flujo entrante. Para  $F=4.5$  a  $9.0$ , el salto está en equilibrio y su rendimiento es óptimo. La disipación de energía va del 45 al 70%. Éste salto suele llamarse estacionario.

Es importante saber en donde se formará un salto hidráulico, porque la energía turbulenta liberada en un salto puede causar socavación intensa en un canal sin revestir o destruir un recubrimiento o destruir el recubrimiento en un canal con recubrimiento delgado. Deben construirse secciones reforzadas especialmente en el canal, para soportar el golpeteo y la vibración del salto y proveer suficiente bordo libre para la mayor altura en el salto.

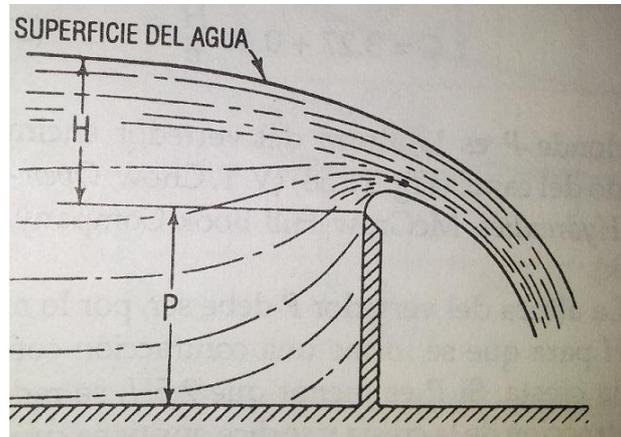
## 2.5 Vertederos

Un vertedor o vertedero es una barrera en un canal sobre la cual circula agua. El borde o superficie sobre el cual circula agua se llama cresta. La lámina de agua que se derrama se llama lámina vertiente.

Si la lámina descarga en el aire, el vertedor tiene descarga libre. Si la descarga ocurre parcialmente debajo del agua, el vertedor está sumergido o ahogado.

### 2.5.1 Tipos de vertedero

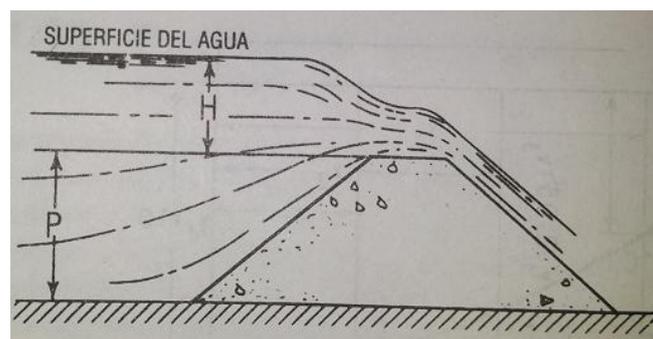
Un vertedor con un borde delgado aguas arriba, con lo cual el agua salta libre de la cresta, es un vertedor de pared delgada.(ver Figura 2.6)



**Fig. 2.6 Resalto Hidráulico. Tomado de (Frederick S. Merrit, M. Kent Loftin, 1999)**

Todos los demás vertedores se clasifican como vertedores de pared gruesa. (Ver Figura 2.7).

Los vertedores de pared delgada se clasifican de acuerdo con la forma de la abertura del vertedor, como vertedores rectangulares, vertedores triangulares o en V, vertedores trapezoidales y vertedores parabólicos. Los vertedores de pared gruesa se clasifican, de acuerdo con la forma de su sección transversal, como vertedores de cresta ancha, vertedores triangulares, etc.

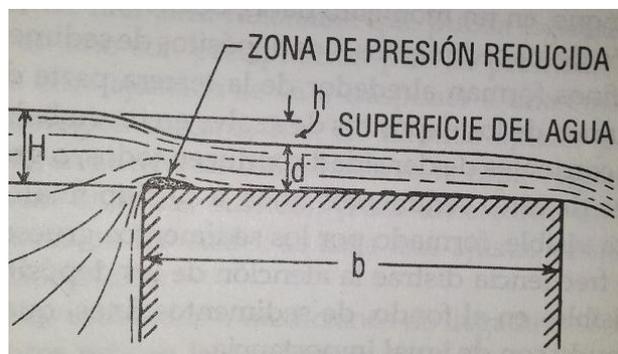


**Fig. 2.7 Vertedero de Pared Gruesa. Tomado de (Frederick S. Merrit, M. Kent Loftin, 1999)**

El canal que conduce agua hasta un vertedor es el canal de llegada, La velocidad media de este canal es la velocidad de llegada o de entrada. El tirante del agua que produce el gasto es la carga. Los vertedores de pared delgada son útiles para medir o aforar el flujo del agua. Por contraste, los vertedores de pared gruesa se incorporan en estructuras hidráulicas como dispositivos de control de regulación y el aforo es su función secundaria.

### 2.5.2 Vertederos de cresta ancha.

Es un vertedor con una cresta horizontal o casi horizontal. La cresta debe tener suficiente longitud en el sentido del flujo, de modo que la lámina esté soportada y desarrolle presión hidrostática contra la cresta, cuando menos en una distancia corta. Un vertedor de cresta ancha es de sección transversal casi rectangular. Salvo indicación en contrario, se supondrá que tiene caras verticales, cresta horizontal plana y bordes agudos en ángulos rectos.



**Fig. 2.8 Vertedero de Cresta Ancha. Tomado de (Frederick S. Merrit, M. Kent Loftin, 1999)**

En la Figura 2.8 se muestra un vertedero de cresta ancha que debido a su borde agudo de aguas arriba, tiene contracción de la lámina. Esto ocasiona una zona de presión reducida en el borde de entrada. Cuando la carga  $H$  en un vertedor de cresta ancha llega a ser entre una a dos veces su espesor  $b$ , la lámina salta libremente y el vertedor actúa como vertedor de cresta aguda.

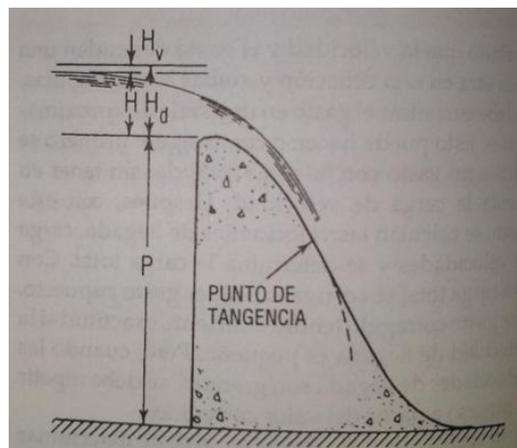
### 2.5.3 Vertedero Creager (Silva, n.d.)

Por razones de estabilidad de construcción no es posible en obras grandes como azudes utilizar vertederos de cresta delgada y es por esta razón que se ha adoptado darles un perfil trapezoidal ligeramente redondeado que facilite el paso del agua, y que este sometido a una presión nula en todos sus puntos.

Es eso lo que ha tratado de conseguir Creager con el perfil que lleva su nombre. Ver Figura 2.9 y Figura 2.10.



**Fig. 2.9 Vertedero Creager. Tomado de (“Embalses.net,” n.d.)**



**Fig. 2.10 Vertedero de Cimacio. Tomado de (Frederick S. Merrit, M. Kent Loftin, 1999)**

El desarrollo del vertedor de cresta de moldadura (tipo cimacio o Creager) consta de un perfil de cresta que sigue muy de cerca el perfil de la superficie



interior de una lámina ventilada que circule sobre un vertedor rectangular de pared delgada.

La forma de esa lámina y, por tanto, del cimacio, dependen de la carga que produzca el flujo. En consecuencia, se diseña un vertedor de tipo cimacio para una sola carga total, llamada carga de diseño. Cuando un vertedor de tipo cimacio descarga a la carga de diseño, el flujo se desliza sobre la cresta sin ninguna interferencia de las superficies y alcanza una eficiencia casi máxima. Para flujo con cargas mayores que la de diseño, la lámina está soportada por la cresta y se desarrolla presión en la cresta, la cual es superior a la atmosférica, pero menor que la hidrostática. Esta presión en la cresta reduce el gasto a menos de la del flujo ideal. (El flujo ideal es el flujo sobre un vertedor de pared delgada, totalmente ventilado, bajo la misma carga hidráulica  $H$ .)

Cuando el vertedor descarga con cargas mayores que la de diseño, la presión sobre la cresta es menor que la atmosférica y el gasto aumenta a más del flujo ideal. La presión puede volverse tan baja que ocurra separación en el flujo; no obstante, de acuerdo con Chow, puede excederse la carga de diseño, sin peligro en un 50% antes de que se desarrolle cavitación peligrosa.

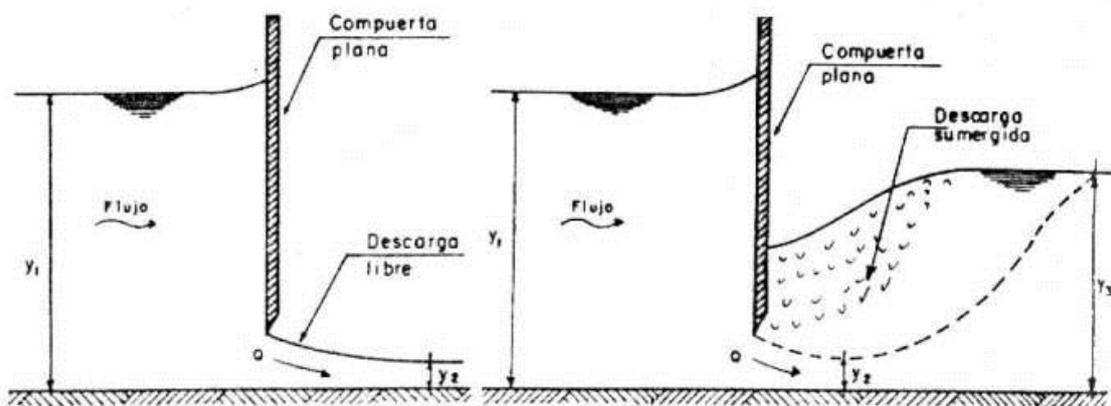
#### **2.5.4 Compuertas**

Una Compuerta es una placa móvil, plana o curva, que al levantarse, forma un orificio entre su borde inferior y la estructura hidráulica (presa, canal, etc.) sobre la cual se instala, y se utiliza en la mayoría de los casos para la regulación de caudales, y como emergencia y cierre para mantenimiento en los otros.

Las compuertas tienen las propiedades hidráulicas de los orificios y, cuando están bien calibradas, también pueden emplearse como medidores de flujo.

Las condiciones físicas, hidráulicas, climáticas y de operación, evaluadas apropiadamente, imponen la selección del tipo y tamaño adecuado de las compuertas.

Según las condiciones de descarga aguas abajo, la compuerta puede ser de descarga libre o compuerta con descarga sumergida o ahogada como se ilustra en la Figura 2.11.

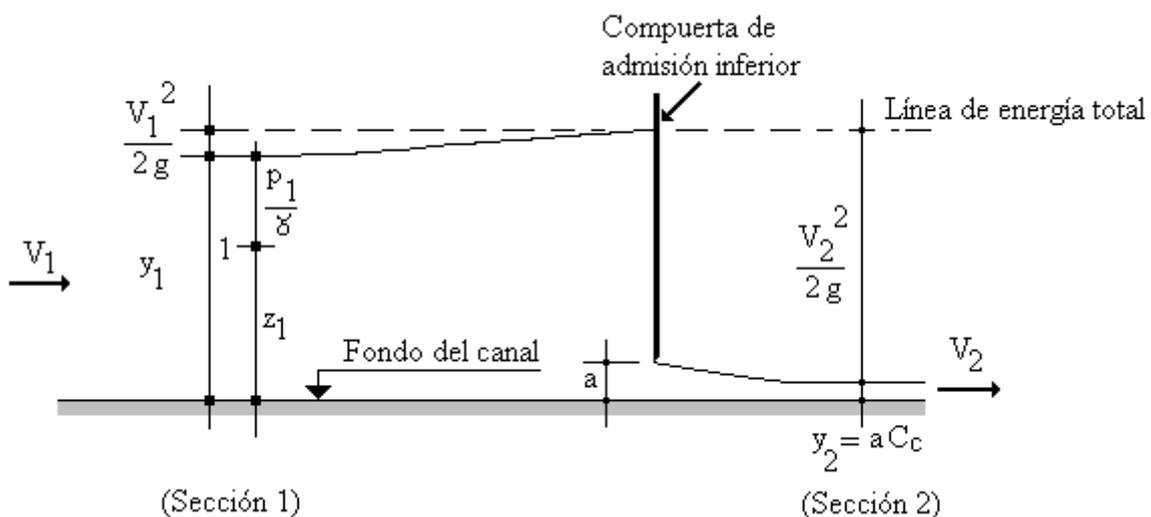


**Fig. 2.11 Flujo a través de Compuertas. Tomado de (“Flujo a través de compuertas,” n.d.)**

### 2.5.5 Compuerta de admisión inferior

Una compuerta de admisión inferior es una placa plana de cualquier material; como por ejemplo: hierro, aluminio, madera y otros, que se coloca perpendicularmente en un canal a una determinada distancia sobre el fondo. Cuando hay una corriente de agua esta placa obliga a la misma a almacenarse aguas arriba de ella ( de donde viene el agua generalmente se le denomina “aguas arriba”) para finalmente pasar por la parte inferior y continuar hacia aguas abajo (hacia donde va el agua generalmente se denomina “aguas abajo”).

Las compuertas de admisión inferior se podrían usar para determinar el caudal que fluye por debajo de ellas, en función de la abertura de la compuerta “a”, sobre el fondo del canal, la profundidad  $y_1$ , del agua antes de la compuerta y la gravedad  $g$ . En la Figura 2.12 se muestra un corte longitudinal de una compuerta de admisión inferior, instalada en un canal rectangular, indicando las diferentes variables que intervienen.



**Fig. 12 Compuertas de admisión inferior. Tomado de (G., 2009)**

Para poder obtener el caudal o alguna otra variable del canal por medio de compuertas, es necesario observar experimentalmente las condiciones en la cuales se produce el escurrimiento por debajo de una compuerta y determinar los coeficientes de contracción  $C_c$ , y de descarga  $C_d$ , para una compuerta de admisión inferior.



**Fig. 2.13 Compuerta de Admisión Inferior. Tomado de (G., 2009)**

En la Figura 2.13 se muestra la instalación de una compuerta de admisión inferior, puede observarse como el calado aguas arriba es superior al calado aguas abajo.

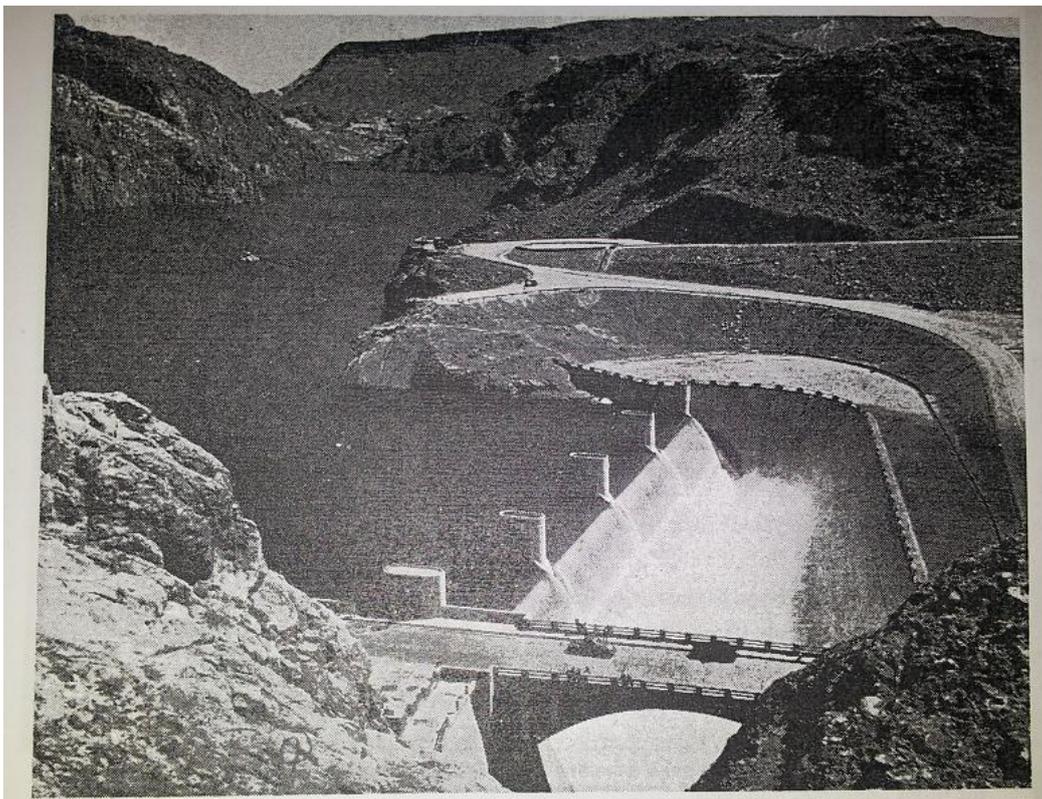
## **2.6 Flujo Gradualmente variado**

El flujo es variado si la profundidad de flujo cambia a lo largo de un canal. El flujo variado puede clasificarse además como rápidamente variado o gradualmente variado. El flujo es rápidamente variado si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias relativamente cortas; de otro modo, es gradualmente variado. Un flujo rápidamente variado también se conoce como fenómeno local; algunos ejemplos son el resalto hidráulico y la caída hidráulica.

El flujo espacialmente o gradualmente variado, tiene una caudal no uniforme como resultado de la adición o disminución de agua a lo largo del curso del flujo. El agua agregada o extraída causará perturbaciones en el contenido de

energía o de momentum del flujo. Como resultado, el comportamiento hidráulico de un flujo espacialmente variado es mas complicado que el de un flujo con caudal constante. Además, el comportamiento hidráulico del flujo espacialmente variado con caudal creciente es en ciertos aspectos, diferente del flujo similar con caudal decreciente.

1. La teoría del flujo gradualmente variado tal vez fue empleada por primera vez en el diseño de vertederos laterales o vertederos de pared delgada laterales. Este tipo de estructura a menudo es una escotadura larga instalada a lo largo de un canal con el propósito de desviar o rebosar excesos de flujo o viceversa. Ver Figura 2.14.



**Fig. 2.14 Vertedero de Canal lateral. Tomado de (Ven Te Chow, 1994)**

El estudio de este tipo de flujo es importante ya que nos permite conocer el tipo de perfil del flujo, lo que nos ayudará en el momento del diseño y



dimensionamiento de obras hidráulicas para el control del flujo, como puede ser la captación de agua con una rejilla de fondo desde un canal ya sea natural o artificial, el diseño de vertederos que funcionan como aliviaderos de aguas lluvias, etc.

## 2.7 Coeficiente de rugosidad en canales (Ven Te Chow, 1994)

En 1889 el ingeniero irlandés Robert Manning presentó una ecuación, la cual se modificó mas adelante hasta llegar a su bien conocida forma actual:

$$V = \frac{1.49}{n} * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Donde V es la velocidad media en pies/s, R es el radio hidráulico en pies, S es la pendiente de la línea de energía y n es el coeficiente de rugosidad, específicamente conocido como “**n de Manning**”. Esta ecuación fue desarrollada a partir de siete ecuaciones diferentes, basada en los datos experimentales de Bazin y además verificadas mediante 170 observaciones. Debido a la simplicidad de su forma y a los resultados satisfactorios que arroja en aplicaciones prácticas, la ecuación de Manning se ha convertido en la más utilizada de todas las ecuaciones de flujo uniforme para cálculos de flujos en canales abiertos.

Al aplicar la ecuación de Manning la mayor dificultad está en la determinación del coeficiente de rugosidad n, ya que no existe un método exacto para la selección del valor de n. Con el nivel de conocimiento actual, seleccionar un valor de n significa estimar la resistencia al flujo en un canal determinado, lo cual realmente es un asunto de intangibles. Para ingenieros veteranos, esto significa utilizar profundos criterios de ingeniería y experiencia; para



principiantes, no pasa de ser un proceso de adivinanza, y diferentes individuos obtendrán diferentes resultados.

Con el fin de dar una guía para la determinación correcta del coeficiente de rugosidad, se deben estudiar cuatro enfoques generales:

1. Entender los factores que afectan el valor de  $n$  con el fin de adquirir el conocimiento básico del problema y disminuir el rango de incertidumbre.
2. Consultar una tabla de valores comunes de  $n$  para canales de diferentes tipos.
3. Examinar y familiarizarse con la apariencia de algunos canales comunes cuyos coeficientes de rugosidad se conocen, y:
4. Determinar el valor de  $n$  mediante un procedimiento analítico basado en la distribución de velocidades teóricas en la sección transversal de un canal y en los datos de medición de velocidad o de rugosidad.

