



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

---

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Unidad Azcapotzalco  
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

**AUTOMATIZACION  
DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE AGUA PARA  
UNA CELDA DE PRUEBAS DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.**

---

**T E S I S I NA PARA OBTENER EL DIPLOMA DE  
ESPECIALIZACIÓN**

**EN INGENIERÍA MECÁNICA CON OPCIÓN:  
AUTOMATIZACION DE PROCESOS INDUSTRIALES  
PRESENTA:**

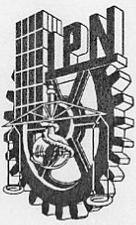
**Manuel Rodríguez Gómez**

---

**DIRECTOR:**

Dr. Bernardino Benito  
Salmerón Quiroz





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESINA

En la Ciudad de México siendo las 15:00 horas del día 19 del mes de Octubre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesina, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME-UA para examinar la tesina titulada:  
Automatización del sistema de refrigeración de agua para una celda de pruebas de motores de combustión interna

Presentada por el alumno:

Rodríguez Gómez Manuel  
Apellido paterno Apellido materno Nombre(s)

Con registro:

B	1	0	2	0	3	1
---	---	---	---	---	---	---

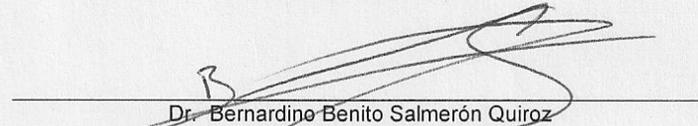
aspirante de:

Diploma de Especialidad en Ingeniería Mecánica

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESINA**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesina

  
Dr. Bernardino Benito Salmerón Quiroz



M. en C. Gerardo Villegas Medina



Dr. Salvador Antonio Rodríguez Paredes

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



Dr. Jaime Pacheco Martínez







**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México el día 21 del mes Octubre del año 2011, el que suscribe Manuel Rodríguez Gómez alumno del Programa de Especialidad en Ingeniería Mecánica con número de registro B102031, adscrito a SEPI-ESIME-UA, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Bernardino Benito Salmerón Quiroz y cede los derechos del trabajo intitulado Automatización del Sistema de Refrigeración de Agua para una Celda de Pruebas de Motores de Combustión Interna, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección [bsalemeron@ipn.mx](mailto:bsalemeron@ipn.mx) y [mrodriguezg1007@ipn.mx](mailto:mrodriguezg1007@ipn.mx). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Manuel R. G.

Manuel Rodríguez Gómez

## Agradecimientos

A mis padres y hermanos por todo el apoyo que me han brindado durante mis estudios.

A mis profesores que me han transmitido sus valiosos conocimientos y por su apoyo en la realización de este trabajo

A mis compañeros de la sección de posgrado por ser buenos amigos y su ayuda durante nuestros estudios

Un agradecimiento especial al Instituto Politécnico Nacional por brindarme una educación profesional de calidad

Al Dr. Benito Salmerón Bernardino Quiroz por todo su apoyo, su valiosa sabiduría e infinita calidad humana.

# Automatización del Sistema de Refrigeración de Agua Para Celda de Pruebas de Motores de Combustión Interna

---

## INDICE

Antecedentes:.....	8
Justificación.....	8
Objetivos .....	9
1.1 Sistemas de Enfriamiento en la Industria.....	14
1.1.1 Sistemas de Enfriamiento .....	14
1.1.2 Clasificación de Torres.....	14
1.1.2.1 Por Proceso .....	14
1.1.2.2 Por tipo de Tiro .....	14
1.1.2.4 Por Funcionamiento .....	15
1.2 Sistema de Enfriamiento en los Motores de Combustión Interna .....	15
1.2.1 Refrigeración por Agua .....	16
1.2.2 Termosifón.....	16
1.2.3 Circulación Forzada .....	17
1.2.4 El Radiador .....	17
1.2.5 Bomba de Agua .....	19
1.2.6 Ventilador .....	20
1.2.7 Termostato.....	20
1.3 Sistemas de Control y Teorías de Control .....	21
1.3.1 Sistemas de Lazo Cerrado y Lazo Abierto.....	21
1.3.2 Elementos Básicos de un Sistema de Control .....	22
1.3.3 Especificaciones de Despeño para Sistemas de Control .....	23
1.3.4 Modelado en el Dominio de la Frecuencia.....	23
1.3.4.1 Función de Transferencia .....	23
1.3.5 Modelado en el Dominio del Tiempo.....	24
1.4 Controladores Industriales.....	24
1.4.1 Microcontroladores PIC .....	24
1.4.1.2 Diferencia entre Microcontrolador y Microprocesador .....	24
1.4.1.3 PIC's.....	25
1.4.1.3.1 La Arquitectura.....	25
1.4.1.3.2 Memoria de Datos (RAM) .....	25
1.4.1.3.3 Programación del PIC .....	26
1.4.2.1 Control Proporcional (P).....	26
1.4.2.2 Control Proporcional e Integral (PI) .....	27
1.4.2.3 Controlador PID.....	28
1.4.3 PLC.....	29
1.4.3.1 Programación .....	30
1.5 Sintonización.....	31
1.5.1 Método de la Reacción del Proceso .....	31
1.5.2 Método del Ciclo Final.....	32
1.6 Despliegue de la Función Calidad (QFD).....	32
1.6.1 Desarrollo del QFD .....	33
1.6.2 Ventajas e Inconvenientes del QFD.....	37
1.7 Dinamómetros .....	38
1.7.1 Freno de Fricción.....	38
1.7.2 Freno de Agua .....	39
1.7.3 Dinamómetro de Corrientes Parasitas (Foucault) .....	39
1.7.4 Dinamómetro Eléctrico .....	40
2.1 Acondicionamiento de Señales .....	42
2.1.1 Intercomunicación con Microprocesadores.....	42

# Automatización del Sistema de Refrigeración de Agua Para Celda de Pruebas de Motores de Combustión Interna

---

2.1.2 Procesos de Acondicionamiento de Señales .....	42
2.2 Sensores .....	43
2.2.1 Sensores de Temperatura .....	43
2.2.2 Bandas Bimetálicas.....	44
2.2.3 Sensores Resistivos Mediante Conductores.....	44
2.2.4 Sensores Resistivos Utilizando Semiconductores .....	45
2.2.5 Termopares .....	45
2.3 Control Automático.....	47
2.3.1 Ventajas de Controladores Digitales .....	47
2.3.2 Estructura.....	48
2.4 Elementos Físicos de un Sistema de Enfriamiento (Chiller) .....	48
2.4.1 Compresor.....	49
2.4.2 Evaporador.....	49
2.4.3 Condensador .....	49
2.4.4 Válvula termostática .....	49
2.4.5 Dispositivos de control .....	49
2.5 Sistemas SCADA .....	49
2.5.1 Definición General de SCADA.....	50
2.5.2 Unidades Maestras (Master Terminal Units) .....	51
2.5.2.1Características de MTU .....	51
2.5.3 Hardware y Software .....	51
2.5.4 Terminales Remotas (Remote Terminal Units) .....	52
3.1 Celda Dinamométrica.....	55
3.2 Secciones de una Celda Dinamométrica .....	55
3.2.1 Zona de Ensayos.....	56
3.2.2 Zona de Control.....	57
3.2.3 Zona de Abastecimiento .....	58
3.2.3.1 Elementos de la zona de suministros .....	58
3.3 Requerimientos Funcionales .....	59
4.1 Sistema de Bombeo de Agua .....	61
4.2 Calculo tubería y bomba .....	62
4.3 Modelado y Control de la Presión.....	65

## Índice Tablas

Tabla 1 Criterio de la curva de la reacción de proceso .....	31
Tabla 2 Valores propuestos para sintonizar .....	31
Tabla 3 Símbolos de relación en matriz QFD .....	34
Tabla 4 Parte inferior de la matriz QFD.....	35
Tabla 5 Características Termopares .....	45

## Índice de Figuras

Figura 1 Circulación por termosifón.....	16
Figura 2 Radiador de tubos .....	17
Figura 3 Radiador de Panal.....	17
Figura 4 Flujo en radiadores con flujo forzado .....	18
Figura 5 Bomba Centrífuga.....	19
Figura 6 Sistema de Lazo Abierto .....	20
Figura 7 Sistema de lazo Cerrado.....	21

Figura 8 Elementos Básicos de un Sistema de Control .....	21
Figura 9 Banda Proporcional .....	26
Figura 10 Respuesta de un controlador PI con error constante .....	27
Figura 11 Comparación entre un P y un PI.....	27
Figura 12 Arquitectura general de un PLC .....	29
Figura 13 Curva de reacción del proceso .....	30
Figura 14 Matrices QFD.....	32
Figura 15 Matriz de calidad.....	34
Figura 16 Freno de Prony .....	37
Figura 17 Freno Hidráulico .....	38
Figura 18 Sensor Bandas Bimetálicas.....	43
Figura 19 Grafica termoeléctrica-temperatura.....	45
Figura 20 Estructura Controlador Digital .....	47
Figura 21 Ejemplo de interfaz hombre-máquina .....	49
Figura 22 Arquitectura de comunicación de un sistema SADA.....	51
Figura 23 Celda Dinamométrica.....	54
Figura 24 Zona de Ensayos.....	55
Figura 25 Zona de control .....	56
Figura 26 Zona de elementos de la zona de suministros .....	58
Figura 27 Sistema de enfriamiento .....	60
Figura 28 Tubería del sistema de enfriamiento .....	61
Figura 29 Curvas Para una Bomba 2x3-10 a 3450 RPM .....	64
Figura 30 Proceso de Desarrollo Interactivo.....	65
Figura 31 Descomposición jerárquica de primer nivel.....	66
Figura 32 Modelo Motor [12].....	67
Figura 33 Obtención de los calores T y L.....	68
Figura 34 Control PID .....	69
Figura 35 Diagrama simulink del sistema de enfriamiento.....	70
Figura 36 Simulación del sistema a la salida de la bomba y a la entrada del dinamómetro .....	71

## Antecedentes:

Este proyecto desarrolla la metodología necesaria para la aplicación de un controlador industrial en un laboratorio encargado de realizar pruebas y estudios a un motor de combustión interna, es decir en una Celda Dinamométrica, para su monitoreo y control en los Sistemas de Enfriamiento de la celda, ya que en la actualidad es un proceso que necesita conocimiento claro del objetivo que requiere un planta de este tipo para que se pueda llevar a cabo el control y automatización.

## Justificación.

Una Celda Dinamométrica cuenta con sistemas que permiten el estudio del comportamiento de un motor de pruebas a diferentes alturas respecto al nivel del mar. Uno de estos sistemas es el Simulador del radiador del automóvil para el enfriamiento de la entrada del motor, el cual tiene como función someter a diversas presiones al motor en estudio.

La temperatura es un parámetro que afecta de manera importante el funcionamiento de los motores de combustión interna, especialmente en ciertas piezas metálicas, debido al rozamiento o fricción, siendo necesario limitar la dilatación de las mismas y evitar que se llegasen a fusionarse. La temperatura que llega alcanzar un motor en la cámara de combustión es mayor de 1000°C cuando realiza la compresión, y en ocasiones los gases de escape alcanzan 750°C. Es así, que es necesaria la implementación de un sistema de enfriamiento eficiente, puesto que se encarga de que los diferentes componentes del motor se mantengan a temperaturas seguras y así evitar que el motor sufra desgastes prematuros o daños importantes, logrando con ello su máximo rendimiento.

## **Objetivos.**

### Objetivo General.

Desarrollar un sistema de control de suministro del agua de una Celda Dinamométrica que funcionara de forma automática en función de la temperatura, la variación de la velocidad del motor, el ángulo de mariposa entre otros parámetros , para lo cual, se debe controlar y asegurar la regulación de la temperatura del agua suministrada a la entrada del motor.

### Objetivo Específico.

- Modelado del motor.
- Modelado de la torre de enfriamiento.
- Propuesta del controlador industrial.
- Sintonización del controlador industrial.
- Validación del desarrollo tecnológico en la celda.
- Prueba a un motor 2.0 lt y celda completa.

De esta manera se pretende:

- Reducir la temperatura dentro de rangos seguros de operación para los diferentes componentes.
- Disminuir el desgaste de las partes mecánicas .
- Reducir el calentamiento de los elementos de la máquina que se mueven unos con respecto a otros.
- Mantener una temperatura óptima para obtener el mejor desempeño del motor.

## Resumen

El presente trabajo consiste en el análisis y control del sistema de refrigeración por medio de agua para la celda de pruebas de motores de combustión interna, con la que cuenta el laboratorio de térmicas de la ESIME Azcapotzalco, lo cual se hace por medio del control de una bomba centrífuga que proporciona el caudal y presión necesaria para mantener dentro de un rango de temperatura seguro para la celda.

Para dicho objeto de estudio, en los primeros dos capítulos se analizan y estudian los diferentes tipos de sistemas de enfriamientos usados en la industria, los tipos de controladores industriales que existen, la metodología QFD para el desarrollo de nuevos productos , también se analizaron los diferentes tipos de frenos dinamométricos, sus características y funcionalidades, así como los elementos que constituyen un sistemas de enfriamiento, y la configuración de los sistemas de monitoreo y control como lo son los SCADA (**S**upervisory **C**ontrol **A**nd **D**ata **A**cquisition).

En el tercer capítulo se analizó la celda dinamométrica, se estudiaron sus diferentes partes y secciones así como lo requerimientos necesarios para su funcionamiento del sistema de refrigeración, debido a que si estos no son cumplidos, los sistemas de seguridad no permiten el encendido de la celda.

En el cuarto capítulo se presentan los cálculos necesarios en la tubería del sistema, las simulaciones del control del motor que impulsa la bomba y su relación con la presión del sistema a la entrada de la celda.

## Abstract

This paper is about to the analysis and control of cooling water system of the test cell engine, the laboratory is located in the ESIME Azcapotzalco. This is done through by the control a centrifugal pump that provides flow and pressure needs to keep within a safe temperature range for the cell.

The object of study, in the first and second chapters is studied different types of cooling systems used in industry, types of industrial controllers that exist, the QFD methodology for development new products, we also analyzed the different dynamometer brake types, characteristics and functionality as well as elements of a cooling system, and configuration monitoring and control systems as the SCADA.

The third chapter analyzes the dynamometer cell, it was studied in its different parts and sections as well as requirements for operation of the cooling system, if these are not satisfied, the security system does not allow the turn it on.

The fourth chapter presents the calculations necessary in the system pipe line, control simulation engine that drives the pump and its relation to the system pressure at the entrance of the cell.