Los factores que afectan el coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning son:

- Rugosidad superficial: en general, granos finos dan como resultado un valor relativamente bajo de  $n$ , y granos gruesos, un valor alto de  $n$ .
- Vegetación: un flujo con suficiente profundidad tiende a doblar y a sumergir la vegetación, con lo cual se producen valores bajos de  $n$ . Una pendiente alta genera altas velocidades, mayor aplanamiento de la vegetación y valores bajos de  $n$ .
- Irregularidad del canal.
- Alineamiento del canal.
- Sedimentación y socavación.
- Obstrucción
- Tamaño y forma del canal
- Nivel y caudal.



- Cambio estacional
- Material en suspensión y carga del lecho.

La referencia (Ven Te Chow, 1994) nos da un procedimiento para calcular el valor de  $n$ , así como también nos proporciona tablas e ilustraciones de canales con su correspondiente valor de  $n$ , para compararlos con los que se deban trabajar.

### Capítulo 3.

#### 3.1 Medidas de Caudal

Comúnmente los medidores de caudal son utilizados para medir el flujo de materiales en distintas partes de un proceso.

Dentro de los procesos realizados es necesario realizar un control automático, el cual tenga como referencia una medida de caudal, que nos permita optimizar recursos, dándonos así seguridad en la información recolectado durante el proceso.

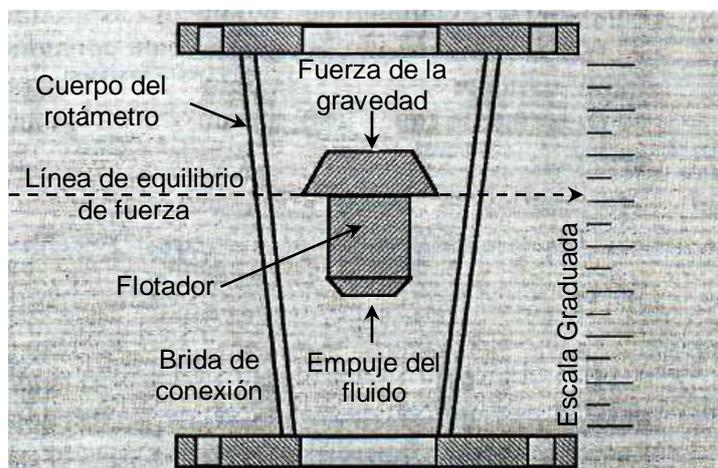
Entre los medidores de caudal tenemos los siguientes tipos:

- Medidores de área variable.
- Medidores de desplazamiento positivo.

- Medidores másicos.
- Medidores por presión diferencial.
- Medidores electromagnéticos.

### 3.1.1 Medidores de área variable

Estos medidores, comúnmente conocidos como rotámetros, emplean el principio de presión diferencial, que tienen en cuenta la relación entre la energía de la presión y la energía cinética.



**Fig. 3.122 Rotámetro**

La precisión diferencial permanece constante mientras que en el área de restricción cambia constantemente al mismo tiempo que el caudal.

Por tanto estos dispositivos se basan en un balance de fuerzas, en los que las fuerzas de impacto y arrastre hacen ascender el flotador, aumentando el área anular disponible para el paso del fluido, con lo que disminuirá la fuerza total ascendente. El equilibrio se encuentra cuando la fuerza total ascendente iguala al peso del flotador. Dando así una indicación directa del caudal.

Ventajas	Desventajas
----------	-------------



Bajo costo.	No apto para altas presiones.
Simplicidad.	Debe ser montado verticalmente.
Apto para caudales muy pequeños.	Capacidad limitada para caudales muy altos.
Caída de presión constante y muy pequeña.	Las versiones estándar no disponen de sistema de transmisión.
Lectura lineal del caudal.	Se deben utilizar solo con fluidos limpios (suciedad sobre el cristal).

### 3.1.2 Medidores de desplazamiento positivo

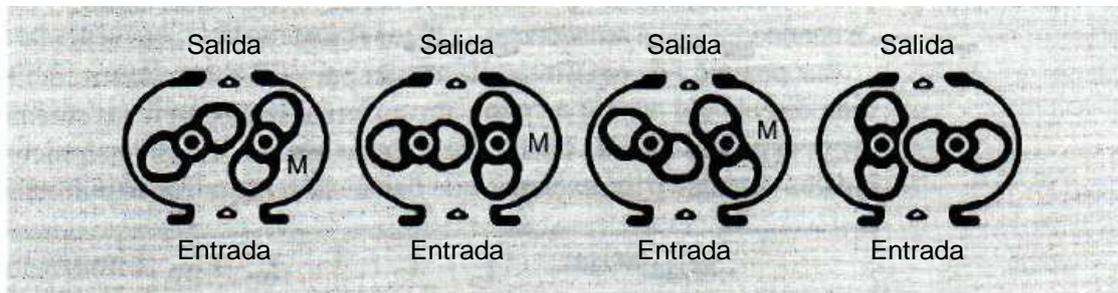
Estos medidores, comúnmente llamados contadores, funcionan atrapando un volumen unitario y conocido ( $V_u$ ), desde su entrada hasta su salida, contando el número de volúmenes desplazados ( $N$ ) en un tiempo determinado ( $t$ ).

La obtención del caudal ( $Q$ ) se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{V_u * N}{t}$$

La lectura se realiza por medio de un sistema mecánico de transmisión, aun conjunto de engranajes que hacen mover un contador totalizador.

De esta manera se obtiene una medida de forma directa, sin tener que recurrir a ningún tipo de cálculo.



**Fig. 3.2 Contador de ruedas ovas**

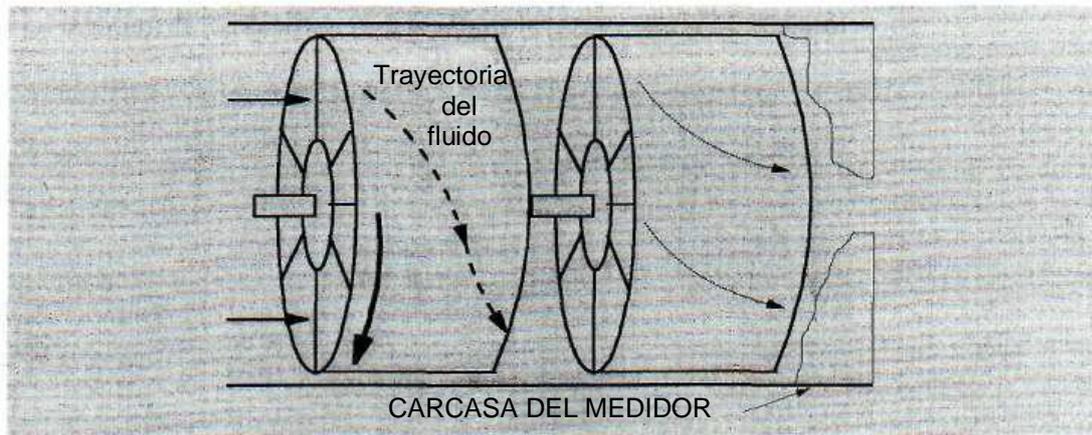
Ventajas	Desventajas
Buena exactitud y amplio rango de medida.	Caro, especialmente en grandes tamaños.
Muy buena repetitividad.	Alta pérdida de carga.
Apto para fluidos con alta viscosidad, admitiendo grandes cambios en la misma.	No apto para fluidos abrasivos o sucios (su requiere de un filtro previo).
Lectura local directa en unidades de volumen. La lectura se puede transmitir por medio de pulsos.	Las partes móviles tienen muy poca tolerancia entre ellas para evitar fugas de líquido (posibles bloqueos).
No necesita alimentación eléctrica.	Limitan el caudal de paso a través suyo.
Amplio rango de caudal.	Pueden dañarse por sobre velocidad.

### 3.1.3 Medidores máxicos

Están diseñados para medir directamente el caudal de fluido en unidades de masa (ejem: kg/h), en lugar de medir el caudal en volumen (ejem: m<sup>3</sup>/h).

Existen de dos tipos:

- De volumen con corrección automática de densidad incorporada.
- De masa directamente.



**Fig. 3.3 Medidor másico de momento angular.**

El medidor de másico de momento angular consta de dos rotores. El primero gira a una velocidad constante para darle al fluido una velocidad angular, mientras que el segundo rotor permanece fijo, produciéndose un par de torsión en este último, proporcional al caudal en masa.

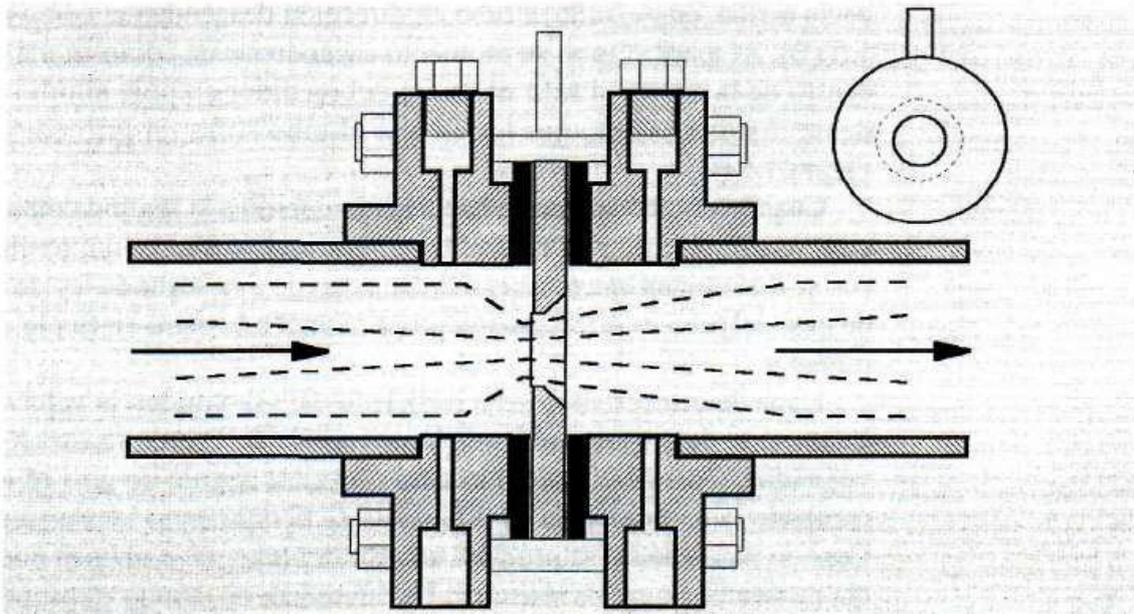
Ventajas	Desventajas
Muy buena exactitud.	El conjunto es relativamente caro.
Rango de medida muy amplio.	Pérdida de carga media.
Lectura directa del caudal en unidades de masa sin necesidad de compensación.	Generalmente no es utilizable para gases o vapor.
Costos de mantenimiento reducidos.	Costos de instalación altos.

Salida lineal	No utilizable en tuberías de gran tamaño.
---------------	---

### 3.1.4 Medidores por presión diferencial

Es un método ampliamente utilizado en la industria para medir caudales.

Existen varios dispositivos que utilizan el principio de presión diferencial, tales como: placas de orificio con diversa formas, tubos Venturi, toberas, tubos Pitot, etc., de los cuales el más utilizado es el de placas de orificio.



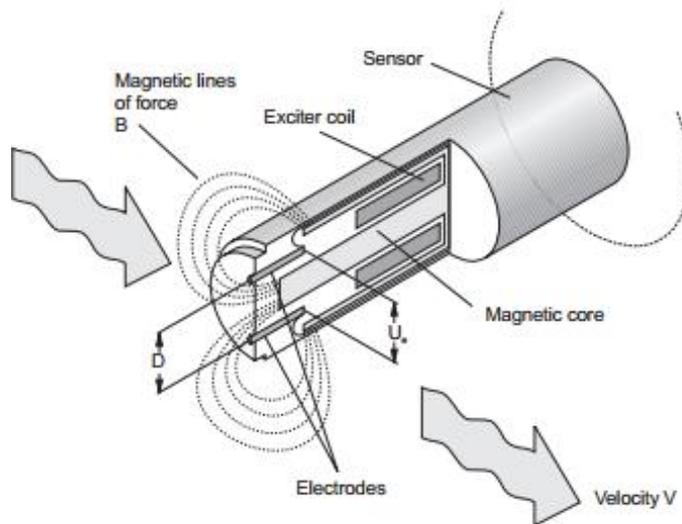
**Fig. 3.4 Placas de orificio concéntrico con aristas vivas.**

Ventajas	Desventajas
No tienen componentes móviles.	Relación cuadrática entre presión diferencial y caudal.

Se dispone de un amplio margen de rangos y tamaños.	Relativamente baja exactitud.
Aptos para la mayoría de gases y líquidos.	Pérdida de presión no recuperable.
Ampliamente establecido y aceptado.	La viscosidad afecta al rango de caudal.
No necesita calibración del elemento (Simplicidad).	La instalación puede llegar a ser costosa.

### 3.1.5 Medidores electromagnéticos

Consiste en un dispositivo compuesto por un par de polos, los mismos que se les aplica un campo magnético, que de acuerdo a la ley de Faraday que anuncia que el voltaje inducido a través de un conductor que se desplaza transversal a un campo magnético es proporcional a la velocidad del conductor.



**Fig. 3.5 Esquema de Caudalimetro electromagnético**



$$U = B \times V \times D$$

Donde:

$U$ : Voltaje inducido por el conductor.

$B$ : Campo magnético aplicado.

$V$ : Velocidad del fluido.

$D$ : Distancia entre el par de polos.

Si tenemos la velocidad del agua podemos hallar su caudal debido a que conocemos la sección transversal de la tubería.

$$Q = V \cdot A$$

Donde:

$Q$ = Caudal en la tubería.

$V$  = velocidad del fluido.

$A$  = Sección transversal de la tubería.

Este sistema es muy confiable ya que no posee partes móviles, pero solo funciona con líquidos que poseen algo de conductividad eléctrica como por ejemplo el Agua.

### **3.2 Factores de selección del medidor de flujo.**

- Rango: En el mercado existen medidores muy preciosos (en el orden de los mililitros por segundo) y otros de varios metros cúbicos por segundo, por lo que se debe conocer la magnitud de la velocidad general esperada.



- Exactitud requerida: Se requiere de por lo menos una exactitud menor al %5.
- Perdida de presión: Debido a la construcción y colocación del medidor podemos tener una ligera pérdida de energía (presión) en la libre circulación del fluido, además de posibles protuberancias en la tubería que pueden deformar el perfil de velocidades del fluido.
- Tipo de fluido: Se deben tener en cuenta aspectos como: salinidad (corrosión), temperatura, conductividad, viscosidad, turbiedad
- Calibración: Esta es una característica importante que nos proporciona el fabricante, y que emplearemos al momento de calibrar el equipo.  
Para esta calibración, en algunos casos, se puede utilizar otro medidor como referencia para comparar lecturas, y así poder hacer ajustes en los para metros de calibración de nuestro medidor de caudal
- Costo.
- Facilidad de lectura.

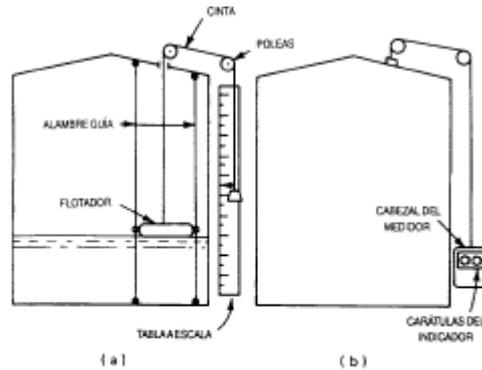
### 3.3 Medidas de Nivel

Entre los medidores de nivel podemos destacar los siguientes:

- Desplazamiento
- Presión diferencial
- Burbujeo
- Radioactivo
- Capacitivo
- Ultrasonidos
- Conductivímetro
- Servoposicionador

### 3.3.1 Medidor por desplazamiento (flotador)

Cosiste de un flotador, en contacto con el fluido, que se encuentra conectado al exterior del depósito a una escala graduada de nivel.



Medidores de flotador y cinta.  
 a) Indicador de tabla a escala.  
 b) Medidor de lectura en tierra

**Fig. 3.6** Medición de nivel por flotador.

Ventajas	Desventajas
Tienen una presión de 0.5%.	El flotador es susceptible de mal funcionamiento por eventuales depósitos de solidos que el líquido contenga.
Son adecuados en la medida de niveles en depósitos abiertos o cerrados.	
Son independientes del peso específico del fluido.	

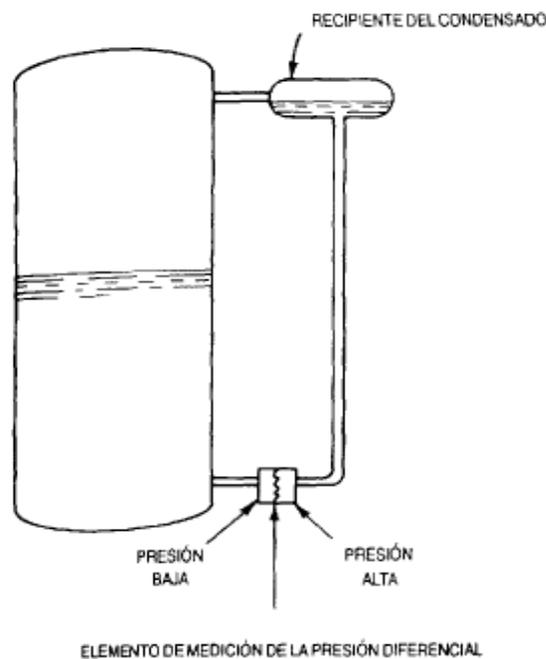
### 3.3.2 Medidor por presión diferencial

Consiste de un diafragma, que forma parte de un transmisor neumático, en contacto con el fluido del depósito, que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del depósito.

En un tanque abierto el nivel del líquido es proporcional a la presión en el fondo.

$$p = \rho * g * h$$

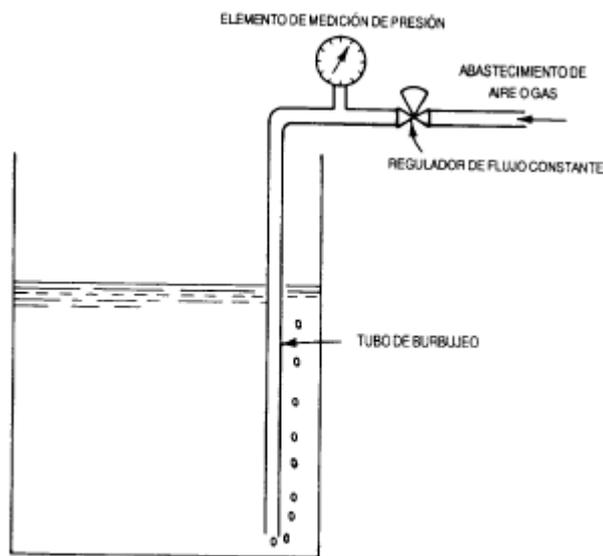
En cambio en un tanque cerrado es proporcional a la diferencia de presión ejercida por el líquido y la presión que tiene el depósito.



**Fig. 3.7 Medición de nivel por presión diferencial en un tanque cerrado.**

### 3.3.3 Medidor por Burbujeo

Se lo realiza por medio de un tubo sumergido en el líquido, a través del cual se hace burbujear aire o gas, mediante un rotámetro que posea un regulador de caudal, hasta que se produzca una corriente uniforme de burbujas, teniendo que la presión requerida para producir un flujo continuo de burbujas es una medida del nivel del líquido.



**Fig. 3.8 Medidor de nivel por burbujeo**

Ventajas	Desventajas
El fluido no penetra en el medidor, ni en la tubería de conexión.	El burbujeo puede perjudicar al líquido.
	En fluidos viscosos se corre el riesgo de que las burbujas no se desplacen adecuadamente

### 3.3.4 Medidor Radiactivo

Consiste en la transmisión de rayos X, desde un emisor hasta un detector que convertirá la radiación recibida en una señal de corriente continua, cuyo valor será inversamente proporcional al nivel del fluido, ya que este último absorbe parte de la energía emitida.