# CAPÍTULO 1

## ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describen, los sistemas de enfriamiento en la industria, así como su importancia, también se describen los sistemas de control automático su importancia dentro de la industria, así como también se estudia la metodología QFD

## 1.1 Sistemas de Enfriamiento en la Industria

Los procesos de enfriamiento del agua, son de los sistemas más antiguos que ha desarrollado el hombre, por lo común del agua, que se enfría fácilmente exponiéndola al aire, algunos de estos procesos son más lentos que otros, pero todos implican la exposición de la superficie del agua con el aire.

### 1.1.1 Sistemas de Enfriamiento

La refrigeración mecánica es el proceso mediante el cual se reduce la temperatura de una sustancia por debajo de la temperatura del ambiente, en la industria diversos procesos se realizan por medio de la refrigeración como la elaboración de hules sintéticos, tinturas, refrigerantes, etc. La refrigeración se utiliza para suprimir calor de reacciones químicas, separar gases, por medio de la destilación y purificar productos, entre otras muchas aplicaciones. La refrigeración puede ser usada también para el acondicionamiento de áreas de trabajo industriales con el fin de mejorar las condiciones de trabajo.

### 1.1.2 Clasificación de Torres

#### 1.1.2.1 Por Proceso

**Enfriamiento directo:** Es en cual el fluido refrigerante (agua), va directamente al proceso y regresa como agua caliente a la parte superior, de la torre de enfriamiento.

**Enfriamiento indirecto:** El agua fría pasa por un intercambiador de calor y regresa caliente a la parte superior de la torre de enfriamiento.

#### 1.1.2.2 Por tipo de Tiro

**Tiro mecánico:** Las torres de tiro mecánico proporcionan un control total sobre el caudal de aire suministrado. Se trata de torres compactas, con una sección transversal y una altura de bombeo pequeñas en comparación con las torres de tiro natural. En estas torres se puede controlar de forma precisa la temperatura del agua de salida, y se pueden lograr valores de acercamiento muy pequeños.

**Torres atmosféricas:** Utilizan las corrientes de aire de la atmósfera. El aire se mueve de forma horizontal y el agua cae verticalmente. Son torres de gran altura y pequeña sección transversal. Deben instalarse en lugares muy despejados, de forma que ningún obstáculo pueda impedir la libre circulación de aire.

**Torre de tiro natural:** Es aquella en la que el aire es inducido por una gran chimenea situada sobre el relleno. La diferencia de densidades entre el aire húmedo caliente y el aire atmosférico es el principal motivo por el cual se crea el tiro de aire a través de la torre. La diferencia de velocidades entre el viento circulante a nivel del suelo y el viento que circula por la parte superior de la chimenea también ayuda a establecer el flujo de aire. Estas torres tienen bajos costos de mantenimiento y son muy indicadas para enfriar grandes caudales de agua.

### 1.1.2.3 Por Circuito

Sistema de recirculación cerrado: El agua circula dentro de un circuito que no está en contacto con la atmosfera, por lo tanto en este tipo de sistema no hay perdidas por evaporación, ni por purgado.

Sistema de recirculación abierto: Como su nombre lo indica en un sistema abierto, hay un contacto con la atmosfera, por lo que en este tipo de sistema si existen perdidas por evaporación y purgado.

### 1.1.2.4 Por Funcionamiento

Dependiendo del funcionamiento existen cuatro tipos básicos de sistema de enfriamiento de agua los cuales son:

Aire acondicionado: Es el proceso que conlleva un tratamiento más completo del aire, puesto que no solo se controla la temperatura sino también la humedad.

Chiller: Es un sistema de refrigeración que consiste de condensador, compresor, evaporador o intercambiador de calor, bomba de agua, válvula de expansión, controles de temperatura y otros componentes.

Refrigeración: El agua se enfría mediante un frigorífico, que funcionan al hacer circular un líquido ( refrigerante ) el cual tiene un bajo punto de ebullición, al volverse gas absorbe calor ). Y mediante las rejillas o alambres de atrás del refrigerador, se logra que es refrigerante regrese a su estado líquido y del fondo del refrigerador se bombea a la parte alta.

Torres de enfriamiento: Proceso mediante el cual el agua se enfría utilizando torres de enfriamiento, descritas anteriormente.

## 1.2 Sistema de Enfriamiento en los Motores de Combustión Interna

Durante el funcionamiento de un motor de combustión interna, se pueden alcanzar temperaturas que sobrepasan los 1800°C en la fase de combustión, y aunque esta temperatura es reducida rápidamente, si el motor no dispusiera de un sistema de refrigeración, la dilatación de los materiales seria tal que dificultaría el movimiento y las piezas se deformarían[1].

Del calor producido en la combustión, solo una pequeña parte es aprovechado y es transformado en trabajo, el resto es absorbido por las piezas del motor y la otra parte se pierde en la fricción que se produce entre los elementos móviles, debido a todo esto es necesario que los motores cuenten con un sistema de enfriamiento que libere el calor generado.

El calor debe ser liberado del motor con el fin de conseguir los siguientes objetivos:

- La temperatura máxima admisible en las paredes del cilindro debe estar alrededor de 180° a 230°C.

- La temperatura máxima en el punto más caliente de un pistón, no debe ser mayor a 300°C, de ser mayor, se debilitaría la resistencia mecánica.
- En las paredes internas de la cámara de combustión, no deben ser mayores a 250°C, y es importante también que se mantenga una temperatura uniforme.
- Los materiales usados actualmente en las válvulas de escape, soportan temperaturas máximas admisibles de 750°C.

Es conveniente trabajar en temperatura lo más cercana a la temperatura máxima admisible ya que una refrigeración en exceso provocaría que el combustible no se vaporice de la mejor manera.

En un motor de combustión interna un 30% aproximadamente del calor generado es liberado por el sistema de refrigeración, un 35% es evacuado mediante los gases de escape y el 35% restante es transformado en trabajo útil.

La liberación de calor se hace por medio de un fluido líquido (agua) o gaseoso (aire), así que dependiendo del sistema de refrigeración que utilicen se pueden clasificar en:

- Motores enfriados por agua.
- Motores enfriados por aire.

### 1.2.1 Refrigeración por Agua

El sistema de enfriamiento comúnmente usado en los motores de combustión interna utilizados en automóviles, cuenta con un sistema de circulación de un líquido a base de agua, a través de cámaras formadas alrededor de las paredes de los cilindros y de las cámaras de combustión, de donde el líquido toma el calor y lo transporta a otras áreas. Este sistema cuenta con un radiador donde el líquido refrigerante, transmite el calor al ambiente[1].

Normalmente en el sistema de enfriamiento, el líquido refrigerante, entra al motor por la parte baja del bloque de cilindros y sale por la parte más alta, con el fin de evitar la formación de bolsas de vapor que dificultarían la circulación.

La circulación del líquido es necesaria para transmitir el calor del motor al radiador, puede utilizarse una bomba o bien puede aprovecharse la reducción de densidad del líquido caliente, y su tendencia a subir hacia las partes altas del motor, cediendo así espacio al líquido frío que viene del radiador y que entra por la parte inferior, al primer caso donde se utiliza una bomba se le llama circulación forzada, y al segundo se reconoce como circulación por termosifón.

### 1.2.2 Termosifón

En la circulación por termosifón, el calentamiento del agua produce una dilatación y una disminución en la densidad del mismo, resultando así más ligera, y deja que el agua fría entre al motor, pero cuando esta se calienta igualmente tiende a subir, originando así un movimiento natural, provocado por la corriente de agua caliente que asciende y el agua fría que desciende[1].

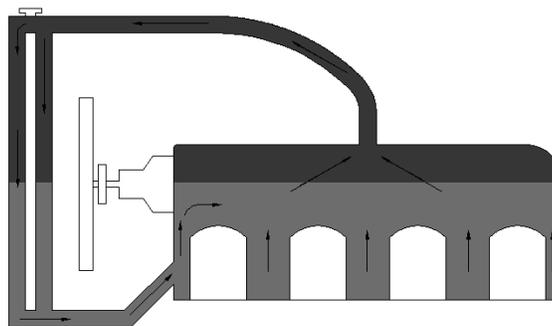


Figura 1 Circulación por termosifón

En un sistema de termosifón el agua entra por la parte de inferior del motor y a medida que el agua se va calentando, esta sube, y llega hasta el radiador, estableciéndose así una circulación, como se ve en las flechas de la figura 1, el enfriamiento del agua en el radiador se lleva a cabo por medio de una corriente de aire provocada por un ventilador, a medida que el agua se enfría, tiene a ocupar partes bajas del radiador, de donde nuevamente pasa al motor.

Para facilitar la circulación del agua, generalmente el radiador se encuentra un poco más lato que el bloque del motor. El sistema de termosifón es sencillo y automático, y sigue trabajando aunque el motor se haya detenido.

### 1.2.3 Circulación Forzada

Actualmente, el sistema de enfriamiento usado en los motores es la circulación forzada, donde el movimiento del agua se consigue, colocando una bomba entre el motor y el radiador, lo cual acelera la circulación del agua[1].

La bomba se instala de modo que aspire el agua fría del radiador desde su parte inferior, e impulsándola hacia el motor, mediante este sistema se consigue una mejor refrigeración, pues el movimiento del agua es proporcional a la velocidad del motor, ya que la bomba es movida por el motor mediante un sistema banda-polea.

En este sistema la circulación del agua se realiza de manera que la diferencia de temperatura entre el agua que entra al radiador y el agua que sale, no se mayo a 10°C, lo deseable es que la diferencia sea de 5°C.

Con este sistema de circulación forzada se puede reducir el tamaño y el peso del los radiadores, tomando en cuenta que el caudal de agua es muy importante en este tipo de sistemas.

### 1.2.4 El Radiador

Las calorías que no son transformadas en trabajo, deben ser expulsadas del motor, esta es la función de radiador, este transmite al aire el calor que sustraído del motor, por medio del agua[1].

El radiador está compuesto por un depósito superior y otro inferior, unidos por un dispositivo de refrigeración, normalmente el radiador se coloca frente al motor, para que la corriente de aire provocada por el andar del vehículo y se protege con una parrilla para protegerlo de suciedad, además de mejorar la estética del automóvil.

Dado el bajo coeficiente de transmisión de calor de dispositivo refrigerante al aire, es necesario que la superficie del mismo se amplía. Se pueden distinguir dos tipos fundamentales de radiadores: el tubular o tubos de agua, y el de panal o tubos de aire, también llamado nido de abeja.

Un radiador de tubos de agua (figura 2) está formado por numerosos tubos, planos y rectos de cobre o latón unidos directamente a los depósitos de agua, los tubos están provistos de una aletas soldadas a ellos, que proporcionan mayor superficie refrigerante. La corriente de aire provocada por el ventilador pasa entre las aletas y va evacuando el calor.

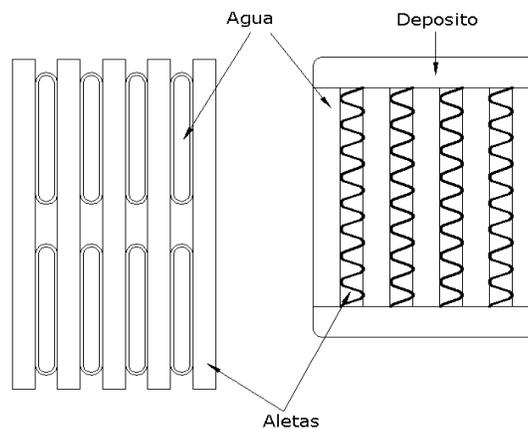


Figura 2 Radiador de tubos

Un radiador tipo panal (figura 3), está formado por una serie de tubos de sección hexagonal unidos entre sí lateralmente, y debido que entre ellos pasa el agua, el aire pasa por el interior del tubo, este tipo de radiador transmite mejor el calor, pero su costo de fabricación es más elevado, debido al mayor número de soldaduras, y a la dificultad de las mismas, por lo que los radiadores tubulares, son más utilizados.

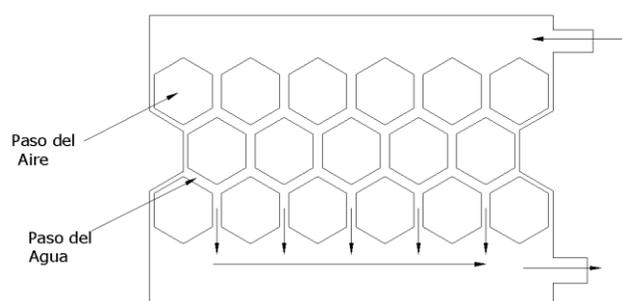


Figura 3 Radiador de Panal

Actualmente para mejorar la visibilidad del conductor, se ha bajado la altura del capo, y se utilizan radiadores de flujo transversal (figura 4), en los cuales, los depósitos están a los lados, y la circulación es forzada por la bomba.

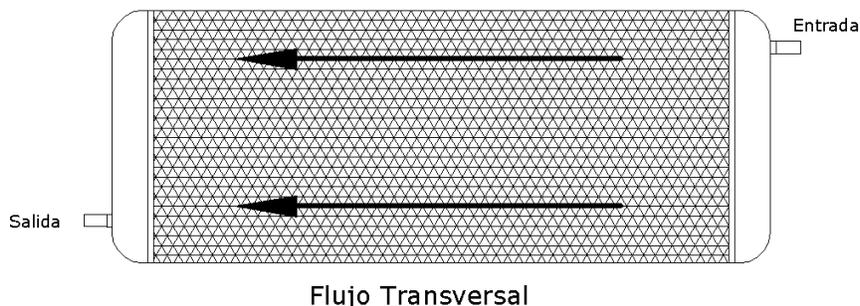


Figura 4 Flujo en radiadores con flujo forzado

### 1.2.5 Bomba de Agua

Las bombas de agua que se usan en los sistemas de circulación forzada son siempre del tipo centrífugo, ya que resultan las más adecuadas para obtener grandes caudales con pequeña presión de impulsión. Las bombas centrífugas suministran un caudal que en función de la pérdida de carga del circuito o resistencia encontrada, aumenta proporcionalmente la velocidad de rotación. Las bombas utilizadas en los autos son capaces de dar un caudal de  $1\text{m}^3/\text{h}$  a 1000 rpm, llegando a un máximo de giro del motor[1].

El cuerpo de la bomba dispone de conductos de aspiración e impulsión. Uno se une a la parte inferior del radiador y segundo se acopla directamente en el bloque de motor a las camisas de agua.