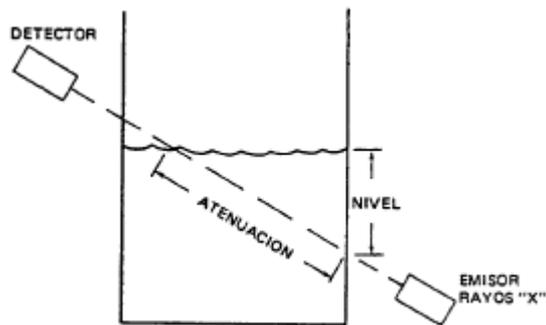


Fig. 3.9 Medidor de nivel radioactivo.

Ventajas	Desventajas
Son aptos para medir el nivel de fluidos con alta temperatura, líquidos muy corrosivos, etc., es decir lugares de difícil acceso o peligrosos.	La lectura viene influida por el aire o los gases disueltos en el líquido.
	Su aplicación es limitada por las dificultades que conllevan las fuentes radioactivas.



### 3.3.5 Medidor Capacitivo

Se basa en la variación de capacitancia de un condensador cuando va variando el medio dieléctrico entre sus placas.

El depósito metálico y una sonda metálica, sin contacto entre ambos, forman un condensador, que al variar el nivel de líquido, se varía proporcionalmente la capacidad.

Si el depósito no es metálico se introducen dos sondas.

En fluidos no conductores se emplea un electrodo normal y la capacidad total del sistema se compone de la del líquido, la del gas superior y la de las conexiones superiores.

En fluidos conductores el electrodo está aislado usualmente con teflón interviniendo las capacidades adicionales entre el material aislante y el electrodo en la zona del líquido y del gas.

Se caracterizan por no tener partes móviles, ser ligeros, presentar una buena resistencia a la corrosión y ser de fácil limpieza.

Tienen el inconveniente de que la temperatura puede afectar las constantes dieléctricas (0,1 % de aumento de la constante dieléctrica/°C) y de que los posibles contaminantes contenidos en el líquido puedan adherirse al electrodo variando su capacidad y alterando la lectura, en particular en el caso de líquidos conductores.

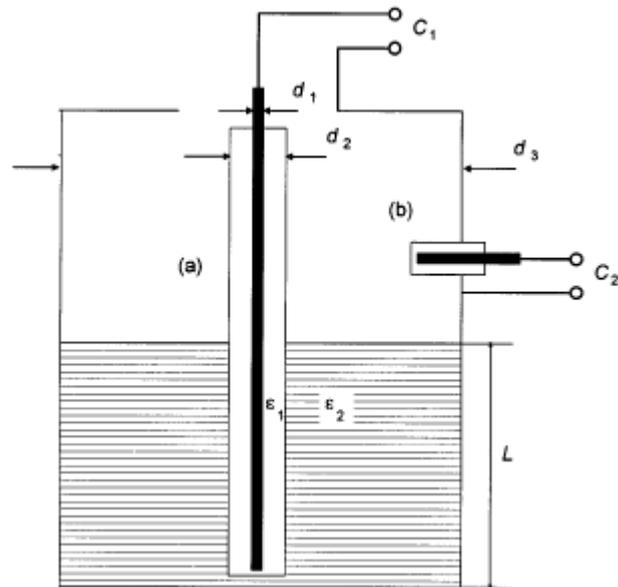


Fig. 3.10 Medidor de nivel capacitivo.

### 3.3.6 Medidor por Ultrasonidos

Se basan en que el tiempo que tarda una señal de audio en ir y volver de una superficie reflectante es proporcional al nivel a medir. Este tiempo también dependerá de la temperatura, por lo que se requiere compensar las medidas.

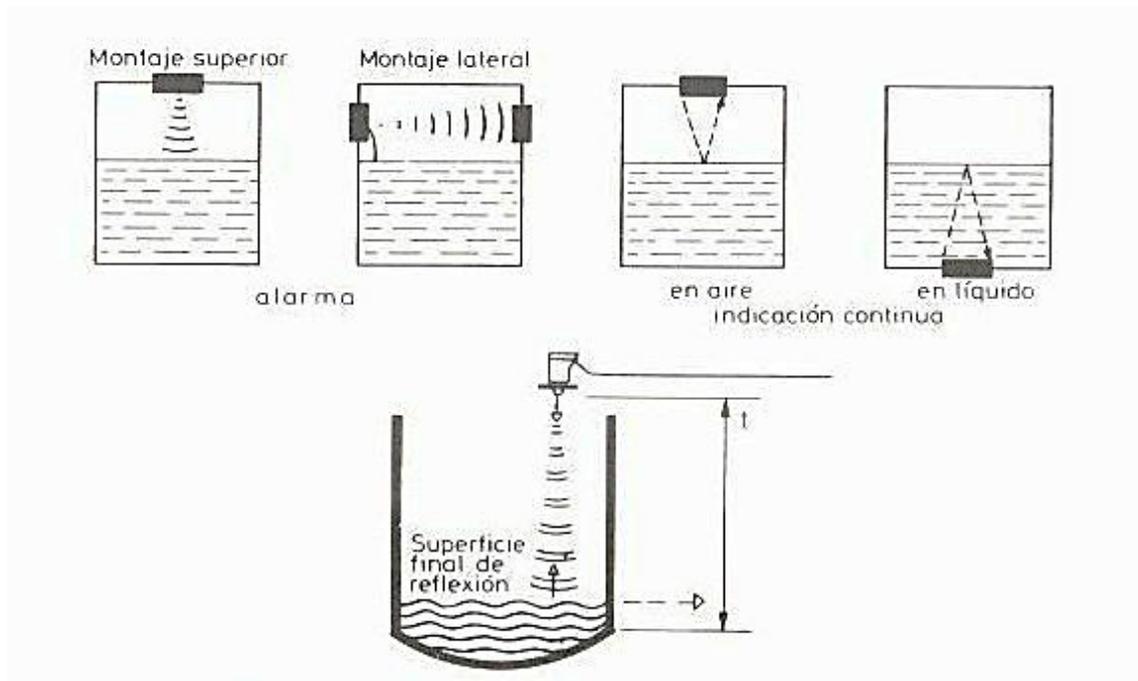


Fig. 3.11 Medición por ultrasonido.

### 3.3.7 Medidor conductímetro

Consta de una sonda con uno, dos o más electrodos, los cuales entran en contacto con el líquido conductor para que se cierre un circuito eléctrico, que a través de un dispositivo amplificador conmuta un contacto.

Se usa como interruptores de nivel en recipientes con líquidos conductores que no sean ni muy viscoso ni corrosivos, aunque también se usa para medidas continuas.

El líquido debe ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito electrónico. La impedancia mínima es del orden de los 20 MΩ/cm, y la tensión de alimentación es alterna para evitar fenómenos de oxidación en las sondas por causa del fenómeno de la electrólisis.

Cuando el líquido moja los electrodos se cierra el circuito electrónico y circula una corriente segura del orden de los 2 mA; el relé electrónico dispone de un temporizador de retardo que impide su enclavamiento ante una ola del nivel del líquido o ante cualquier perturbación momentánea o bien en su lugar se disponen dos electrodos poco separados enclavados eléctricamente en el circuito.

El instrumento se emplea como alarma o control de nivel alto y bajo, utiliza relés eléctricos para líquidos con buena conductividad y relés electrónicos para líquidos con baja conductividad.

Conviene que la sensibilidad del aparato sea ajustable para detectar la presencia de espuma en caso necesario.

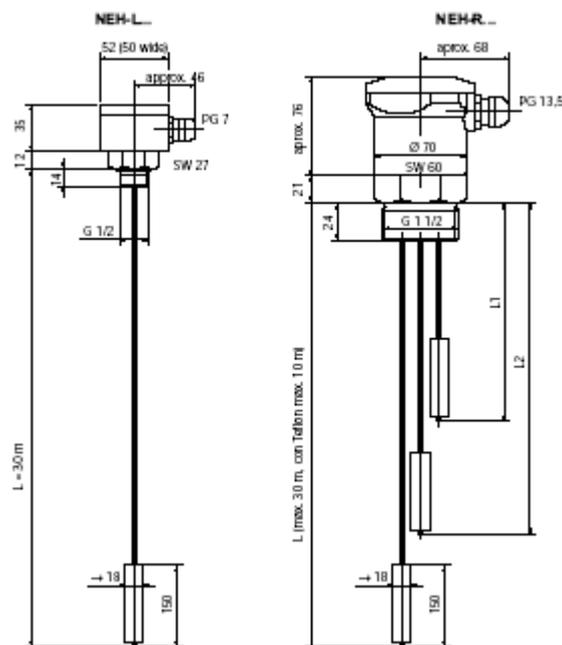
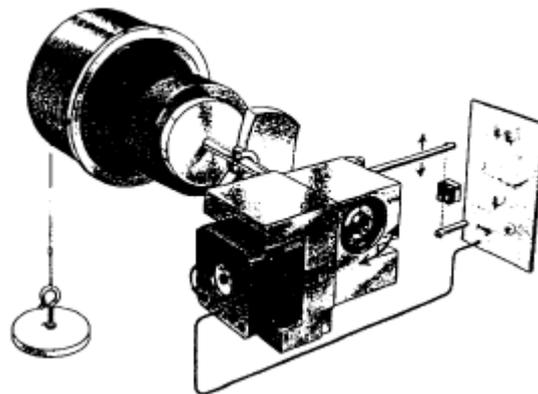


Fig. 3.12 Medidores tipo conductivímetro.

### 3.3.8 Medidor servoposicionador

Este medidor mide de forma continua la tensión en un hilo del cual pende un contrapeso, en forma de disco, que se desplazara al detectar una variación de tensión en el hilo por un cambio de nivel del líquido. Es decir el sistema está en equilibrio cuando el contrapeso tiene un ligero contacto con el líquido.



**Fig. 3.13** Medición de nivel mediante servoposicionador.



---

---

## Capítulo 4.

### 4.1 Requisitos mínimos para el diseño del tablero.

En si un tablero de control es un panel metálico, universalmente usado en la industria, que contiene elementos de interrupción y de mando, además de dispositivos de control, protección y medición, que se encuentran correctamente interconectados y soportados.

Los componentes del controlador se ensamblan e interconectan sobre una base común (panel), para garantizar la facilidad de conexión y chequeo del sistema. Así para paneles pequeños se los montara sobre muros y para los grandes sobre el suelo.

Los materiales principalmente utilizados en la construcción de paneles son: acero, pizarra, amianto.

El acero es el material más empleado, fundamentalmente por su resistencia mecánica, por el hecho de poder conectarse a tierra, ser fácilmente maquinado y resistencia a las vibraciones.

La pizarra normal se utiliza para tensiones de 1000 voltios. Es un material frágil, es no carbonizable al circularle corriente, y al usarse en paneles debe ser libre de impurezas.

El amianto es de fácil maquinado, y absorbe menos humedad que la pizarra, pero al carbonizarse se vuelve conductor.



---

La ventaja de usar materiales aislantes radica en permitir el montaje directo de partes conductoras, proporcionando un aislamiento natural a tierra.

Gran parte del trabajo se realiza empleando planos, por lo que es necesario tener los siguientes:

- Diagrama unifilar.
- Diagrama de control.
- Diagrama de interconexión.

Estos diagramas son necesarios para una correcta interpretación de la instalación.

Para el alambrado de control se utiliza cable #12 o #14 con aislamiento termoplástico (THW o THN-N)

Comúnmente se usa el siguiente código de colores:

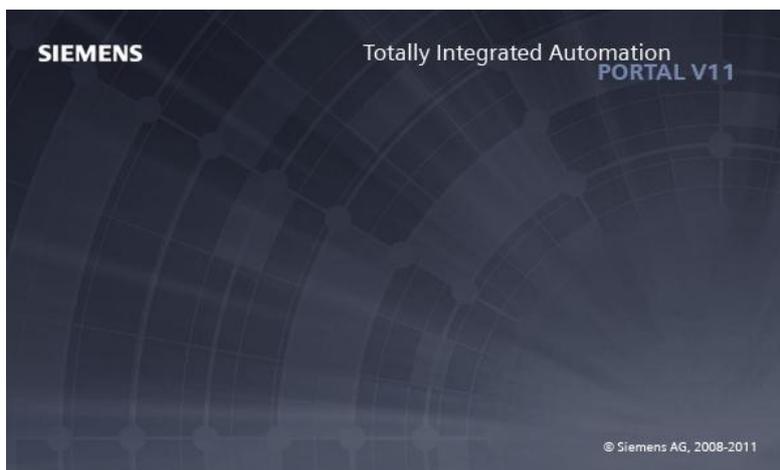
- Negro o gris: circuitos de potencia.
- Rojo: circuitos de c.a.
- Azul: circuitos de c.c.
- Verde o desnudo: tierra
- Blanco: Neutros

Para la conexión de circuitos de potencia se lo realiza mediante barraje de cobre o aluminio, o empleando cable aislado, dependiendo que es lo que nos conviene.

## 4.2 Interfaz Hombre - Máquina (HMI).

El diseño del sistema HMI corresponde a los procesos llevados en el canal por lo que el desarrollo de nuestra propuesta, permitirá controlar y medir los parámetros deseados.

Para la realización de esta interfaz se ha utilizado el software Totally Integrated Automation Portal versión V11 SP11 el cual integra el Step 7 Professional y el WinCC Basic, los cuales nos permiten un manejo simultaneo de las variables tanto en el plc S7-1200, como en la pantalla HMI.



**Fig. 4.1 Totally Integrated Automation**

A continuación se muestra una gráfica que representa la pantalla de inicio de nuestro sistema de control compuesta de múltiples accesos que brindan al usuario la posibilidad de desplazarse por las distintas opciones de una manera rápida y cómoda.



**Fig. 4.2 Pantalla de inicio.**

La ventaja de visualizar los valores reales de medida, brindan al usuario un rápido entendimiento de los procesos realizados y además de un control centralizado.

Las siguientes figuras son el resultado de elegir entre las distintas opciones disponibles en la pantalla principal.

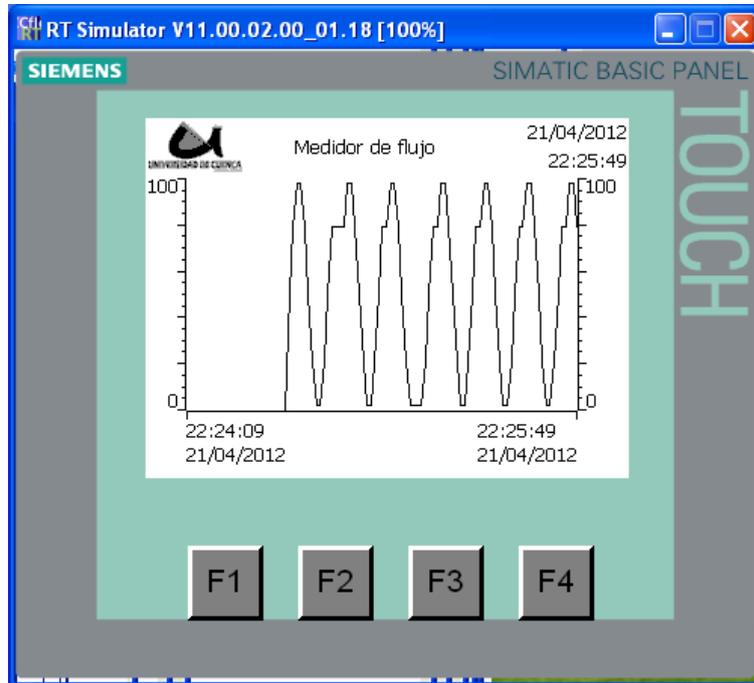


Fig. 4.3 Pantalla de medidor de flujo.

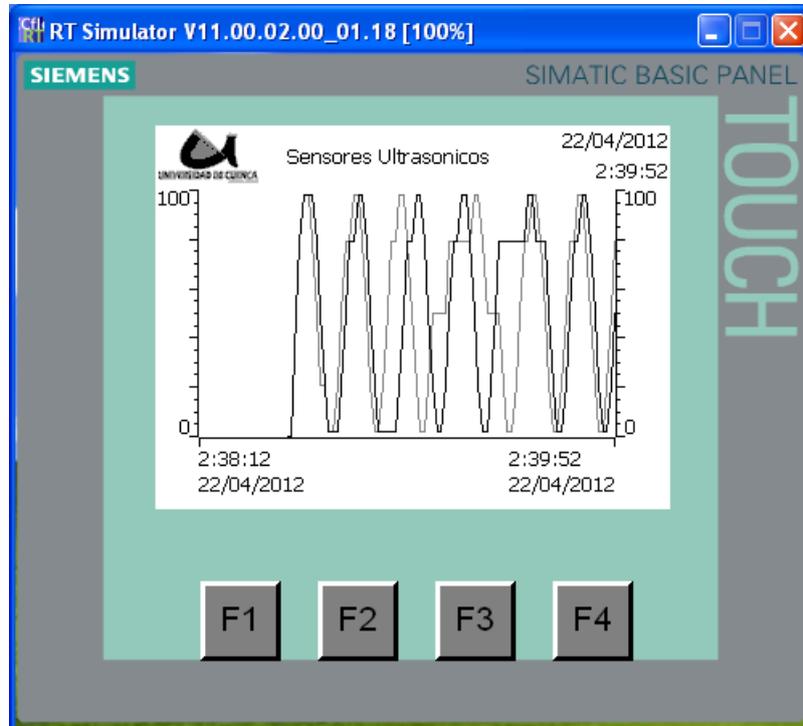


Fig. 4.4 Pantalla de los Sensores de Ultrasonicos.

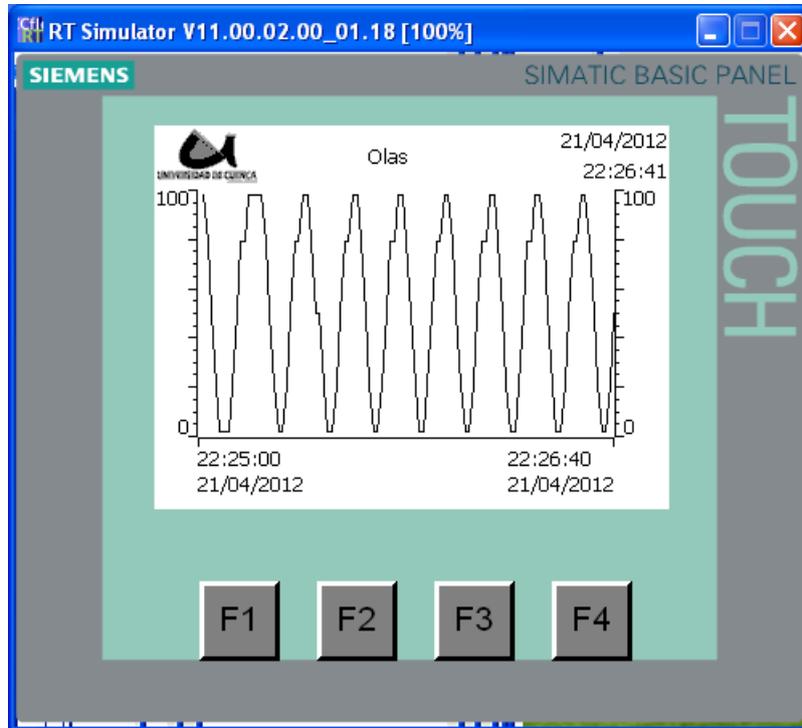


Fig. 4.5 Pantalla del generador de olas.