Los alabes de la turbina (figura 5) están orientados convenientemente y la separación entre cada dos de ellos es constante. Según el modelo de bomba y la presión que debe obtenerse en el circuito de refrigeración, se inclinan hacia atrás en el sentido de rotación para presiones bajas o hacia adelante para presiones altas. El diámetro de la turbina está determinado para cada tipo de motor en función de la cilindrada.

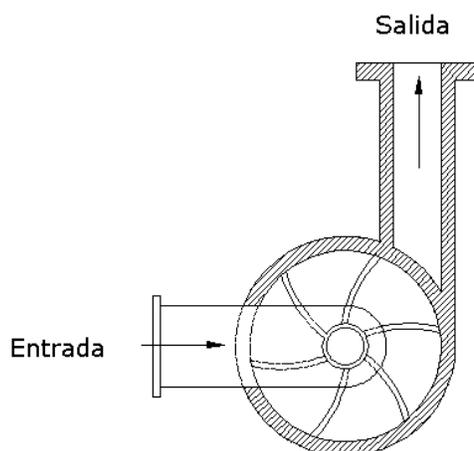


Figura 5 Bomba Centrífuga

Las bombas de agua se dimensionan, de manera que el caudal, y la presión de impulsión sean suficientes para compensar las pérdidas a través del circuito. En ese mismo sentido se dispone del radiador de manera que la oposición que presenta al paso del agua se la más adecuada para, que junto con la bomba, se obtenga una velocidad de paso de agua y un caudal correctos, para conseguir un salto térmico adecuado en el radiador.

### 1.2.6 Ventilador

En agua que circula por el radiador es enfriada por una corriente de aire, en los automóviles, el radiador se coloca de forma que se obtenga una circulación de aire de forma natural, cuando el vehículo se encuentra en movimiento, y es por eso que se pueden emplear ventiladores de pocas palas, cuya función primordial sea activarse cuando el vehículo circule a baja velocidad, o cuando este detenido[1].

En algunas ocasiones, el ventilador se monta, sobre la polea de arrastre de la bomba de agua, y se coloca lo más cerca posible al radiador. Por lo regular estos ventiladores están constituidos por cuatro o seis palas de chapa de acero o incluso plástico.

Con el fin de mejorar la eficacia del sistema de refrigeración, regulando mejor los ciclos térmicos, se ha optado por cambiar los ventiladores movidos por la polea de arrastre de la bomba, por los controlados termostáticamente.

Un ventilador controlado termostáticamente consiste de embrague termomagnético (termocontactó), situado el depósito del radiador, el circuito se cierra cuando el agua alcanza un valor determinado por lo regular 82°C.

### 1.2.7 Termostato

El termostato es un dispositivo empleado para la regulación de la temperatura, su función es dejar pasar cierto volumen de líquido y abrirse a determinada temperatura. Se utilizan dos tipos de termostato, los de fuelle y los de capsula. El de muelle está formado como su nombre lo dice, por

un fuelle de latón que encierra un líquido muy volátil (alcohol) que al calentarse aumenta su volumen provocando la expansión del muelle, lo que hace que se abra la válvula[1].

Los termostatos de capsula, son actualmente los más utilizados, y consisten en una capsula de cera especial, con un alto coeficiente de dilatación, esta cera, está en contacto con el agua, cuando la cera se dilata debido al aumento de la temperatura la válvula se abre y permite el paso del agua de la bomba al radiador.

Para lograr un correcto funcionamiento del termostato, cualquiera que sea, de capsula o fuelle, debe montarse siempre del lado de la salida de agua del motor. Normalmente los termostatos se diseñan para que comiencen a abrirse a partir de los 83°C y alcancen su máxima apertura a los 92°C, aunque los valores difieren de un motor a otro, en función de las características del sistema de enfriamiento.

### 1.3 Sistemas de Control y Teorías de Control

Los sistemas de control son parte de la sociedad moderna y sus numerosas aplicaciones están alrededor de nosotros en diferentes ámbitos, desde aplicaciones espaciales hasta aplicaciones más sencillas, pero el humano no es el único creador de sistemas de control, en la naturaleza también existen la regulación de todos los procesos, como por ejemplo la regulación de temperatura del cuerpo, el ritmo cardiaco, entre otros muchos procesos que regulan y controlan los procesos manteniendo así, en buen estado, el cuerpo[2].

#### 1.3.1 Sistemas de Lazo Cerrado y Lazo Abierto

Existen dos tipos de sistemas de control: el de lazo abierto y el de lazo cerrado. Una sistema de lazo abierto es básicamente un interruptor ON/OFF, o puede llegar a tener puntos intermedios, en cambio un sistema de lazo cerrado tiene retroalimentación la cual da información al, esto quiere decir que el interruptor actuara dependiendo de la desviación del valor medido y el valor que se desea tener[2].

Los sistemas de lazo abierto (figura 6) tienen la ventaja de ser sencillos, y por lo tanto su costo no es elevado y por lo regular su confiabilidad es relativamente buena, pero con frecuencia son imprecisos debido a que no hay corrección de errores y en algunas aplicaciones son insuficientes.



Figura 6 Sistema de Lazo Abierto

Los sistemas de lazo cerrado (figura 7) tienen la gran ventaja de ser muy precisos, al igualar o asemejar el valor real, con el valor requerido, pero son mucho más complejos que un sistema de

lazo abierto, y por lo tanto más costosos pero también suelen ser más susceptibles a las descomposturas debido a que tienen una mayor cantidad de componentes.

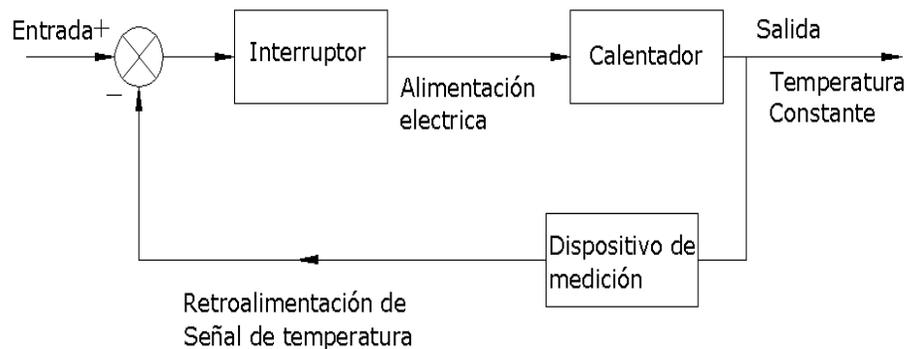


Figura 7 Sistema de lazo Cerrado

### 1.3.2 Elementos Básicos de un Sistema de Control

Un sistema de lazo cerrado básico consta de los siguientes elementos (figura 8)[3]:

**Elemento de comparación:** Compara el valor deseado con el valor medido y genera una señal de error. Se le puede considerar como un sumador que añade la señal de referencia, positiva, a la señal del valor medido, que en este caso es negativa.

**Elemento de control.** En cuanto se recibe una señal de error, el elemento lleva a cabo una acción. Las señales de error pueden ser sistemas alambrados, en este caso se define por la conexión entre los elementos o bien pueden ser sistemas programables, en donde el algoritmo de control se almacena en la unidad de memoria y se puede modificar.

**Elemento de corrección.** El elemento de corrección produce un cambio en el proceso a fin de corregir la condición controlada puede ser un interruptor una válvula entre otros.

**Elemento de proceso.** El proceso es aquello que es controlado, puede ser la temperatura, presión, flujo volumétrico, etc.

**Elemento de medición.** Es el que produce la señal relacionada con el estado de la variable del proceso que se está controlando, sensores, interruptores mecánicos que detecten alguna posición o cualquier otro elemento que se informe sobre el estado de la variable.

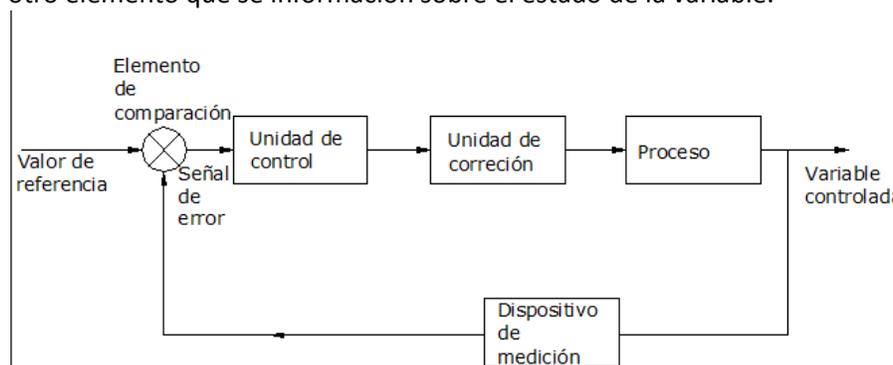


Figura 8 Elementos Básicos de un Sistema de Control

### 1.3.3 Especificaciones de Despeño para Sistemas de Control

El desempeño deseado de un sistema de control se puede describir en tres grupos[2]:

1. Calidad de la respuesta
  - a) Respuesta transitoria. es la respuesta inmediata del sistema cuando se comanda una salida deseada nueva.
  - b) respuesta en régimen permanente. Es la respuesta del sistema después que ha pasado una cantidad de tiempo suficiente.
2. Estabilidad.
3. Solidez de la estabilidad del sistema y calidad de la respuesta contra varias incertidumbres, como perturbaciones, variaciones en la dinámica del proceso y ruidos del sensor.

### 1.3.4 Modelado en el Dominio de la Frecuencia

Existen dos métodos para el análisis y diseño de sistemas de control con retroalimentación. La técnica conocida como control clásico o técnica en dominio de la frecuencia. Este método se basa en la conversión de la ecuación diferencial de un sistema, en una función de transferencia, generando así un modelo matemático del sistema que algebraicamente relaciona una representación de la salida con una representación de la entrada. La sustitución de una ecuación diferencial con una ecuación algebraica no solo simplifica la representación de subsistemas individuales, sino que también simplifica el modelo de subsistemas interconectados[6].

La desventaja básica del método clásico es su limitada aplicabilidad, se puede aplicar solo a sistemas lineales, invariantes en el tiempo o a sistemas que se puedan aproximar.

Una ventaja importante de las técnicas en el dominio de la frecuencia es que rápidamente dan información de la estabilidad y la respuesta transitoria. Así, como de inmediato podemos ver el efecto de variar los parámetros de un sistema hasta conseguir un diseño aceptable.

#### 1.3.4.1 Función de Transferencia

Se define como función de transferencia a la relación entre la transformada de Laplace de salida (función respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación), bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero[6]:

$$G(s) = \left. \frac{\mathcal{L}[Salida]}{\mathcal{L}[Entrada]} \right|_{\text{condiciones iniciales cero}}$$
$$= \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_{m-1}s + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n}$$

Utilizando este concepto de función de transferencia, se puede representar la dinámica de un sistema por ecuaciones algebraicas en  $s$ . Si la potencia más alta de  $s$  en el denominador de la función de transferencia es igual a  $n$ , se dice que el sistema es de orden  $n$ .

### 1.3.5 Modelado en el Dominio del Tiempo

En contraste con el análisis del dominio de la frecuencia de la teoría de control clásica, la teoría de control moderna utiliza el tiempo-dominio espacio del estado la representación, un modelo matemático de un sistema físico como sistema de variables de la entrada, de la salida y del estado se relacionó por ecuaciones diferenciales de primer orden. Al extracto del número de las entradas, salidas y estados, se expresan las variables mientras que los vectores y las ecuaciones del diferencial y algebraicas se escriben en forma de la matriz (la pasada puede ser realizado cuando el sistema dinámico es lineal e invariante en el tiempo). La representación del espacio del estado proporciona una manera conveniente y compacta de modelar y de analizar sistemas con las entradas múltiples y las salidas. Con las entradas y las salidas, tendríamos que de otra manera anotar Laplace transformamos para codificar toda la información sobre un sistema. Desempejante del acercamiento del dominio de la frecuencia, el uso de la representación del espacio del estado no se limita a los sistemas con los componentes lineales y las condiciones iniciales cero. El "espacio del estado" refiere al espacio que hachas son las variables del estado. El estado del sistema se puede representar como vector dentro de ese espacio[6].

## 1.4 Controladores Industriales

### 1.4.1 Microcontroladores PIC

Un controlador es un dispositivo electrónico encargado de, valga la redundancia, controlar uno o más procesos.

Por ejemplo, el controlador del aire acondicionado, recogerá la información de los sensores de temperatura, la procesará y actuará en consecuencia.

Al principio, los controladores estaban formados exclusivamente por componentes discretos. Más tarde, se emplearon procesadores rodeados de memorias, circuitos de E/S,... sobre una placa de circuito impreso (PCB).

Actualmente, los controladores integran todos los dispositivos antes mencionados en un pequeño chip. Esto es lo que hoy conocemos con el nombre de microcontrolador.

#### 1.4.1.2 Diferencia Entre Microcontrolador y Microprocesador

Es muy habitual confundir los términos de microcontrolador y microprocesador, cayendo así en un error de cierta magnitud. Un microcontrolador es, como ya se ha comentado previamente, un sistema completo, con unas prestaciones limitadas que no pueden modificarse y que puede llevar a cabo las tareas para las que ha sido programado de forma autónoma.

Un microprocesador, en cambio, es simplemente un componente que conforma el microcontrolador, que lleva acabo ciertas.

Debe quedar clara por tanto la diferencia entre microcontrolador y microprocesador: a modo de resumen, el primero es un sistema autónomo e independiente, mientras que el segundo es una parte, cabe decir que esencial, que forma parte de un sistema mayor.

### 1.4.1.3 PIC's

Los **PIC** son una familia de microcontroladores tipo RISC fabricados por Microchip Technology Inc. y derivados del PIC1650, originalmente desarrollado por la división demicroelectrónica de General Instrument.

El nombre actual no es un acrónimo. En realidad, el nombre completo es **PICmicro**, aunque generalmente se utiliza como *Peripheral Interface Controller* (controlador de interfaz periférico). Microchip proporciona un entorno de desarrollo freeware llamado MPLAB que incluye un simulador software y un ensamblador. Otras empresas desarrollan compiladores C y BASIC. Microchip también vende compiladores para los PICs de gama alta.