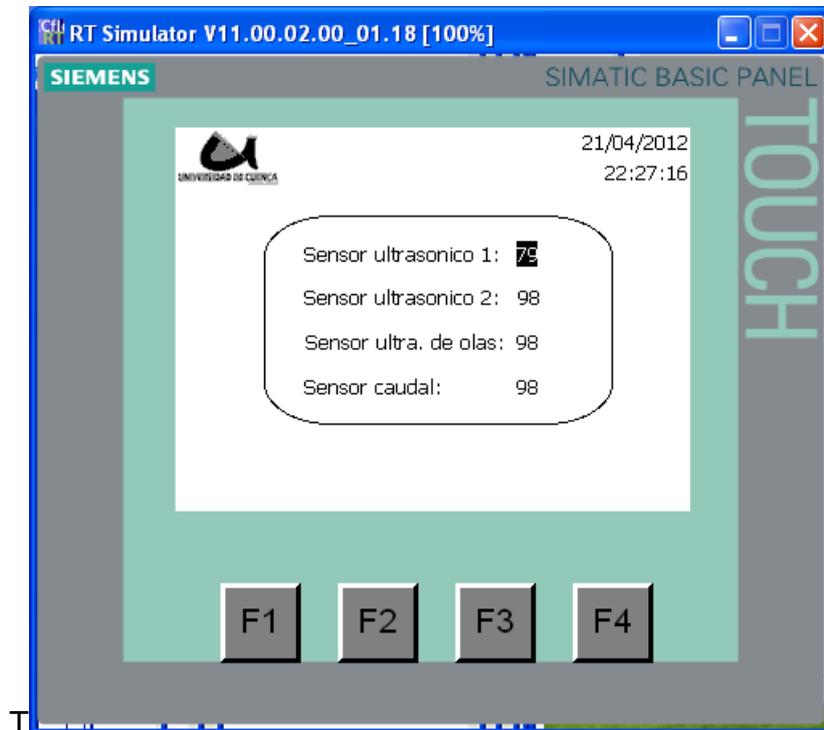


Fig. 4.6 Pantalla de medidor de variables

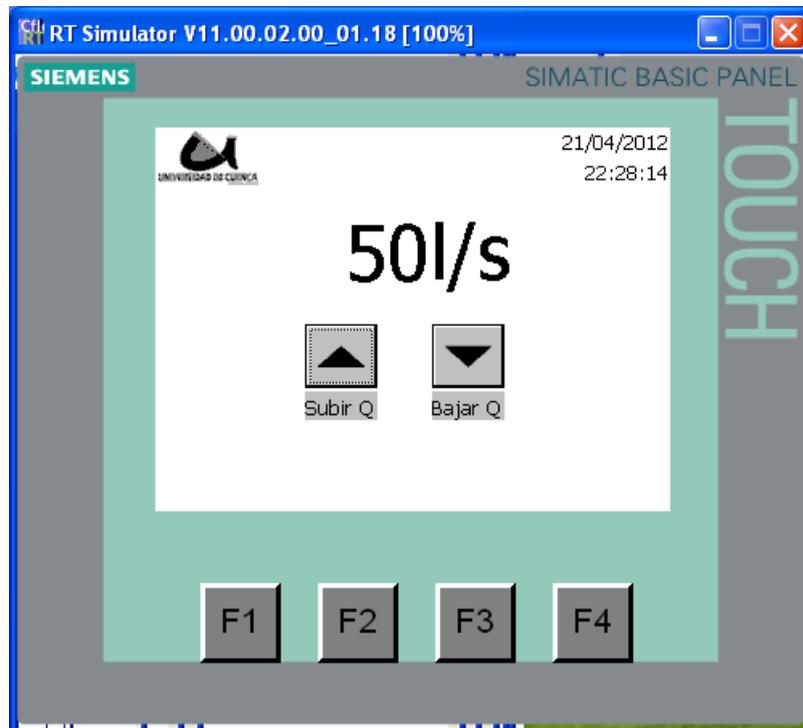


Fig. 4.7 Pantalla del caudalimetro.

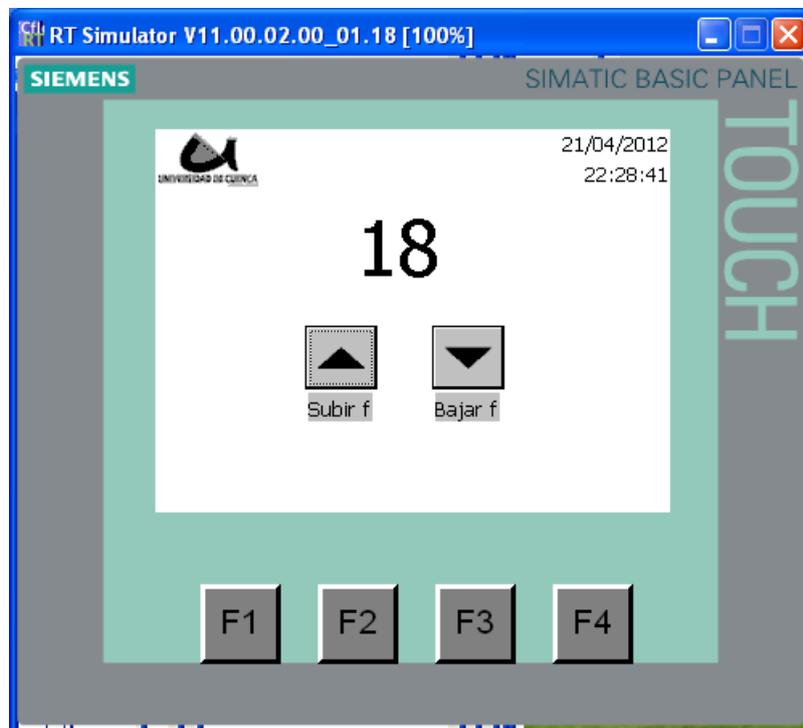


Fig. 4.8 Pantalla de variador de frecuencia.



### 4.3 PLC

El PLC seleccionado es el S-1200, al cual se le ha incorporado los siguientes accesorios:

- SM 1231 AI4  
Referencia: 6ES7 231-4HD30-0xB0  
Descripción: Módulo de entradas analógicas con AI4 x 13bits; bloques de bornes insertables; entradas: 2,5V, 5V, 10V y 0..20mA; supresión de frecuencias parametrizable; filtrado parametrizable; diagnóstico parametrizable.
- Signal Board con 1AO(V/I)  
Referencia: 6ES7 223-0BD30-0xB0  
Descripción: Modulo de salida analógica con AQ1x12; colocado en la parte superior del plc, con bornes insertables.



En la figura anterior se muestra el circuito de control necesario para poder controlar la válvula de apertura o cierre del canal, donde tenemos para control manual a E1(abertura) y E2(cierre) y desde el HMI (variables internas manipulables) a EE1(abertura) y EE2(cierre) .

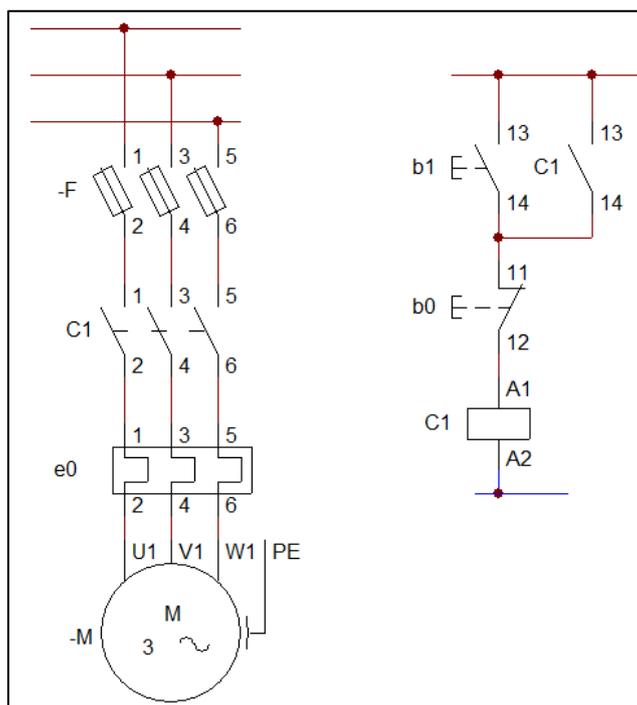
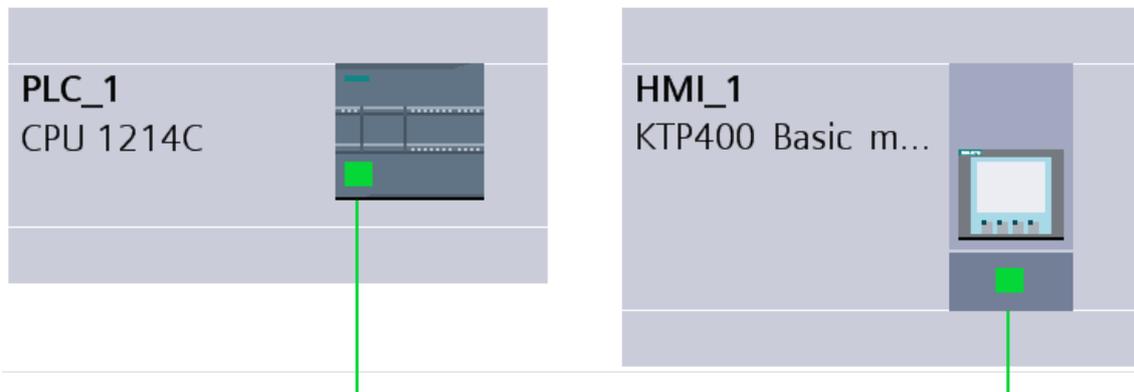


Fig. 4.11 Diagrama de control de la bomba.

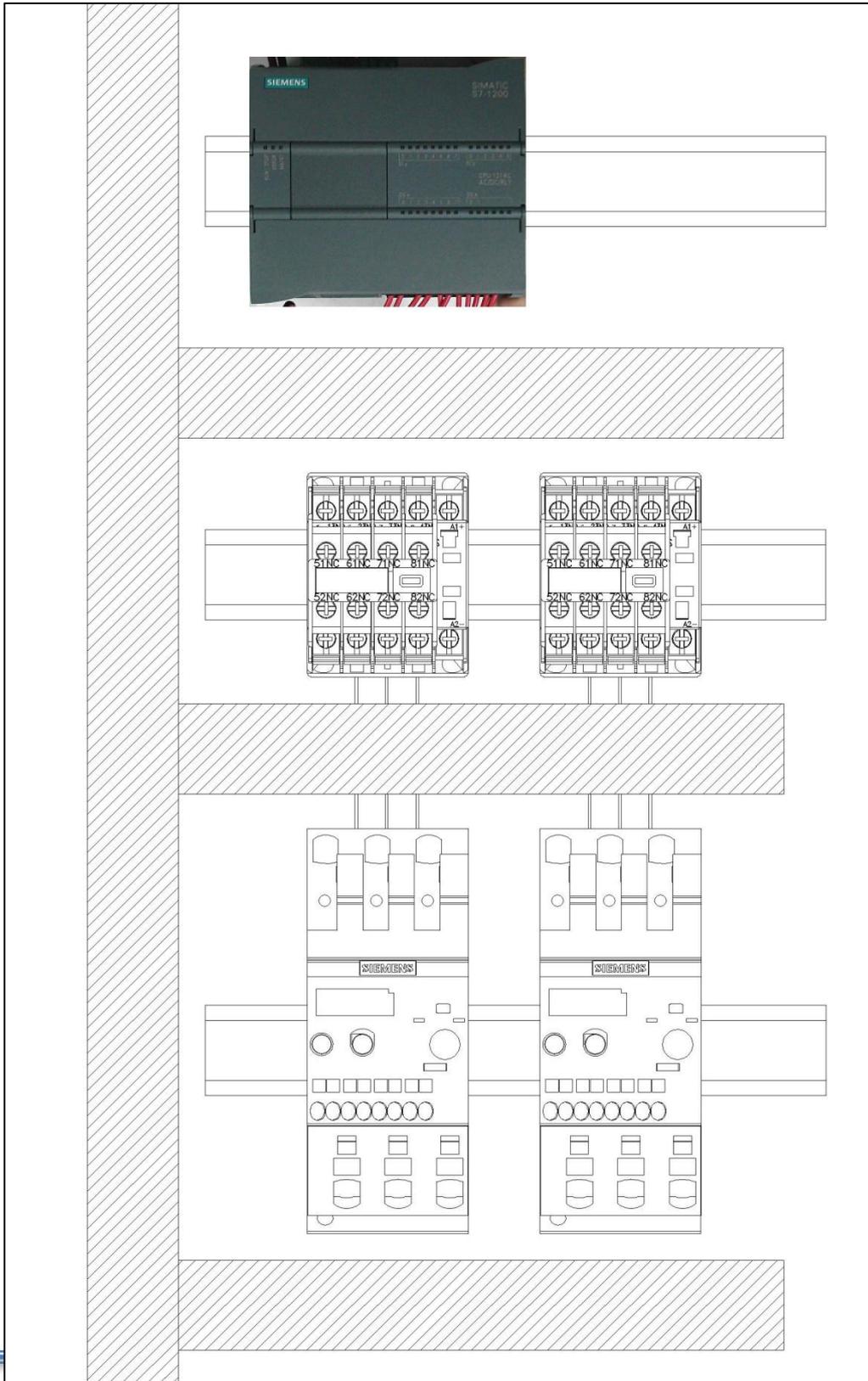
#### 4.4 Protocolo de comunicación PROFINET.

Es un estándar abierto para la automatización industrial, que pretende integrar directamente los sistemas con los buses de campo.



**Fig. 4.12** Comunicación entre el PLC y el HMI

## TABLERO DE CONTROL





## Capítulo 5.

### DISEÑO DE FUERZA.

#### 5.1 Control de motores:

##### 5.1.1 Definición del control.

Según el código eléctrico del NEC (National Electric Code) se define al término mando o control como “cualquier interruptor o un complejo sistema normalmente utilizado para el arranque y parada del motor”.

Este mando o control puede ser accionado manualmente o automáticamente.

##### 5.1.2 Requisitos para los mandos o controles.

Para un correcto funcionamiento, el mando debe ser capaz de arrancar o parar el motor. Adicionalmente tendrá que ser apto para interrumpir la corriente del motor cuando el rotor este bloqueado.

Basta con que el mando cierre o abra el número de Conductores suficientes para arrancar y parar el motor.

El mando o su medio de desconexión deben quedar bloqueados en su posición de abierto. Es claro que se incluye estas condiciones como medida de seguridad, para trabajar en el equipo, sin el peligro de que alguien que ignore el funcionamiento de este pueda arrancar el motor accidentalmente.

##### 5.1.3 Partes del control de un motor.

- Interruptores y conmutadores.



---

Se llaman interruptores y conmutadores a grupo de accesorios que abren y cierran, o cambian las conexiones en los circuitos eléctricos. Existen de dos tipos, manuales y automáticos. En la práctica un interruptor o un conmutador realiza por lo general la función de “maestro” motivo por el cual se llama interruptor maestro o principal, y gobierna el funcionamiento de contactores, relés u otros aparatos de accionamiento magnético.

- **Dispositivos de protección.**

Todos los circuitos eléctricos deben ir provistos de algún tipo de protección a la sobrecorriente, y actúe casi instantáneamente para desconectar de la línea de alimentación el equipo eléctrico, y si, por el contrario la sobrecarga es moderada, realice sus funciones.

- **Pulsadores**

Es el más usado para iniciar la actuación de los sistemas eléctricos. Hay dos tipos de botones: 1) El tipo de contacto momentáneo, 2) El tipo de contacto sostenido.

- **Relés y contactores.**

Los relés y contactores son dispositivos a través de los cuales se aplica, retira o modifica la potencia que necesitan las máquinas principales. El relé es un aparato que censa una variación, en un circuito eléctrico, para poner en funcionamiento otros dispositivos en el mismo circuito o en otros circuitos. Por su parte un contactor es un dispositivo para establecer e interrumpir repentinamente un circuito de energía eléctrica.

- **Relés Temporizados.**



Permiten a los circuitos controlados automáticamente la sucesión de las operaciones, pudiendo cronometrarse con gran exactitud. Existen numerosos tipos y pueden ajustarse para regular períodos de tiempo cortos, como de fracciones de segundo, o mucho más largos como de varios minutos, Además con otros relés temporizados accionados por motor se puede obtener retardos sumamente dilatados, hasta de varias horas.

- **Resistencias y reóstatos.**

Los circuitos de regulación empleados en la industria tienen un aspecto común: la utilización de resistencias y reóstatos para limitar el paso de corriente durante ciertos períodos de trabajo, así como para proporcionar un medio que permita efectuar los necesarios ajustes de tensión.

- **Semiconductores controlados.**

Los semiconductores conforman un grupo de dispositivos interruptores con facultades de conducir la corriente en una o dos direcciones; o con propiedades de conectar y desconectar.

- a) Diodos.**

Son dispositivos de estado sólido de dos terminales, los cuales conducen automáticamente al aplicarles una polarización directa, esto es, ánodo positivo y cátodo negativo, éstos dispositivos son conocidos como diodos rectificadores.

- b) Tiristores de Potencia.**

El tiristor es un elemento electrónico de maniobra, que en un circuito de convertidores estáticos permite mandar la tensión, la intensidad de la corriente, la potencia y la frecuencia, sin discontinuidad ni grandes



pérdidas. Un elemento de maniobra ideal deberá de cumplir las siguientes condiciones:

- En estado de apertura: bloquear en ambas direcciones las tensiones de hasta algunos miles de voltios.
- En estado de cierre: conducir la corriente necesaria de hasta varios miles de amperios de intensidad, con pérdidas de paso insignificantes.
- Buen comportamiento dinámico durante la maniobra: cierre momentáneo sin rebotes, apertura instantánea sin formación de chispas.

**c) Transistor de Potencia.**

El transistor de potencia no solamente es capaz de iniciar el flujo de corriente principal (corriente de colector) sino que también, con una pequeña corriente de base, se puede interrumpir dicho flujo.

**d) Triacs.**

Es un semiconductor bidireccional de tres terminales, uno de los cuales es de control, y los restantes son los principales para la conducción. Este elemento puede pasar al estado de conducción en los dos sentidos de polarización.

**e) Diac.**

El Diac es un diodo bidireccional interruptor de c.a. con dos terminales que se utiliza primordialmente como dispositivo de disparo para el triac. Opera como dos diodos en antiparalelo.

**f) Otros dispositivos.**

Otros numerosos equipos que también se utiliza a menudo, son: los transformadores, condensadores, reactancias y sistemas de freno (mecánico).



#### 5.1.4 Tipos de control.

Estos pueden ser:

- Control electromagnético
- Control estático

#### Control Electromagnético.

En el mando a distancia se requieran el uso de contactores electromagnéticos, controlados con pequeñas corrientes mediante pulsadores o relés que reciben órdenes de realizar un trabajo. Tanto las protecciones como los avisos de anomalías o tiempo de funcionamiento de un sistema, se consigue satisfactoriamente con el uso de los relés electromagnéticos.

Al usarse el control electromagnético en un sistema complejo se tiene los siguientes inconvenientes:

- No muy buen comportamiento dinámico durante la maniobra (formación de arcos durante la apertura).
- Tamaño del control considerablemente grande para motores de potencia elevada.
- Mantenimiento (Se necesita personal calificado).

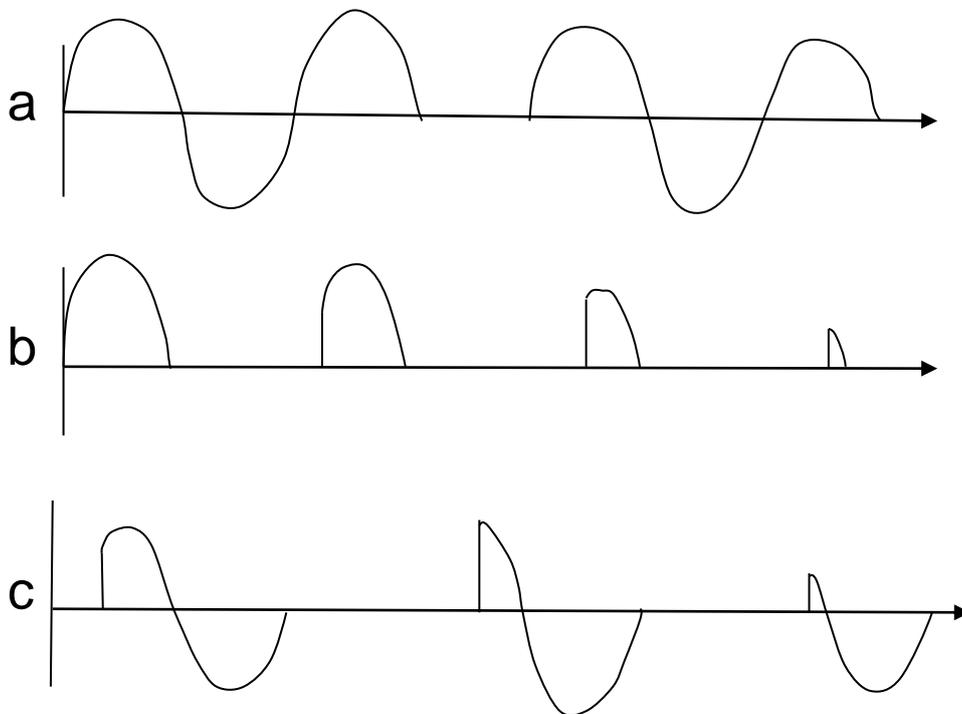
#### Control Estático.