#### 1.4.1.3.1 La Arquitectura

Esta caracterizada por las siguientes prestaciones:

- Área de código y de datos separadas (Arquitectura Harvard).
- Un reducido número de instrucciones de largo fijo.
- La mayoría de las instrucciones se ejecutan en un solo ciclo de ejecución (4 ciclos de clock), con ciclos de único retraso en las bifurcaciones y saltos.
- Un solo acumulador (W), cuyo uso (como operador de origen) es implícito (no está especificado en la instrucción).
- Todas las posiciones de la RAM funcionan como registros de origen y/o de destino de operaciones matemáticas y otras funciones.<sup>1</sup>
- Una pila de hardware para almacenar instrucciones de regreso de funciones.
- Una relativamente pequeña cantidad de espacio de datos direccionable (típicamente, 256 bytes), extensible a través de manipulación de bancos de memoria.
- El espacio de datos está relacionado con el CPU, puertos, y los registros de los periféricos.
- El contador de programa está también relacionado dentro del espacio de datos, y es posible escribir en él (permitiendo saltos indirectos).
- 

#### 1.4.1.3.2 Memoria de Datos (RAM)

Los microcontroladores PIC tienen una serie de registros que funcionan como una RAM de propósito general. Los registros de propósito específico para los recursos de hardware disponibles dentro del propio chip también están direccionados en la RAM. La direccionalidad de la memoria varía dependiendo la línea de dispositivos, y todos los dispositivos PIC tienen algún tipo de mecanismo de manipulación de bancos de memoria que pueden ser usados para acceder memoria adicional. Las series más recientes de dispositivos disponen de funciones que pueden cubrir todo

el espacio direccional, independientemente del banco de memoria seleccionado. En los dispositivos anteriores, esto debía lograrse mediante el uso del acumulador.

|

#### 1.4.1.3.3 Programación del PIC

Para transferir el código de un ordenador al PIC normalmente se usa un dispositivo llamado programador. La mayoría de PICs que Microchip distribuye hoy en día incorporan ICSP (*In Circuit Serial Programming*, programación serie incorporada) o LVP (*Low Voltage Programming*, programación a bajo voltaje), lo que permite programar el PIC directamente en el circuito destino. Para la ICSP se usan los pines RB6 y RB7 (En algunos modelos pueden usarse otros pines como el GP0 y GP1 o el RA0 y RA1) como reloj y datos y el MCLR para activar el modo programación aplicando un voltaje de 13 voltios. Existen muchos programadores de PIC's, desde los más simples que dejan al software los detalles de comunicaciones, a los más complejos, que pueden verificar el dispositivo a diversas tensiones de alimentación e implementan en hardware casi todas las funcionalidades.

Los PICs actuales vienen con una amplia gama de mejoras hardware incorporados:

- Núcleos de CPU de 8/16 bits con Arquitectura Harvard modificada
- Memoria Flash y ROM disponible desde 256 bytes a 256 kilobytes
- Temporizadores de 8/16 bits
- Tecnología Nanowatt para modos de control de energía
- Periféricos serie síncronos y asíncronos: USART, AUSART, EUSART
- Conversores analógico/digital de 8-10-12 bits
- Comparadores de tensión
- Módulos de captura y comparación PWM
- Periférico MSSP para comunicaciones I<sup>2</sup>C, SPI, y I<sup>2</sup>S
- Memoria EEPROM con duración de hasta un millón de ciclos de lectura/escritura
- Periféricos de control de motores

#### 1.4.2.1 Control Proporcional (P)

En un control de modo proporcional, la salida del controlador es proporcional al error. La relación entre la salida del controlador y el error es lineal, pero solo en cierto intervalo de errores, a esto se le denomina banda proporcional (figura 10)[2].

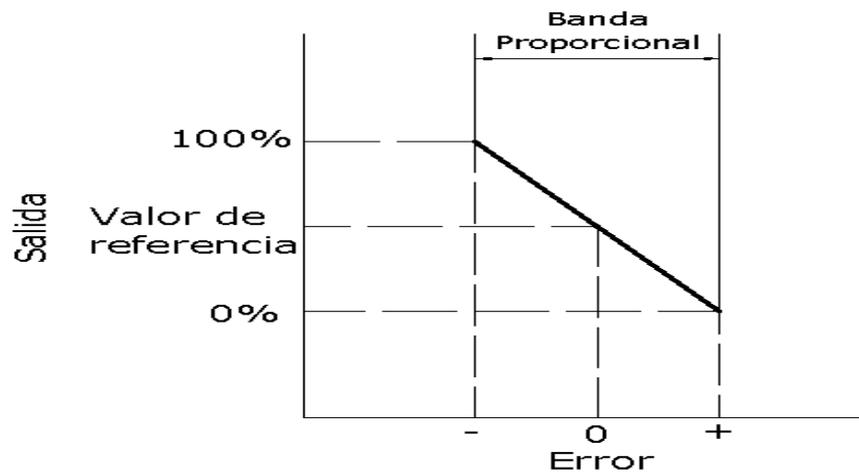


Figura 9 Banda Proporcional

La salida del controlador se expresa en porcentaje del intervalo del total de las posibles salidas, dentro de la banda proporcional. De igual manera el error se expresa en porcentaje de valor total del intervalo, o sea un intervalo de 0-100%.

Ya que el 100% de la salida del controlador corresponde a un error igual a la banda proporcional, tenemos que:

$$K_p = \frac{100}{\text{banda proporcional}}$$

Esta ecuación se puede expresar de otra forma:

$$P_{sal} = I_o - I_0 = K_p e$$

Dónde:

$I_0$  = Porcentaje de salida del controlador en un error 0

$I_o$  = Porcentaje de salida cuando el error es "e"

Realizando las operaciones correspondientes (Laplace) obtenemos:

$$P(s) = K_p E(s)$$

#### 1.4.2.2 Control Proporcional e Integral (PI)

Al igual que el control derivativo, el control integral, nunca es usado solo, por lo regular se usa junto con el control proporcional, cuando agregamos una acción integral, al control proporcional, tenemos una salida  $I_{sal}$  de la siguiente forma[2]:

$$I_{sal} = K_p e + K_1 \int e dt + I_0$$

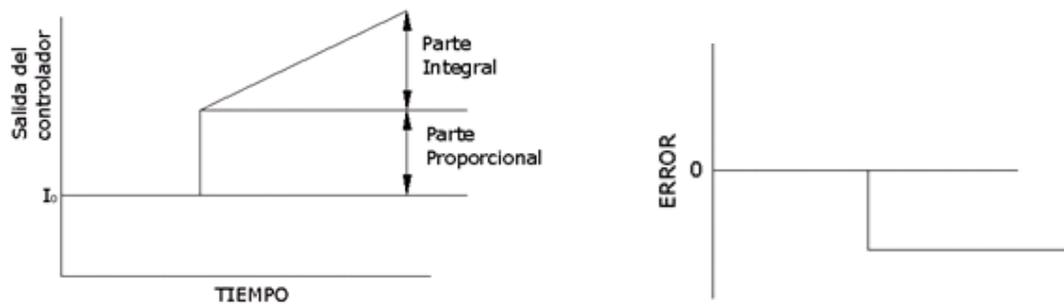


Figura 10 Respuesta de un controlador PI con error constante

En la figura podemos ver como al producirse un cambio repentino en el error, se produce una señal de salida igual de repentina, esto debido a la parte proporcional, pero al mantenerse constante el error, se puede apreciar que la señal de salida va aumentando, esto debido a la acción integral del sistema.