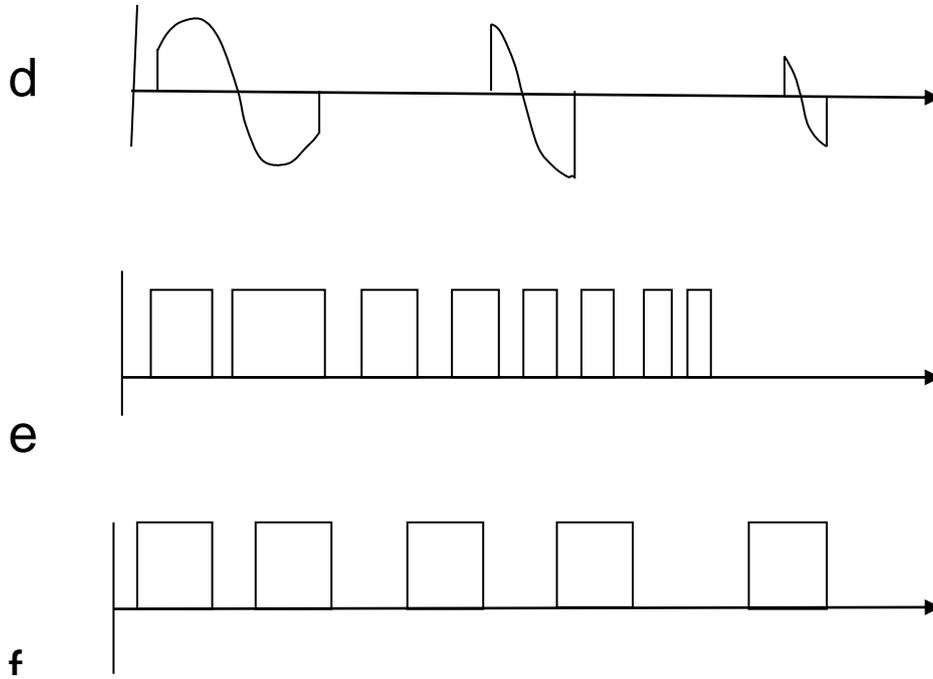
- **Fundamento de los sistemas de control Estático.**

Los semiconductores presentan la ventaja de sustituir a los contactores electromagnéticos para encender o apagar un determinado circuito, éstos pueden utilizarse como reguladores de potencia de acuerdo a los requerimientos de una carga dada.

En la Figura 5.1. se muestran algunos tipos de gobierno, en donde se indica como varía la potencia entregada a la carga., de la siguiente manera:

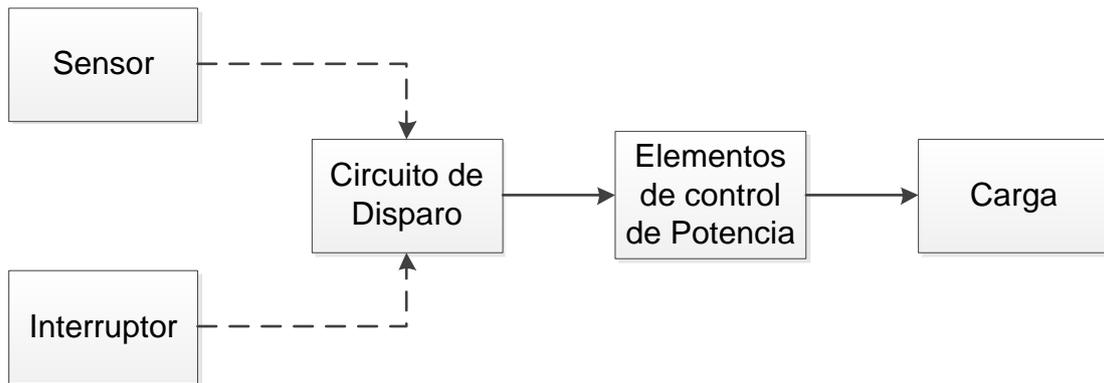
- a) Control de todo o nada, es decir los semiconductores controlados efectúan la misma operación que los interruptores electromecánicos.
- b) Control de media onda con ángulo de fase variable.
- c) Control de onda coleta con ángulo de fase variable en una de las semiondas.
- d) Control de onda completa con ángulo de fase variable en las dos semiondas.
- e) Aplicación de impulsos de frecuencia y ancho variable.
- f) Aplicación de impulsos de frecuencia variable y ancho constante.





**Fig. 5.1 Tipos de gobierno de los semiconductores controlados.**

Los circuitos que utilizan tiristores o triacs como interruptores estáticos suelen adoptar disposiciones similares a las mostradas en la Figura 5.2.



**Fig. 5.2 Diagrama de bloques de un circuito que utiliza tiristores o triacs.**



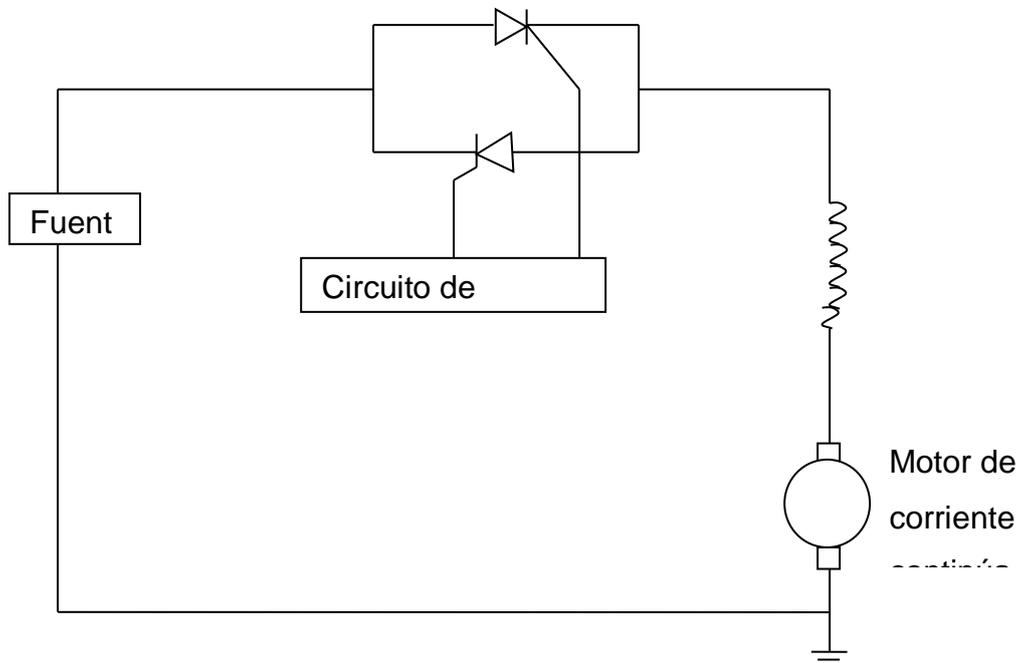
---

En aplicaciones industriales, los circuitos trifásicos de control de potencia con tiristores, deben cumplir los siguientes preceptos:

- 1) Solo dispone de una señal de comando lógico para los circuitos de control. Esta señal debe estar aislada eléctricamente del sistema de potencia trifásica.
- 2) Se requieren señales separadas para el gatillo de los tiristores.
- 3) La carga debe conectarse en una configuración en estrella o en triángulo.
  - Variación de Voltaje por Control de fase.

La variación de potencia entregada a un motor trifásico de inducción, puede lograrse Controlando el voltaje aplicado a sus terminales.

El circuito de la Figura 5.3 Muestra un principio básico, es el caso para un motor monofásico, en donde dos tiristores conectados en antiparalelo son disparados simétricamente en puntos idénticos de sus ciclos de voltaje: ánodo-cátodo.



**Fig. 5.3 Control de un motor monofásico mediante dos tiristores en antiparalelo**

Este circuito es aplicable a cada una de las fases del motor trifásico de inducción y de ésta manera es posible obtener una variación de voltaje en el estator, desde cero hasta el voltaje total de la fuente. El resultado es una onda de tensión senoidal recortada, este método es aplicable satisfactoriamente en motores de hasta 100 HP.

### 5.1.5 CONTROL DE MOTORES SÍNCRONOS.

#### Introducción.

El motor síncrono tiene un bobinado auxiliar que hace apto al motor para arrancar por si mismo y le provee un efecto “amortiguador” eliminando las variaciones de velocidad.



Las características más importantes de éste tipo de motor son:

1. Opera a velocidad constante
2. Su factor de potencia está bajo control del operador.

El factor de potencia depende del valor de la corriente de campo, la que puede ser ajustada.

Para cierta carga particular, una cierta corriente de campo hará trabajar al motor a factor de potencia uno; este valor se denomina excitación normal, una corriente de excitación "menor" que la normal, produce un factor de potencia en adelanto.

### **Torque.**

Los diferentes torque que se producen son:

1. TORQUE DE ARRANQUE  $T_a$ : llamado también a "rotor trabado" es el desarrollado con motor parado, y demuestra la habilidad para arrancar su carga, a cualquiera posición angular del motor.
2. TORQUE DE ACELERACION: es el desarrollado a cualquier velocidad sobre el requerido por la carga aplicada (o sea, exceso de torque disponible).
3. PULL – UP: es el mínimo desarrollado entre descanso (pull-out) y pull-in, o sea el requerido para acelerar el motor y carga antes de pasar a sincronismo.
4. PULL – IN: fijado por el fabricante, es el desarrollado con excitación ( 95 % de la velocidad sincrónica) para que el motor pueda llagar al sincronismo con la carga aplicada, o sea depende de la inercia de la carga

$$WK^2 = \frac{3.75 * 10^5 * HP^{1.5}}{rpm^2} \text{ (carga normal)} \quad (5.1)$$



Y su deslizamiento máximo

$$S_m = \frac{7600}{rpm} \sqrt{\frac{hp}{WK^2} (carga + motor)} \quad (5.2)$$

5. TORQUE SINCRONICO: es el que mantiene al motor en estado estable durante la excitación.
6. PULL-OUT: es el máximo torque sostenido que puede desarrollar el con la excitación correspondiente, a la potencia y factor de potencia nominal, antes de salir se sincronismo en una sobrecarga.

### Arranque.

El control de un motor síncrono ha de efectuar básicamente dos funciones:

1. Arrancarlo como motor jaula de ardilla. Directo o a voltaje reducido.
2. Aplicar la excitación.

Los métodos utilizados para el arranque son los siguientes:

1. Por control de tiempo
2. Por control de frecuencia

### 5.1.6 REGULACIÓN DE VELOCIDAD DE MOTORES DE INDUCCIÓN.

#### Métodos de regulación de velocidad.

Se conoce que el motor de inducción esta en desventaja con respecto al de corriente continua, en cuanto al control de velocidad.

#### Métodos:

##### Para el motor de Jaula de Ardilla.

1. Variando el voltaje impreso en el estator.



2. Cambiando el numero de polos al cual el motor ha sido embobinado.
3. Cambiando la frecuencia de suministro.

#### **Para motores de Rotor Devanado.**

1. Cambiando la resistencia del circuito rotórico.
2. Introduciendo un voltaje extraño dentro del circuito secundario.
3. Operando 2 o más motores en cascada.

#### **Reduciendo el voltaje**

Al reducir el voltaje, aumenta el deslizamiento en relación al cuadrado del voltaje ( $E^2$ ), reduciendo al mismo tiempo al torque, por lo que existe el peligro que el motor se pare bajo carga.

$$T = K * V_p^2$$

Este es el método menos satisfactorio de control de velocidad.

El par desarrollado por un motor de inducción, es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada a sus terminales primarios.

#### **Cambiando en número de polos.**

La velocidad angular sincrónica  $W$  de un motor asincrónico, depende directamente de la frecuencia  $f_1$ , e inversamente del número de pares de polos  $p$  del estator, según la expresión:

$$W_0 = 2 * \pi * \frac{M}{P} \quad \text{red/seg} \quad (5.3)$$

donde se deduce el valor de velocidad de rotación síncrona  $N$ .



$$N_o = 60 * \frac{f_1}{p} \quad \text{r.p.m.} \quad (5.4)$$

Se puede diseñar el devanado estático de un motor de inducción, de forma que puede variarse al número de polos por medio de conmutación manual ó automática. Dichos motores se denominan motores de inducción de velocidad múltiple.

En el caso del motor síncrono polifásico y el motor de inducción de R.D.

La variación polar como método de control de velocidad, presenta las siguientes ventajas:

1. Elevado rendimiento a cualquier ajuste de velocidad.
2. Buena regulación de velocidad para cualquier ajuste de la mínima.
3. Simplicidad de control en la obtención de cualquier velocidad.
4. Sistema relativamente barato y económico.

La variación polar se emplea primordialmente, donde se desee obtener la versatilidad de 2 a 4 velocidades relativamente constantes, que estén ampliamente separadas.

Sus mayores inconvenientes son:

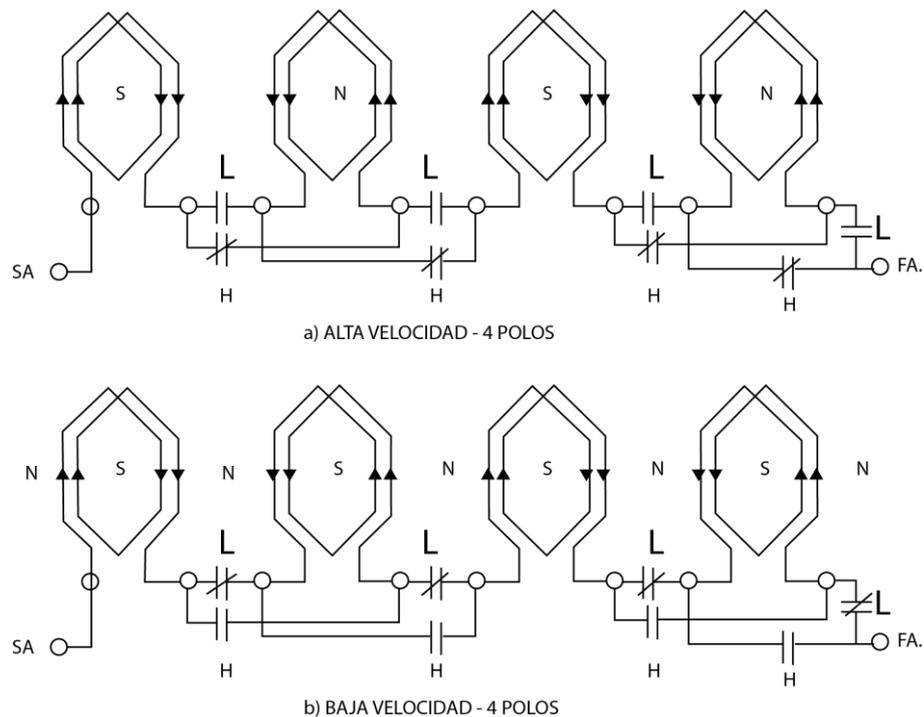
1. Se requiere un motor especial, que posea los devanados necesarios y los terminales llevados hacia el exterior del estator, para intercambio de polos.
2. No puede conseguirse un control gradual y continuo de la velocidad.

Motores de Jaula de Ardilla de dos velocidades, se diseñan con uno o dos devanados.



- a) Las velocidades dobles se obtienen con el diseño de devanado único por medio del método de polos consecuentes mostrado en la Figura 5.4. en este método se consiguen dos velocidades de funcionamiento, mediante el cambio de las conexiones externas de cada fase. Según la Figura 5.4.a. la velocidad superior se obtiene, cuando los sentidos de corriente se invierten de bobina a bobina, de modo que se producen 4 polos SNSN. sea cuando los contactos L están abiertos y los H cerrados. La figura 5.4.b. los sentidos de las corrientes en todas las bobinas son idénticos, produciéndose polos S en los centros de estas bobinas y los polos N, entre los centros de las mismas, en consecuencia, se crean ocho polos mediante este único montaje de conmutación. En el que previamente existían cuatro, obteniendo la baja de la velocidad, con los contactos L cerrados y los H abiertos.

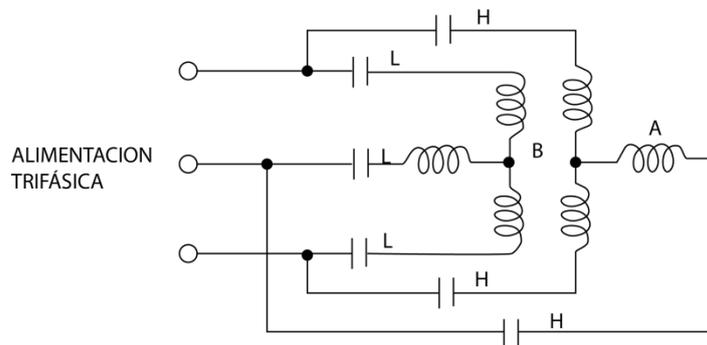
Para motores Jaula de Ardilla trifásicos es necesario conectar las bobinas en todas las cadenas trifásicas, conectadas en triangulo o en estrella. (Los motores trifásicos más grandes, de velocidad múltiple, que tienen muchas bobinas, se conectan en diversos montajes “serie paralelo” para controlar los sentidos de la corriente en las diversas bobinas y obtener de esta forma la polaridad de bobina deseada.)



**Fig. 5.4 Método de polos consecuentes.**

- b) El inconveniente del método de polos consecuentes, en que las velocidades obtenidas están en relación 2:1 y no se pueden conseguir velocidades intermedias mediante los procedimientos de conmutación. Este inconveniente queda superado mediante la utilización de dos devanados, independientes cada cual creando un campo y un número de polos total independiente.

La Figura 5.5 muestra un motor de inducción trifásico de dos devanados, en que un devanado (devanado A) se bobina para un número concreto de polos (digamos 4) y el otro devanado (devanado B) se bobina para un número específico diferente de polos (digamos 6), de esta forma, el devanado A producirá una velocidad elevada de 1800 rpm a 60 HZ, mientras que el devanado B producirá una velocidad baja de 1200 rpm.



**Fig. 5.5 Motores de inducción de velocidad múltiple de dos devanados.**

Aunque el diseño de dos velocidades tiene la ventaja de producción de velocidades que permitan relaciones mas bajas de 2:1, los inconvenientes de dicho motor en comparación al tipo de polos consecuentes son:

1. Mayor tamaño y peso para la mínima potencia de salida.
2. Costo más elevado debido al mayor tamaño de la carga.
3. Mayor reactancia de dispersión porque las ranuras necesarias para los dos devanados son más profundas.
4. Regulación más pobre de la velocidad, debido a la mayor reactancia de cada devanado.

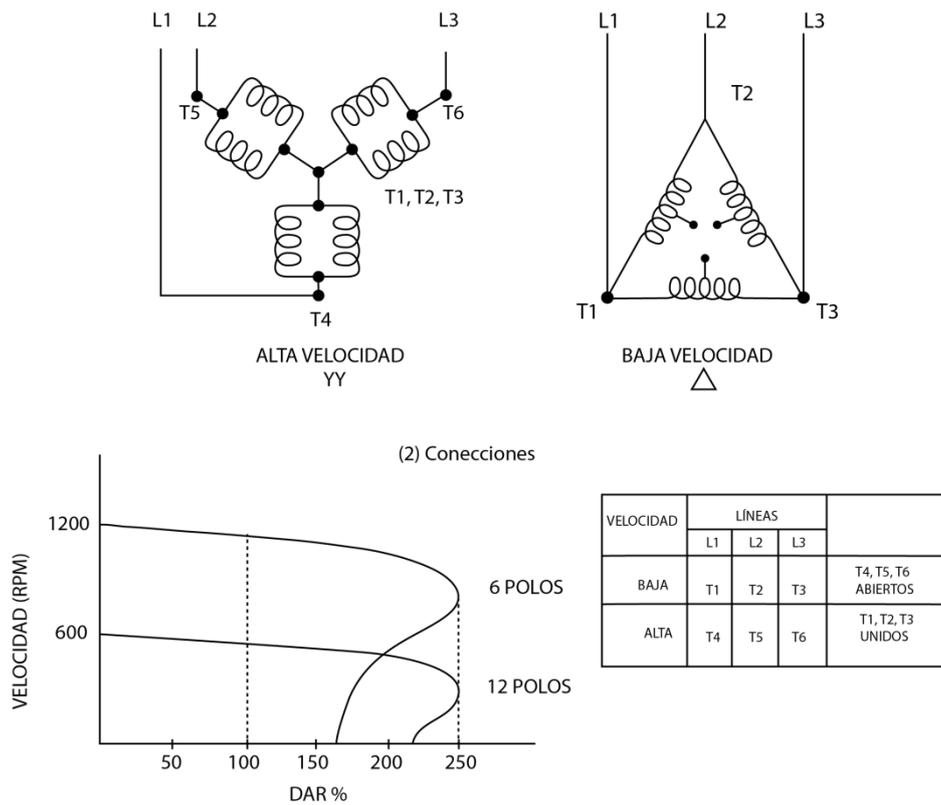
Además, tales devanados deben conectarse en estrella para evitar que el devanado excitado induzca una tensión y una corriente circulante en el devanado que no se utiliza.

### **Características de los motores de velocidad múltiple.**

En las siguientes figuras, se presentan tres distintas conexiones posibles y sus características par-velocidad correspondiente a tres motores idénticos.

#### **TORQUE CONSTANTE**

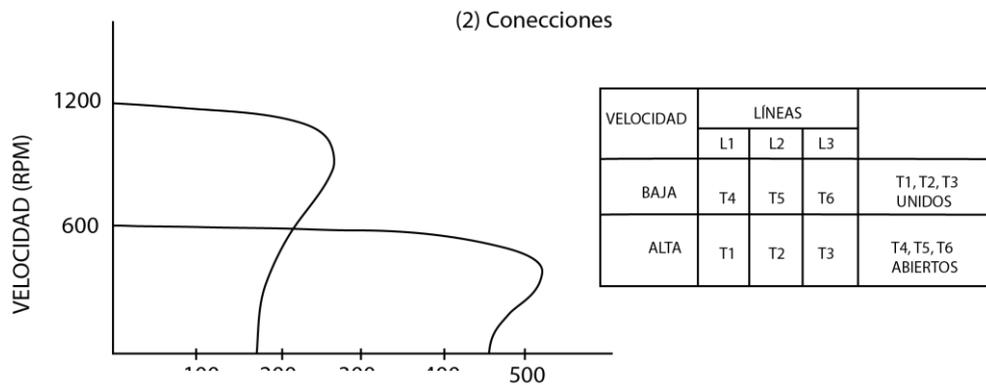
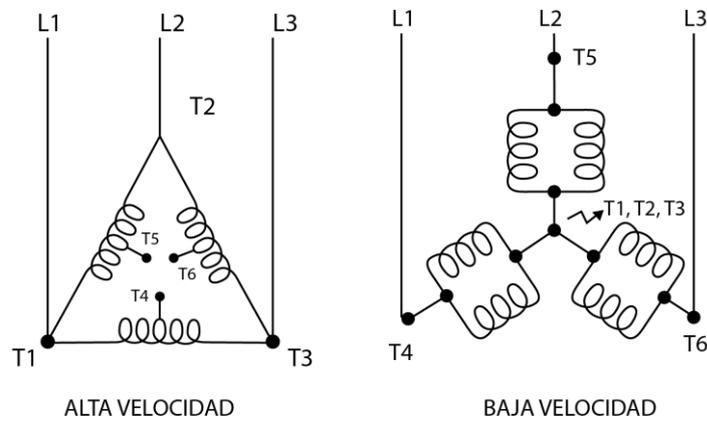
A) En la Figura 5.6.a se representa las conexiones; y en la figura 8.10.4.b sus correspondientes curvas características para torque o par constante. Se obtiene aproximadamente el mismo par máximo en las dos velocidades, aplicándose en aquellos accionamientos que requieren el mismo par en cualquiera de ellas. La velocidad y la potencia son directamente proporcionales.



**Fig. 5.6 Torque constante.**

**POTENCIA CONSTANTE**

B) Se duplica el par máximo para velocidad reducida siendo de aplicación para el accionamiento de cargas que requieren potencia constante.



(b) CARACTERÍSTICAS PAR - VELOCIDAD

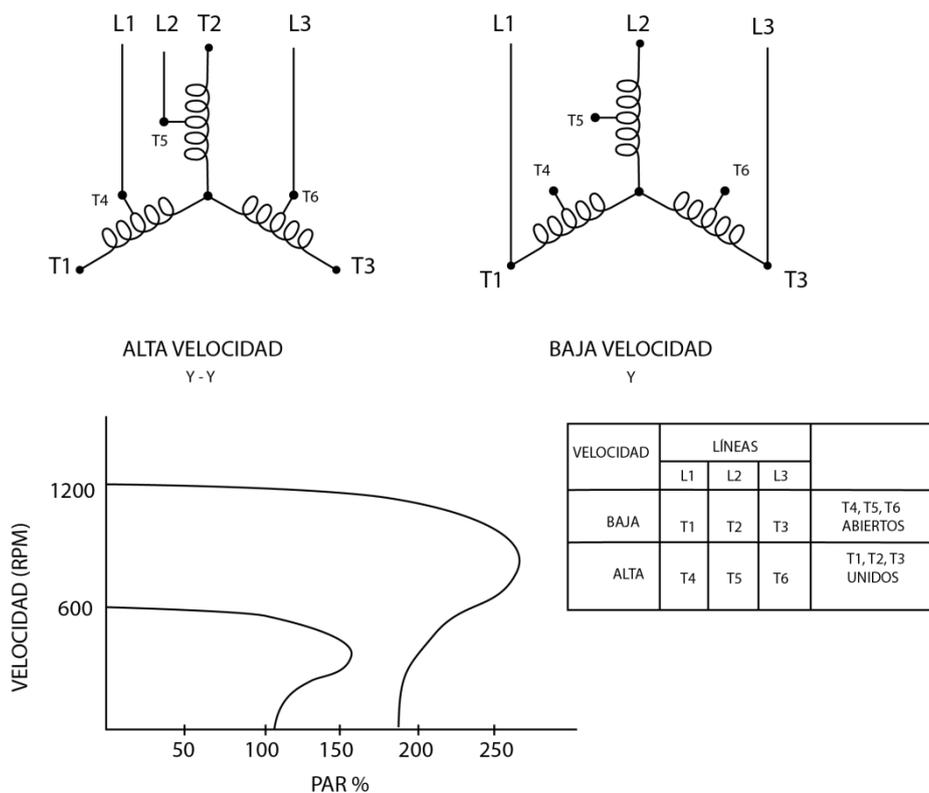
**Fig. 5.7 Potencia constante.**

C) Par variable

Desciende considerablemente el par máximo a velocidad reducida, aplicándose al accionamiento de carga que a menor velocidad requieran menor par. En este tipo de par variable, la potencia varía con la velocidad al cuadrado.

HP varía con  $(RPM)^2$

Ejemplo: 1800/900 rpm, corresponda a 40/10 HP



(b) CARACTERÍSTICAS PAR - VELOCIDAD

**Fig. 5.8 Par variable**

## 5.2 Protecciones

### 5.2.1 Relés térmicos y diferenciales.

#### Relés de sobrecorriente:

Se diferencian dos tipos de sobrecorrientes: las ocasionadas por cortocircuitos y las que se producen por sobrecargas se puede establecer que los valores de corriente de cortocircuito superan 10 veces el valor de la corriente nominal, mientras que las sobrecargas están comprendidas entre 1 a 3 veces.



---

Un motor se calienta debido a las pérdidas en el cobre y pérdidas en el hierro proporcionales a  $I^2$  y a la frecuencia respectivamente. Los motores se construyen de modo que sus bobinas con corriente nominal resistan calentamientos normales (50°C, 60°C, 75°C, 90°C). Son valores estándar de acuerdo a la clase de aislamiento del motor. Por cada 10°C de aumento de temperatura, la vida útil del motor se reduce a la mitad.

Las razones por las cuales un motor puede sobrepasar su límite térmico pueden ser las siguientes:

- 1) Sobrecarga mecánica actuando sobre el eje del motor (cargas anormales y de alta inercia).
- 2) Baja tensión de alimentación que obliga al motor de inducción a aumentar la corriente para mantener el torque constante.
- 3) Carga mecánica excesiva en el arranque que obliga al motor a acelerar lentamente y por consiguiente absorber altas corrientes por más tiempo que el normal.

Un motor de inducción en el arranque absorbe aproximadamente de 5 a 8 veces el valor de corriente nominal.

- 4) Cuando un motor trifásico no arranca por falta de una fase o bien cuando está girando se origina una sobrecorriente en las otras fases del motor.



---

5) Si existe un desbalanceamiento de tensión, se produce desbalanceamiento de corriente. Por ejemplo un desbalanceamiento del 2% de la tensión produce un desbalance de corriente de hasta un 20%.

7) Incremento en la frecuencia.

8) Alta temperatura ambiente.

### **Protección de sobrecargas**

Para obtener una protección ideal contra las sobrecargas, será necesario que la curva de calentamiento del relé de protección sea una imagen exacta de la curva de calentamiento del motor.

Aunque se emplean muchos tipos de relés de sobrecarga, todos ellos pueden incluirse en tres grandes grupos:

1. Relés térmicos de sobrecarga o electromagnéticos, que accionan un contacto de apertura cuando la corriente de la línea, pasa por un elemento sensible a la temperatura, tal como un bimetalo o una aleación de bajo punto de fusión. Estos relés responden más rápidamente a las corrientes más elevadas y viceversa.

2. Relés de Sobrecorriente, que accionan un contacto de apertura al pasar la corriente por una bobina. Este tipo de relé actúa instantáneamente cuando la sobrecarga alcanza un valor.

3. Combinación de un relé térmico y de un relé electromagnético, se obtiene el



---

relé magneto térmico de sobrecarga, que combina las ventajas del relé térmico de tiempo inverso para sobrecargas relativamente débiles de larga duración, y el relé electromagnético de disparo instantáneo, para sobrecargas elevadas, en las que la protección del relé térmico resultaría demasiado lenta.

#### 5.2.1.1 Relés térmicos

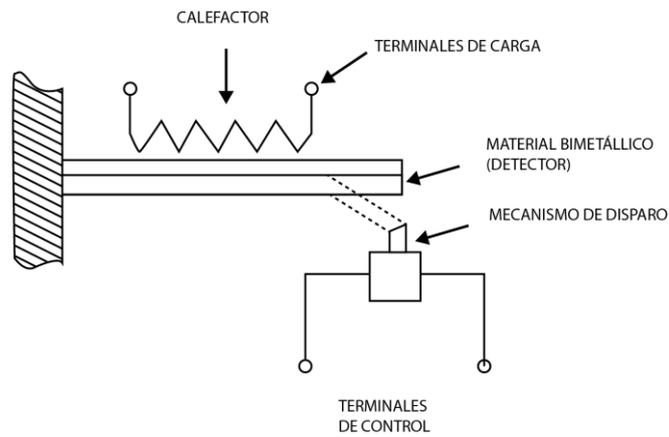
**a) Relés térmicos bimetálicos:** debido a su bajo costo, son los más utilizados. Están constituidos por un elemento calefactor, un detector de temperatura y un mecanismo de disparo.

El elemento detector es un bimetálico, que posee una lámina 80% de níquel y 20% de hierro y la otra lámina es de 25% de níquel y 75% de hierro. Estas láminas van soldadas en sus extremos y al calentarse experimentan una curvatura debido al diferente coeficiente de dilatación. Esta curvatura se aprovecha para accionar un contacto que actúa sobre un circuito de control.

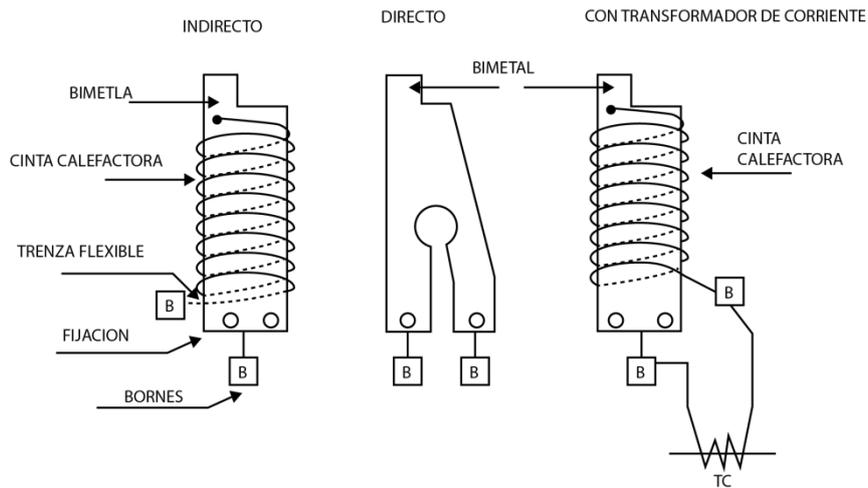
El calentamiento del bimetálico puede ser:

**Directo.**- cuando la corriente a proteger circula por el bimetálico.

**Indirecto.**- cuando se usa una resistencia arrolladora sobre el bimetálico y la corriente circula por ella. Cuando las corrientes a proteger son muy grandes se usan transformadores de corriente (figura 4.2).



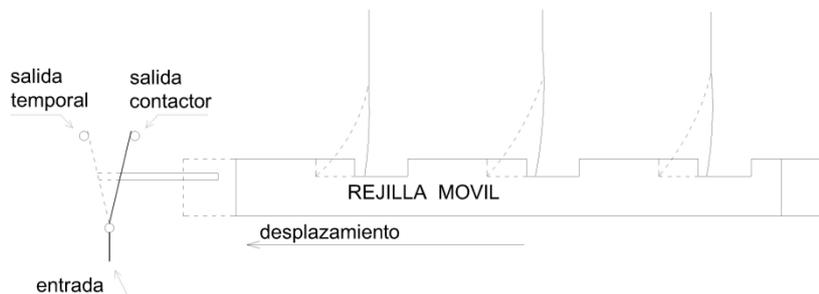
**Fig. 5.9 Relé térmico bimetalico.**



**Fig. 5.10 Tipos de calentamiento de bimetal.**

La estabilización del bimetal es directamente proporcional al cuadrado de la corriente más el calentamiento por temperatura ambiente que rodee al relé.

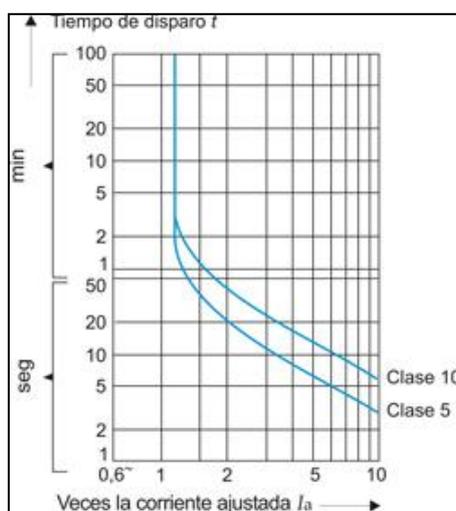
En la Figura 5.11 se puede observar esquemáticamente la constitución de un relé de fabricación europea.



**Fig. 5.11 Relé bimetalico europeo.**

Se puede observar en este grafico que cuando lo bimetales se calientan, la regleta móvil se estabiliza en una posición proporcional a la corriente absorbida por el motor.

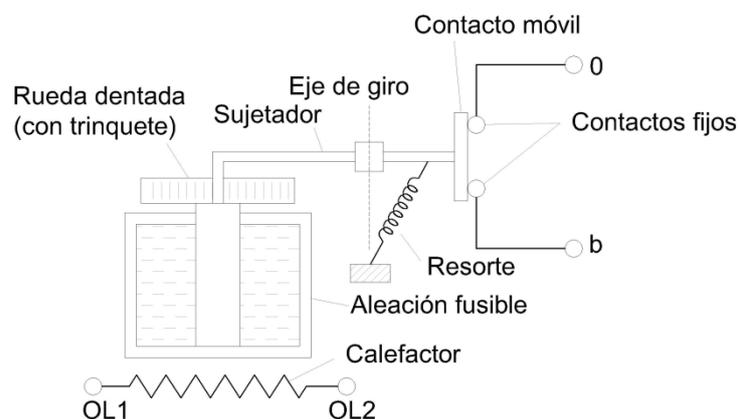
Cuando esta corriente aumenta, la regleta se desplaza siguiendo una variación que es función del tiempo lo cual permite que el motor trabaje con cualquier sobrecarga pero siempre que este dentro del tiempo de calentamiento que necesita el bimetálico. La Figura 5.12 muestra unas curvas típicas de calentamiento.



**Fig. 5.12 Curvas características del relé térmico bimetálico.**

**b) Relés térmicos de aleación fusible:** Un relé térmico, proyectado para el reenganche manual (Figura 5.13) es el relé térmico de aleación fusible. Como se observa en el esquema, se conecta un calefactor eléctrico de alta potencia en el circuito de carga. Bajo condiciones de sobrecarga, el calor es suficiente para fundir la aleación fusible a baja temperatura y hacer que el muelle arrastre al cierre y haga girar el contacto móvil fuera de los contactos fijos. Este es un relé muy práctico y popular por las siguientes razones:

1. El dispositivo de retorno del relé necesita que se enfríe la aleación y por tanto un determinado periodo de espera antes de que el motor pueda ser reconectado.
2. El relé debe ser reconectado a mano por lo que advierte al operario que se ha producido una sobrecarga.



**Fig. 5.13 Relé de sobrecarga térmico de aleación fusible**



---

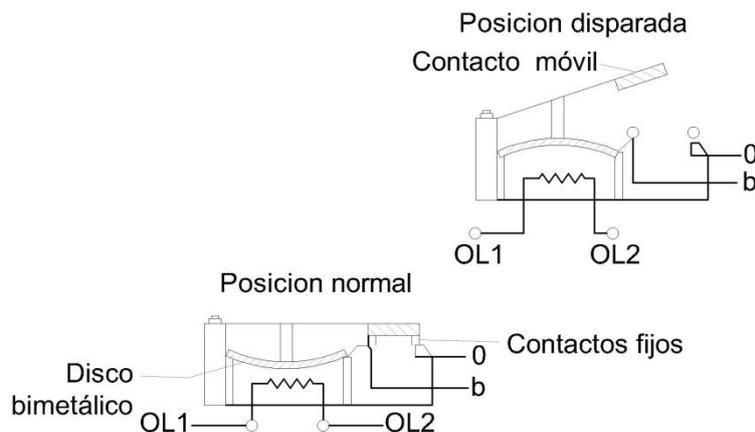
3. El relé tendrá un buen funcionamiento tanto en corriente continua como en alterna, ya que produce el mismo efecto térmico.

4. El relé trabaja independientemente de la acción de la gravedad tanto en posición vertical como horizontal y se vence cualquier rozamiento con el uso de un adecuado resorte de cierre cuya acción es independiente de la gravedad o de la corriente.

5. La precisión y seguridad en el funcionamiento del relé es bastante elevada ya que es función del punto de fusión relativamente constante de la aleación.

6. El relé posee las características térmicas de tiempo inverso que se precisan para la protección de todo tipo de motores es decir ya que el efecto térmico varía con el cuadrado de corriente, una fuerte sobrecarga hará que el relé funcione en un tiempo más breve.

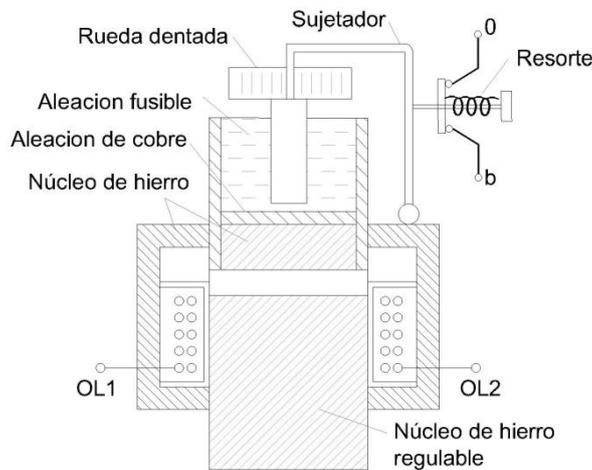
**c) Relés térmicos bimetálicos (tipo disco):** Consiste en una tira rectangular bimetálica se curva debido a la dilatación de los dos metales. Este tipo de desviación es lento, por lo que podría quemar los contactos al interrumpir una corriente elevada del circuito de un motor. El dispositivo mostrado en la figura 4.6 emplea un disco circular bimetálico cuya cara superior tiene un elevado coeficiente de dilatación. A causa del calor, las fuerzas desarrolladas en el disco, debidas a la distinta dilatación, son tales que el disco debe invertir su convexidad con rapidez en vez de gradualmente.



**Fig. 5.14 Relé de sobrecarga térmico bimetalico tipo disco.**

El disparo de acción rápida que aparece en el instante de la inversión tiene fuerza suficiente para abrir los contactos fijos a y b tal como se muestra en la Figura 5.14. El tiempo de desplazamiento del relé bimetalico de máxima es inversamente proporcional a la magnitud de la corriente de sobrecarga sostenida. De la misma manera que los relés de fusión térmica y acción retardada, permite sobrecargas de breve duración sin desconectar el motor.

**d) Relé de sobrecarga térmico-inductivo de aleación fusible:** Para un servicio determinado del motor, a veces se desea un ajuste un poco más elevado del valor nominal de la sobrecarga durante una marcha determinada o un funcionamiento particular. Un dispositivo que lo permite es el relé inductivo de aleación fusible (el denominado inductotérmico) mostrado en la Figura 5.15.



**Fig. 5.15 Relé inductivo térmico de aleación fusible.**

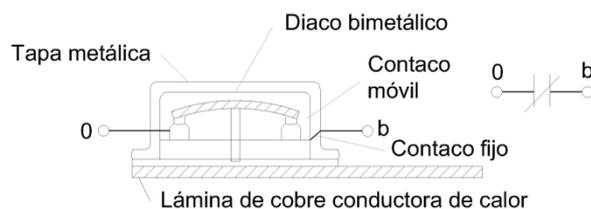
Este relé se acciona según el principio de la inducción de corrientes de Foucault, en un cilindro de aleación de cobre y en la aleación fusible a baja temperatura que está en el interior del mismo, el relé por tanto solo funciona en corriente alterna, como el calor producido en la aleación fusible es proporcional a la densidad de flujo creada por la corriente en la bobina de inducción, se produce una característica exponencial de tiempo inverso debido a las pérdidas por corrientes de Foucault.

Cuando se ajusta a un entrehierro mayor para una carga determinada, se produce un efecto térmico menor debido a la reducción de la densidad de flujo. Este relé tiene dos ventajas principales:

1. Para una bobina de una determinada capacidad de corriente, el ajuste de disparo de máxima es regulable sin limitación.
2. En unión con transformadores de corriente, el mismo relé de máxima puede ser utilizado para una amplia gama de motores de corriente alterna.

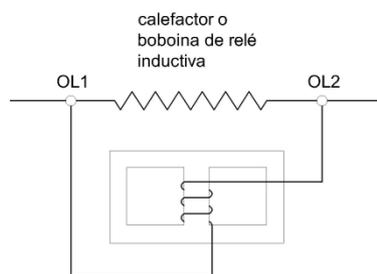
**e) Dispositivos térmicos auxiliares:**

1. El principio bimetalico se utiliza también en un dispositivo denominado termostático o disco térmico, que se muestra en la Figura 5.16.. Los contactos del disco están normalmente cerrados a la temperatura ambiente usual, y el aparato puede remacharse o soldarse al bastidor o soporte de un motor. En el caso de un incremento de la temperatura ambiente a causa de una ventilación deficiente, de una tensión de línea excesiva de sobrecargas frecuentes o sostenidas, de cojinetes defectuosos, de falta de lubricación o de arranques demasiado frecuentes, el consecuente calor desarrollado es conducido al disco y abre los contactos normalmente cerrados a y b conectados al circuito. Este dispositivo, por tanto, funciona como consecuencia del calor efectivo del motor originado en la superficie del mismo en vez del producido por la corriente de carga.



**Fig. 5.16 Disco bimetalico termostático.**

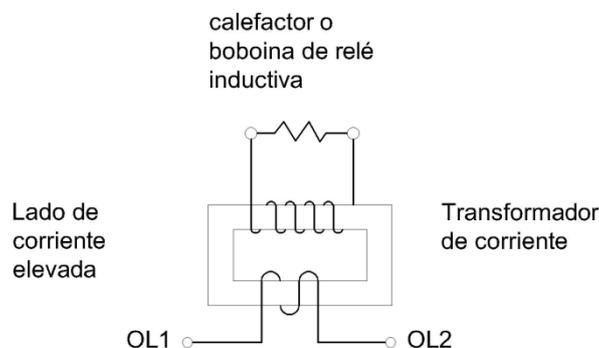
2. La gama de ajuste de relés de tipo inductivo utilizados en motores de corriente alterna. Puede ampliarse por medio de dispositivos de saturación del núcleo de hierro. El Shunt inductivo de saturación, mostrado en la Figura 5.16, proporciona una limitada ampliación de la gama de ajuste mediante incremento del tiempo de disparo de un relé térmico de máxima durante un periodo de arranque o frenado o en cualquier otro periodo de corriente transitorio.



**Fig. 5.17 Shunt inductivo de saturación.**

3. Un transformador de corriente saturable, también puede ser utilizado de la misma manera que un Shunt inductivo. Como se observa en la Figura 5.18. cuando la corriente del primario por  $OL_1 - OL_2$  es pequeña, el transformador no está saturado y el calefactor recibe toda la corriente. Por otra parte durante la corriente anormal transitoria la corriente del primario es elevada saturando el transformador y disminuyendo la relación de transformación. Esto significa que un incremento de la corriente transitoria de sobrecarga no produce un incremento proporcional en el calefactor o relé de corriente. Por tanto el transformador de corriente de saturación también protege al calefactor contra corrientes anormales transitorias.

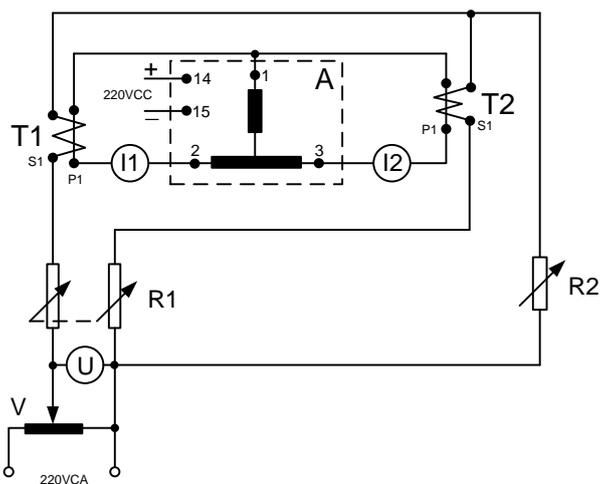
Al mismo tiempo el transformador de corriente puede utilizarse para aumentar la gama de ajuste (en más o en menos) de un relé térmico de corriente alterna.



**Fig. 5.18 Transformador de corriente de saturación.**

**5.2.1.2. Relés diferenciales:**

Una pequeña variación en la constitución del elemento de accionamiento puede hacer que un relé térmico bimetalico se comporte como un relé térmico diferencial. Este tipo de protección se hace necesario para evitar que un motor trifásico se queme debido a que está funcionando solo con dos fases a pesar de tener protección térmica normal.



**Fig. 5.19 Conexión de un relé diferencial.**

**Marco teórico**

**Definición de relé diferencial**

Un relé diferencial es un dispositivo que funciona cuando el vector diferencia de dos o más magnitudes eléctricas similares, excede una cantidad predeterminada.

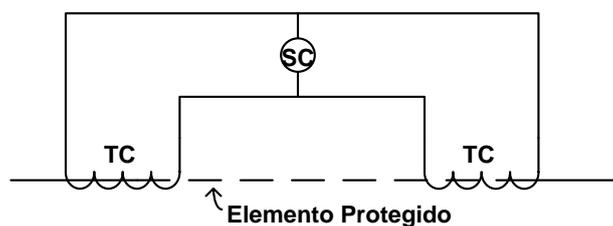
No es la construcción del relé sino la forma en que se lo conecta en un circuito lo que lo hace un relé diferencial.

La mayoría de las aplicaciones del relé diferencial son del tipo diferencial de corriente.

Se emplean en la protección de generadores, barras y transformadores.

### Funcionamiento

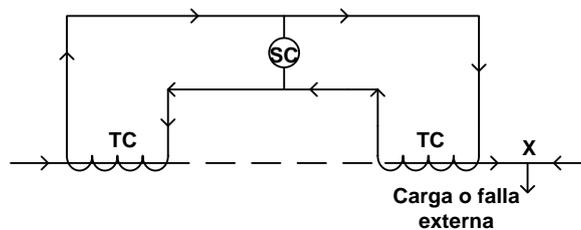
La Figura 5.20 muestra la conexión de un relé diferencial. La parte punteada del circuito representa el elemento protegido del sistema. En el circuito observamos que los Transformadores de Corriente (TC) se interconectan y la bobina de un relé de sobrecorriente se conecta a través del circuito secundario de los TC.



**Fig. 5.20 Conexión de un relé diferencial**

El relé diferencial actúa para todas las fallas internas del sistema pero no actúa para ninguna falla externa

### Falla externa

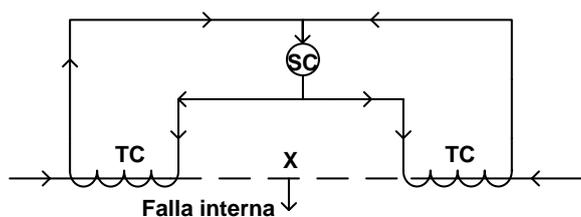


**Fig. 5.21** Falla externa

En la Figura 5.21 la corriente fluye por el circuito primario ya sea a una carga o a un cortocircuito localizado en X. Si los dos transformadores de corriente tienen la misma relación de transformación y están conectados adecuadamente, sus corrientes secundarias circularán casi entre los dos TC como se muestra por las flechas, y no fluirá corriente por el relé diferencial, consecuentemente no actuara el relé.

### Falla interna

Si se desarrolla un cortocircuito en cualquier parte entre los dos TC, las corrientes circularan ahora como se muestra en la siguiente figura. La corriente fluye hacia el cortocircuito de ambos lados, la suma de las corrientes secundarias de los TC fluirán por el relé diferencial.

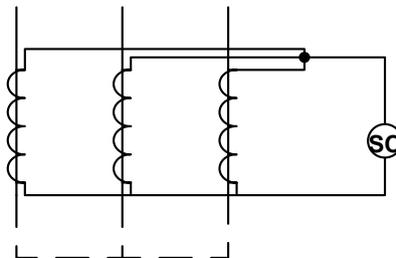


**Fig. 5.22 Falla interna**

No es necesario que la corriente de cortocircuito fluya hacia la falla de ambos lados para originar que la corriente secundaria fluya por el relé diferencial. La corriente del relé diferencial será proporcional al vector diferencia entre las corrientes que entran y salen del circuito protegido; y, si la corriente diferencial excede el valor de puesta en trabajo del relé, éste funcionará.

Se puede extender el principio a un elemento de sistema que tiene diversas conexiones. Sólo es necesario que:

- Todos los TC tengan la misma relación de transformación.
- Estén conectados de tal manera que el relé no reciba corriente cuando la corriente total que sale del elemento de circuito es igual vectorialmente a la corriente total que entra en el elemento de circuito.



**Fig. 5.23 Sistema con diversas conexiones**

También puede ser aplicado donde se incluya un transformador de potencia; pero, en este caso:

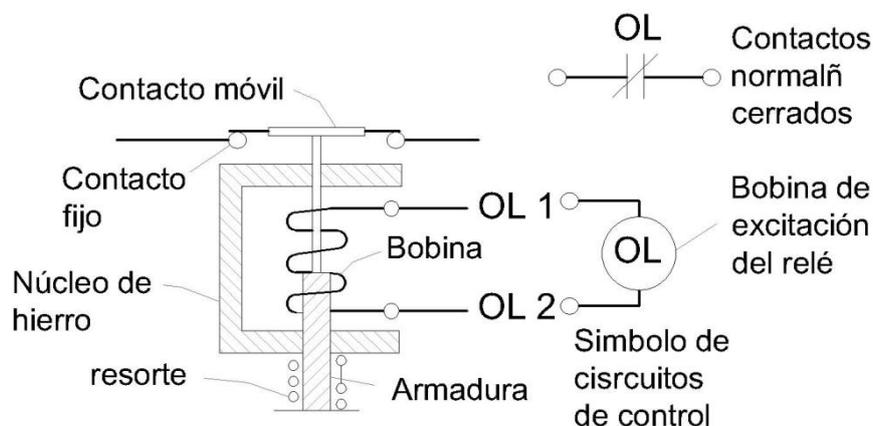
- Las relaciones de transformación.

- Las conexiones de los TC en los lados opuestos del transformador de potencia.

Deben ser tales como para compensar el cambio de la magnitud y el ángulo de fase entre las corrientes del transformador de potencia en cualquier lado.

### 5.2.2 Relés electromagnéticos:

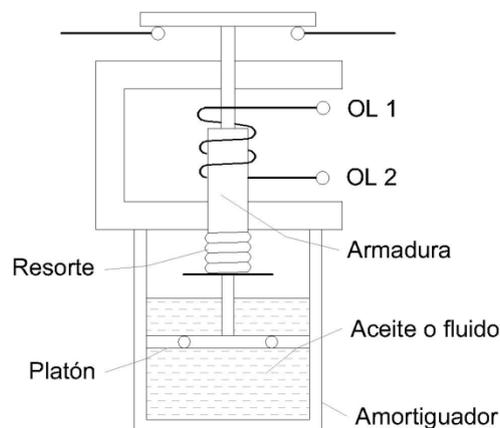
**a) Relés de sobrecarga magnético de acción instantánea:** Este tipo de relé puede ser utilizado en circuitos de corriente continua y con una modificación auxiliar, en circuitos de corriente alterna (por la inclusión de un circuito magnético fijo de cobre o de latón rodeando la armadura) como se observa en la Figura 5.24. los contactos fijos están normalmente cerrados cuando el relé magnético de sobrecarga esta desexcitado, con la corriente nominal o algo inferior, la presión del resorte es suficiente para impedir el movimiento de la armadura. Cuando la corriente alcanza o excede una sobrecarga particular se crea la fuerza magnetomotriz suficiente para crear el movimiento de la armadura y la apertura de los contactos normalmente cerrados.



**Fig. 5.24 Relé de sobrecarga magnético de disparo instantáneo**

El funcionamiento instantáneo se persigue generalmente en aquellas aplicaciones en las que las sobrecargas indican unas condiciones de trabajo que requieren la desconexión súbita del motor. Las bobinas del relé magnético de máxima son generalmente gruesos conductores de cobre de unas cuantas vueltas y baja inductancia, conectadas en serie con la armadura del motor de c.c o en serie con el estator de un motor de c.a. la baja inductancia permanece constante en un tiempo breve ( $\tau$  es proporcional a  $L/R$ ) y el funcionamiento del relé es instantáneo cuando la corriente crece rápidamente a causa de la sobrecarga.

**b) Relés magnéticos de acción retardada:** la Figura 5.25 muestra el mismo relé con la adición de un amortiguador para retardar el movimiento de la armadura. El amortiguador contiene aceite o un fluido especial de viscosidad adecuada para producir el retardo necesario. Existe un pistón con varios agujeros unido a la armadura por los cuales pasa el fluido.



**Fig. 5.25 Relé de sobrecarga magnético de acción retardada.**



La ventaja del relé magnético de acción retardada, difiere del tipo instantáneo, en que las sobrecargas súbitas o momentáneas no son insuficientes para ocasionar la desconexión del motor. Sin embargo, si la sobrecarga continúa durante un período dado, el pistón se levanta lentamente, debido a la acción del líquido, para desplazar los contactos cerrados.

En los tipos de relés tanto de retardo como instantáneo, se observará que desplazando los contactos normalmente cerrados se desexcita simultáneamente al motor y a la bobina del relé. Esto permite que el propio relé se reconecte automáticamente e instantáneamente a causa de la tensión del resorte y a la acción de la gravedad. Sin embargo, estos relés se pueden modificar por medio de enclaves mecánicos para sujetar y retener la armadura. Un botón disparador (reset o de reconexión) permite que la armadura vuelva a su posición de trabajo antes de que el motor sea puesto en marcha de nuevo.

### c) Curvas de disparo:

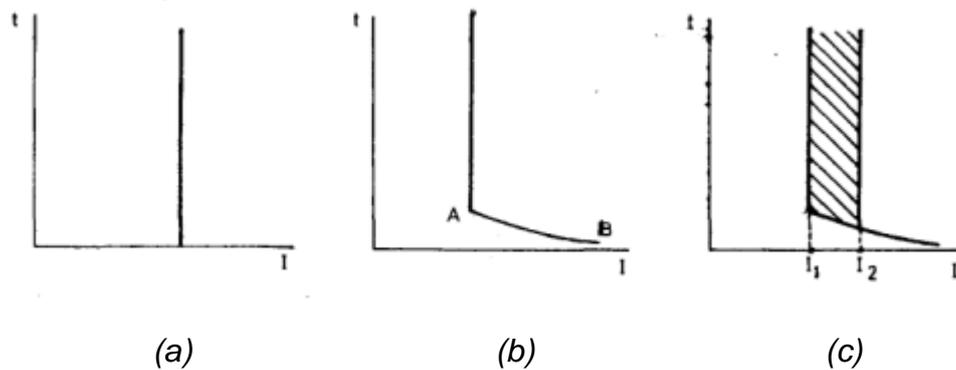
El disparo instantáneo no es posible, por dos razones principales:

- a. La inercia propia del sistema mecánico de resortes y palancas.
- b. La bobina constituye un circuito inductivo y, ni el flujo magnético ni la corriente pueden anularse de forma instantánea.

La relación para el tiempo de retardo es:

$$t = K * \frac{I_d}{I_e} = \frac{\text{corriente de efecto}}{\text{corriente necesaria}}$$

En este caso tienen las siguientes curvas de actuación en función en de la corriente:



**Fig. 5.26 Curvas de tiempos de disparo en función de la corriente**

- a) Curva teórica
- b) La curva práctica de tiempo de disparo; el tramo A-B marca el tiempo de disparo.
- c) La curva práctica con límites de disparo; en la zona situada a la izquierda de la curva, corresponde a las corrientes menores que  $I_1$  entonces no se produce el disparo por largo que sea el tiempo de sobrecarga; la zona rayada corresponde al margen de disparo, no es seguro que el relé dispare. Finalmente, en la zona situada a la derecha de  $I_2$ , el relé dispara con toda seguridad y en un tiempo prácticamente instantáneo, las corrientes  $I_1$  e  $I_2$  fijan los límites del margen de disparo.

### 5.2.3 Relés estáticos de protección.

**Introducción:** de acuerdo al avance de la electrónica se han desarrollado, a más de los relés electromagnéticos otros que se basan en el funcionamiento de



dispositivos electrónicos dentro de los cuales se pueden mencionar los siguientes:

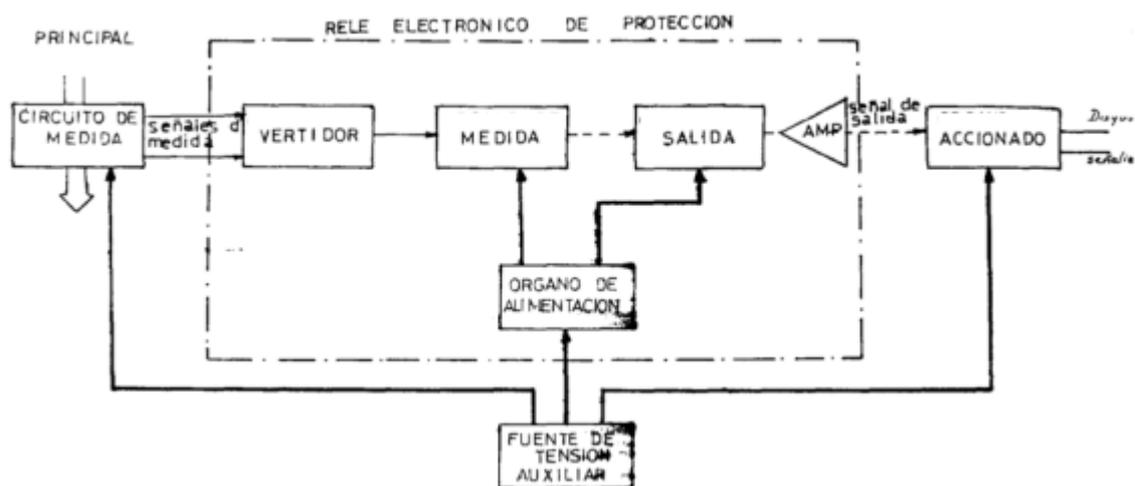
1. **Relés con tubos electrónicos:** si bien da buenos resultados, se presenta el inconveniente del tiempo que requiere para su calentamiento previo, y su vida útil es demasiado corta.
2. **Relés con rectificadores:** en este campo se ha introducido ya los semiconductores presentando resultados más eficientes que el método anterior.
3. **Relés con transductores:** presentan la ventaja de una separación eléctrica entre el circuito de mando y el circuito de salida; son robustos y de larga duración.
4. **Relés de efecto Hall:** se basan en el efecto de semiconductores que desarrollan una sección transversal en presencia de campos magnéticos. Su inconveniente es que tienen un precio muy elevado.
5. **Relés de efecto Gauss:** utilizan semiconductores que modifican su resistencia en presencia de un campo magnético, son de uso limitado por su elevado costo.
6. **Relés con transistores:** son enteramente estáticos, están constituidos por elementos transistorizados, son muy utilizados y tienden a desplazar el uso de relés electromecánicos clásicos de protección.

**5.2.3.1 Ventajas de los relés estáticos transistorizados:** las exigencias que deben satisfacer los relés de protección son:

- a) Seguridad de funcionamiento (fiabilidad).
- b) Sensibilidad.
- c) Rapidez de respuesta (menores a 1/2 ciclo)
- d) Selectividad. (desconectar únicamente la parte afectada)

**5.2.3.2 Fundamentos:** Se basa en el principio de convertidores analógicos-binarios, con función de medida. Las magnitudes eléctricas de medida que deben censar y los valores que resultan por diferenciación ó integración, u otra operación matemática aparecen en la entrada del bloque de medida bajo la forma de señales analógicas a la salida de este órgano aparece siempre una señal binaria que puede ser 0 si el relé no desconecta, o 1 si se desconecta.

Como se aprecia en la Figura 5.27 cada relé está constituido por bloques individuales.



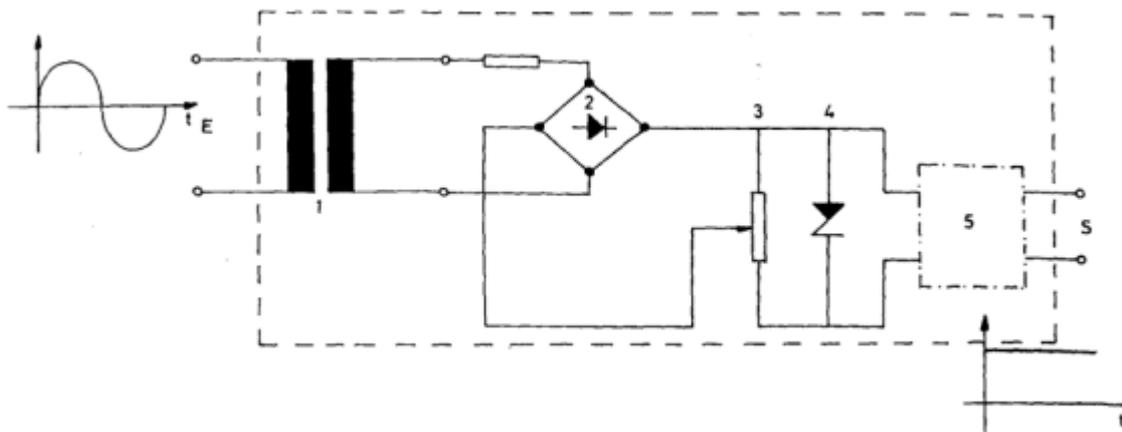
**Fig. 5.27 Esquema funcional del principio de un relé electrónico de protección**

Las señales de medida se toman de forma analógica es decir progresivamente variables que proceden del circuito de medida (transformadores de corriente o tensión) estas señales entran en un bloque de conversión de tal manera que su medida sea fácilmente transformada. El bloque de medida conmuta su señal de entrada (analógica) a partir de cierto valor y suministra en su salida una señal binaria que puede ser 1 ó 0. En el bloque de salida ésta señal binaria se

amplifica y transmite a una o más órganos de comando. Estos efectúan las operaciones de acoplamiento tales como apertura de disyuntores, entrada en acción de un dispositivo de señalización etc.

Existe también un bloque de alimentación que proporciona la potencia necesaria a los elementos de medida y salida, recibe esta potencia unas veces del circuito de medida, otras veces de una fuente auxiliar de tensión.

**Elemento de conversión:** comprende principalmente un transformador de adaptación. De esta forma se obtiene además de la conversión a un nivel apropiado de tensión o de corriente, una separación eléctrica de todos los circuitos posteriores, con relación a los transformadores de medida. Además estos transformadores de medida actúan como una protección contra la sobrecarga de los circuitos posteriores gracias a su efecto de saturación. La protección fina queda asegurada por diodos ordinarios, diodos Zener, etc.

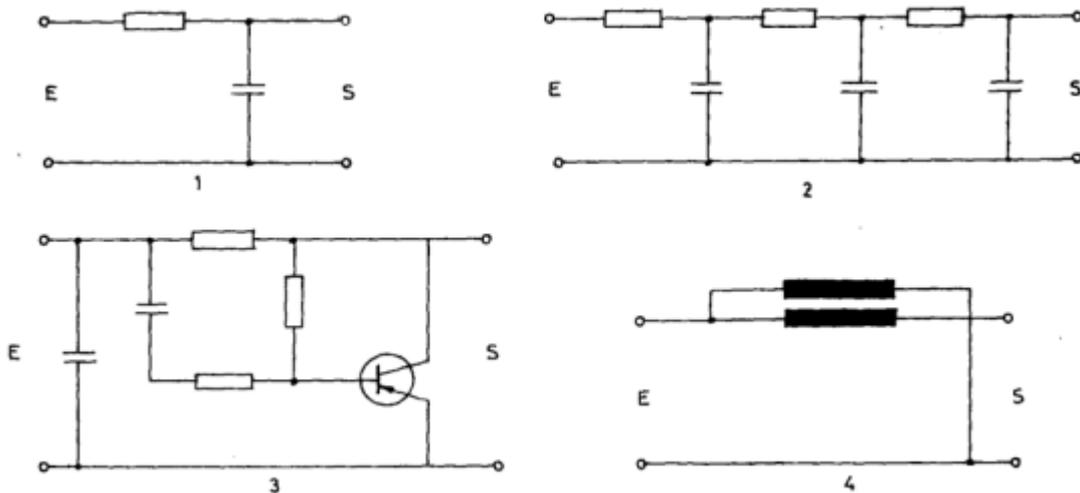


**Fig. 5.28 Elemento de conversión de un relé electrónico de una magnitud.**

1. Transformador adaptador

2. Puente de diodos.
3. Potenciómetro de ajusten
4. Diodo Zener.
5. Filtro, e. entrada.- s. salida.

A continuación se presentan algunos ejemplos de filtros para la alimentación de tensión:



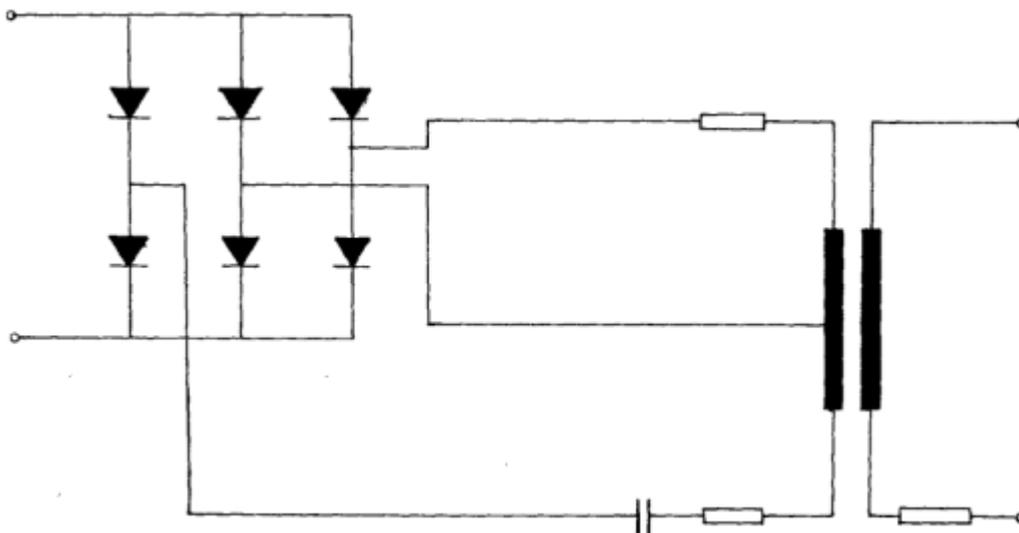
**Fig. 5.29 Filtros para la alimentación de tensión.**

- 1) Filtro simple. RC.
- 2) Cadena de filtros RC.
- 3) Filtro de transistor
- 4) Filtro de transformador. e entrada - s sal ida.

En el esquema 3, la resistencia transversal varía proporcionalmente a la componente de tensión alterna.

En el esquema 4, se compensa totalmente la componente alterna por tensión inversa.

Además se emplean montajes separadores que transforman un sistema monofásico en sistema trifásico, reduciendo el contenido de armónicos después del alisamiento (Figura 5.30).

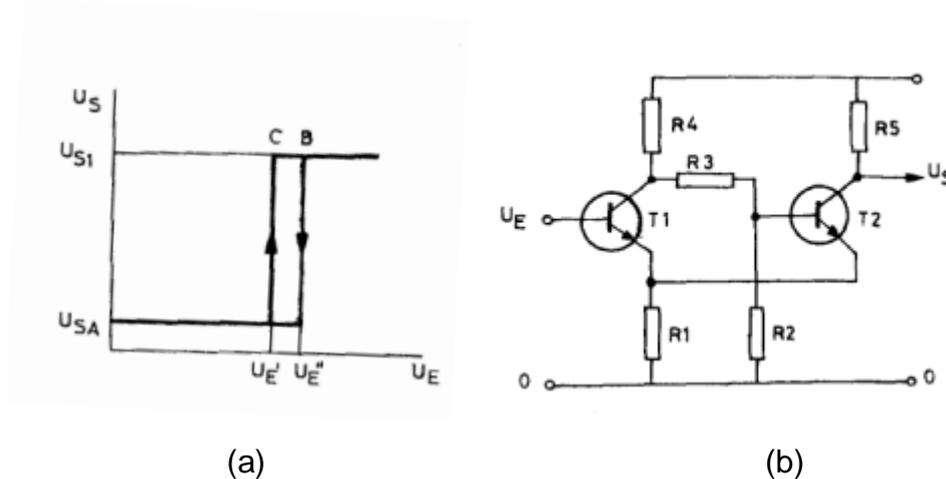


**Fig. 5.30 Montajes separadores**

**Elemento de medida:** es un convertidor de señal analógica en señal binaria, con función de medida, que modifica bruscamente su tensión de entrada cuando sobrepasa cierto valor.

El montaje fundamental lleva una báscula de Schmitt Figura 4.25. el potenciómetro R2-R3-R4 está dimensionado de tal forma que, para una débil tensión positiva de entrada  $U_E$ , la tensión de base del transistor  $T_E$  es por lo menos 0,2 v más elevada que su tensión de emisor, de forma que el transistor

es completamente conductor y la tensión de salida  $U_s$  es débil, y se obtiene una señal 0.



**Fig. 5.31 (a) Características de la tensión de Schmitt y (b) Convertidor de señal analógica en señal (entrada) binaria “Bascula de Schmitt”**

Cuando existe un aumento de tensión de entrada el transistor  $T_1$ , este comienza a conducir y por lo tanto el potencial de base del transistor  $T_2$  cae hacia cero, de forma que la tensión emisor-base de 0,2 V no se alcanza y el transistor  $T_2$  se bloquea. Por esta causa el potencial  $U_s$  pasa bruscamente al valor de la tensión de alimentación  $+U_E$  y a la salida se obtiene una señal 1. Este proceso se desarrolla en un tiempo comprendido entre 10 y 100 microsegundos es decir prácticamente instantáneo comparado con la duración un periodo de la frecuencia industrial. El basculamiento de retorno se produce para una tensión:

$$U_E < U_{E''}$$



---

Los transistores funcionan en bloqueo completo o en conducción completa. Las características de la báscula son prácticamente independientes de las diferencias de calidad de los transistores y de las dispersiones de sus tiempos de funcionamiento.

**Elemento de alimentación:** suministra la energía necesaria para amplificar la débil potencia recibida por el elemento de medida.

Esta energía se obtiene de una fuente auxiliar que puede ser una batería, un descargador capacitivo, una máquina auxiliar, etc.

A veces, el elemento de alimentación está también encargado de estabilizar la tensión de alimentación; una adecuada disposición de los elementos de medida y de salida permite suprimir esta estabilización sin que las usuales variaciones de la tensión de la batería de -20% a + 10% tengan gran influencia sobre la precisión de la medida del relé de protección.

**Elemento de salida:** su objetivo es amplificar la señal binaria y, si es necesario combinarla o temporizarla. Se le imponen exigencias cualitativas mucho menos severas que para el elemento de medida, ya que debe tratar solo con señales binarias. Por lo tanto puede ser más robusta y menos sujeta a perturbaciones.

En la técnica clásica el elemento de salida está constituido por los relés auxiliares y los contactores, que combinan de forma ideal y económica la amplificación de la señal con el aumento del número de contactos. Además la separación eléctrica entre el circuito de mando y el circuito mandado, es posible.



Con la evolución de la técnica de los acoplamientos estáticos, se ha evitado como es natural, el empleo de elementos con contactos de salida. Sin embargo, existe una diferencia entre los órganos mandados de pequeña potencia y los de gran potencia.

El mando de órganos de pequeña potencia se realiza por medio de circuitos lógicos, constituidos esencialmente por compuertas lógicas de tipo OR y NOT y, si es necesario por elementos temporizados lo que permite realizar todas las operaciones lógicas, como inversión de señal, bloqueo de señal y temporización.

Para potencias mayores se tienen bobinas de desconexión de disyuntores o bobinas de interruptores. Los órganos lógicos están preferentemente seguidos de rectificadores controlados. De esta manera se obtiene una respuesta todavía más rápida.

### **Protección eléctrica de estado sólido:**

Los circuitos de estado sólido son ampliamente usados en la actualidad con sensores y relés en equipos de protección eléctrica. Su aplicación principal se da en las siguientes áreas:

- (1) Para protección de fallas entre fases y fase - tierra de circuitos de bajo y mediano voltaje.
- (2) En relés medianamente complejos se usan para la protección en subtransmisión y distribución.
- (3) Para monitoreo de circuitos en condiciones anormales diferentes de los cortocircuitos.



---

Una de las primeras y más exitosas aplicaciones de los equipos de estado sólido fue en control de reconectadores. Los circuitos de estado sólido proveen diseños de control con una construcción compacta, robusta y de bajo mantenimiento.

### **Baja tensión.**

Los interruptores automáticos de potencia tradicionalmente son disparados por dispositivos electromagnéticos que responden a corrientes de falla que circulan por su bobina conectada en serie. La temporización esta generalmente suministrada por un émbolo de aire a presión.

Este arreglo es adecuado en la mayoría de las aplicaciones, pero no es siempre satisfactorio cuando se requiere una buena coordinación, con el tiempo, los dispositivos de disparo en serie tienden a perder su calibración si no se les realiza un cuidadoso mantenimiento.

### **Fallas a tierra.**

En sistemas de distribución de baja tensión y en plantas industriales, las fallas a tierra han llegado a ser un tema de gran interés. Los disparos a baja tensión incluyen protección sensible a fallas a tierra. Pero, también en el mercado existen otros dispositivos de protección a tierra que no están incluidos en los circuitos de corte (interruptores automáticos).

Estos pueden ser usados para disparar interruptores automáticos circuitos de corte en cajas moldeadas, operar eléctricamente interruptores, y en algunos casos disparo de interruptores.

La típica protección de estado sólido de falla a tierra es operada desde un TC



tipo ventana (núcleo balanceado) que encierra todos los conductores de las tres fases y del neutro, la señal de salida es cero a menos que se tenga una corriente de retorno por una trayectoria externa (falla a tierra). Otros esquemas usan un TC a lo largo de la conexión del neutro del transformador a tierra con TCs alimentados desde un arreglo diferencial, o puentes en una sección de aislamiento en el circuito de retorno a tierra. en los arreglos con sensor la señal de los tcs va por los circuitos de estado sólido. un tipo de unidad es calibrada para desarrollar una señal (de salida) de disparo con un valor definido de corriente de falla a tierra. Otras unidades son ajustables con una familia de curvas tiempo-corriente.

**Relés de protección.** En los rangos de mediano y alto voltaje son todavía ampliamente usados los relés electromagnéticos. Sin embargo se usan relés de estado sólido donde se tiene una función especial a ser desarrollada, o cuando los de estado sólido tienen alguna ventaja definida. Por ejemplo una línea de relés diferenciales de estado sólido para generadores ha sido desarrollada debido a que estos son afectados en menor forma por la vibración que los electromagnéticos. Los relés de estado sólido a menudo están montados en los mismos tipos de cajas que los relés convencionales y son físicamente intercambiables en los paneles de relés.

### 5.3 Variador de frecuencia SINAMICS G120



Este variador de frecuencia es modular, y consta de tres componentes básicos:

- El Modulo de Poder.- Suministra tensión al motor
- La Unidad de control.- Se encarga del control y supervisa el Modulo de Poder
- El Basic Operator Panel (BOP-2) y el Intelligent Operator Panel (IOP) se usan para operar y supervisar el convertidor.

Para configurarlo es necesario una conexión usb (puerto serial virtual que puede ser cualquiera, desde el com1 al com7) a la Unidad de Control, y por medio del software Starter, en el que se procederá a utilizar el asistente de configuración, podremos empezar a utilizar nuestro equipo.



---

---

## Capítulo 6.

### Conclusiones y Recomendaciones

Hoy en día la implementación de sistemas del tipo HMI se hace más necesaria, debido a que en la actualidad se requiere que las operaciones como control, adquisición de datos, se realicen en el menor tiempo posible garantizando así mayor seguridad y facilidad en lo .que se requiere.

Es imprescindible para hallar el sensor adecuado, en nuestra aplicación, documentarnos de la mejor forma posible, y visitar lugares especializados en estos equipos, ya habrá un interés económico por parte de los proveedores en demostrar sus dispositivos.

Al momento de instalar un sensor de caudal electromagnético, se debe tener en cuenta el interior de la tubería, que debido a protuberancias en la misma, se puede alterar la uniformidad del flujo, dándonos mediciones erróneas, y si se presentasen, se deberá utilizar equipos que uniformicen el flujo antes de que este llegue al sensor.

Se debe tener presente que algunos sensores se ven afectados por las condiciones ambientales en las que se encuentran, por lo que se deberá realizar una calibración a los sensores, que tenga en cuenta estas condiciones (temperatura, humedad en el aire).

Analizar diferentes sensores antes de adquirir uno específico que suponga una clara comprensión de las características de cada sensor (rangos de operación) si es posible se deben realizar pruebas con los mismos.



---

Dadas las características del S7-1200 se recomienda la utilización del Web server disponible dentro, este para en un futuro poder realizar prácticas y que otros usuarios en el mundo puedan aprovechar el potencial del canal.

Se recomienda la modificación del sistema mecánico del generador de olas para mejorar el rendimiento del mismo.

Se recomienda verificar el sistema de puesta a tierra de los equipos, esto para evitar ruidos inducidos en las señales, y posibles daños en los equipos.

Servir de referente para futuras implementaciones al tener ya un mecanismo a seguir en cuanto a adquisición de equipos, instalación de los mismos, pruebas de equipos, sistemas de control, y montaje.

Punto de inicio para certificar el laboratorio debido a que se contaría con diferentes equipos que cumplan normas de certificación y se podría usar el laboratorio para realizar pruebas y estudios de investigación con empresas tanto públicas como privadas.



---

---

### Bibliografía

- Acedo Sánchez, J. (2003). *CONTROL AVANZADO DE PROCESOS Teoría y práctica*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S. A.
- Enríquez, H. (2005). *FUNDAMENTOS DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE MEDIANA Y ALTA TENSIÓN*. Mexico: Limusa S.A.
- Escuela Politecnica Nacional Facultad de Ingenieria. (1978). *INSTRUCTIVO Para las Prácticas de Laboratorio de Hidromecánica*. Quito: Departamento de Hidráulica.
- French, R. H. (1991). *HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS*. México: McGraw-Hill.
- monografias.com*. (s.f.). Recuperado el 02 de 04 de 2012, de <http://www.monografias.com/trabajos31/medidores-flujo/medidores-flujo.shtml>
- Rashid, M. (2004). *ELECTRONICA DE POTENCIA Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Mexico: PEARSON Education.
- Embalses.net. (n.d.). Retrieved from <http://foros.embalses.net/showthread.php/9995-Fotos-embalse-Los-Hurones>.



---

Flujo a través de compuertas. (n.d.). Retrieved from [http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujoencanales/flujo\\_compuertas/flujo\\_compuertas.html](http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujoencanales/flujo_compuertas/flujo_compuertas.html)

Frederick S. Merrit, M. Kent Loftin, J. T. R. (1999). *Manual del Ingeniero Civil* (Cuarta Edi.). McGRAW-HILL.

G., P. L. R. F. (2009). *Guia de laboratorio de mecánica de fluidos I*. Merida-Venezuela.

Silva, I. M. (n.d.). *Manual de mecánica de fluidos*.

Streeter, V. L. E. B. W. (1988). *Mecánica de los fluidos*. (Octava edi.). McGRAW-HILL.

Ven Te Chow. (1994). *Hidraulica de canales Abiertos*. McGRAW-HILL.

Vennard, J. K. (n.d.). *Elementos de la mecánica de los fluidos*. (Tercera ed.). México 22, D.F.: Compañía Editorial Continental.