Con un control únicamente proporcional, el controlador lo único que hace es reflejar ese cambio, para asumir de nuevo su valor de referencia, en cambio la acción integral aumenta en proporción con el aumento del área bajo la curva del error contra el tiempo, y aun cuando el error se vuelva cero nuevamente, todavía existe una área bajo la curva, por lo tanto la señal de salida permanece después de que el error ha desaparecido.

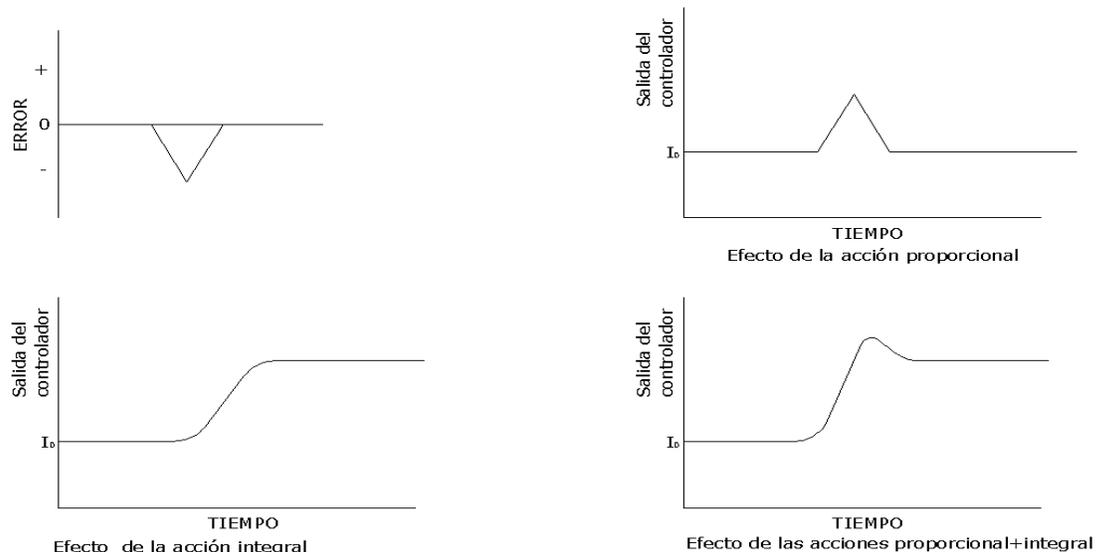


Figura 11 Comparación entre un P y un PI

### 1.4.2.3 Controlador PID

El control PID, es básicamente un control PD más un control PI, combinando sus capacidades de control de ambos tipos de control. El PD se emplea para conformar una respuesta transitoria y estabilizar el sistema. La acción derivativa introduce un amortiguamiento en el sistema, por ejemplo si el error en régimen permanente es constante, su derivada es cero la acción derivativa no tiene efecto en régimen permanente. El control PI se emplea para reducir el error en el

régimen permanente y mejorar la capacidad de rechazo de perturbaciones. La ecuación que describe su comportamiento es [2]:

$$I_{sal} = K_p e + k_1 \int e dt + K_D \frac{de}{dt} + I_0$$

Aplicando transformada de Laplace obtenemos:

$$(I_{sal} - I_0)(s) = K_p E(s) + \frac{1}{s} K_1 E(s) + s K_D(s)$$

Y la función de transferencia queda de la siguiente manera:

$$= K_p e + \frac{1}{s} K_1 + s K_D = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_1 s} + T_D s \right)$$

### 1.4.3 PLC

Controlador lógico programable o PLC se puede definir como un dispositivo electrónico digital que usa una memoria programable para guardar instrucciones y llevar a cabo funciones lógicas, de configuración de secuencia, de sincronización, de conteo y aritméticas, para el control de maquinaria y procesos. Se les denomina dispositivos lógicos debido a que su programación tiene que ver básicamente con operaciones lógicas. Los dispositivos de entrada y salida que están bajo el control del PLC son monitoreadas de acuerdo al programa que el operador genere y que el PLC conserva en su memoria y es así como puede controlar la maquinaria [2].

Un PLC tiene la gran ventaja de que se puede cambiar el control, sin necesidad de alambrar de nuevo, solo se necesita reprogramar.

Aunque un PLC sea similar a una computadora, este tiene características especiales que permiten su empleo como controlador:

Son más robustos y están diseñados para resistir vibraciones.

La interfaz de entradas y salidas se encuentra dentro del controlador.

Es fácil de programarlos, ya que básicamente consiste en operaciones lógicas y conmutación. La arquitectura básica (figura 12) de un PLC consta de una unidad central de procesamiento CPU, una memoria, circuitos de entrada y salida. La CPU controla las operaciones dentro del PLC, los elementos de memoria son tipo ROM para guardar en forma permanente la información del sistema operativo y datos recogidos, y una memoria tipo RAM para el programa del usuario y memoria buffer temporal para los canales de entrada y salida.

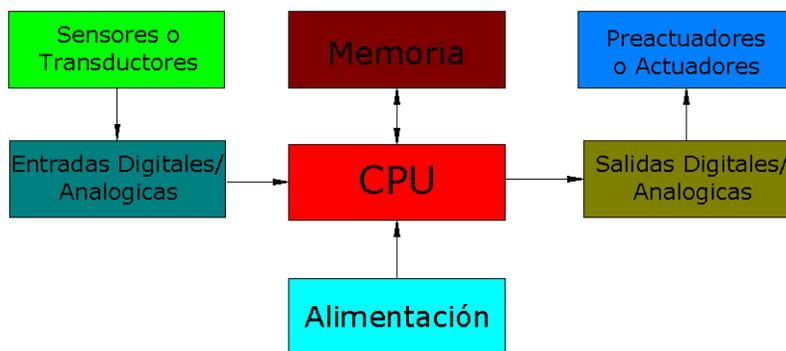


Figura 12 Arquitectura general de un PLC

La unidad de entradas y salidas es la interfaz entre el sistema y el exterior. Para introducir un programa al PLC se puede usar un tablero, el cual puede ser un teclado junto con una pantalla, o también es posible mediante la comunicación con una PC, la cual con un software especial se puede programar el dispositivo.

#### 1.4.3.1 Programación

Un programa es un conjunto de instrucciones definidas dicen lo que se tiene que hacer. Un programa se escribe en un lenguaje de programación, los lenguajes simplifican la creación de programas ya que las instrucciones son sencillas [2].

Cuando se habla de lenguajes de programación, se refiere a las formas en las que se puede escribir un programa, actualmente algunos software permiten traducir de un lenguaje a otro, pudiendo así, elegir el que más convenga al programador.

Existen varios lenguajes de programación:

- Esquema de contactos (escalera)
- Mnemónico
- Esquema de contactos (escalera)
- Bloques funcionales
- Funciones secuenciales (grafcet)

Un diagrama de escalera está constituido por un esquema de contactos en serie de ramas de contactos.

Una rama está compuesta por contactos, conectados en serie o en paralelo, que dan salida a una bobina o una función especial.

El lenguaje de Mnemónicos o lista de instrucciones, consiste en un conjunto de códigos, en los que cada uno corresponde a una instrucción, cada fabricante, tiene sus propios códigos, pero todos son similares a lenguaje ensamblador.

La programación mediante funciones lógicas (bloques funcionales) es a base de compuertas lógicas, como las compuertas AND, OR, Not, y además funciones especial.

El Grafcet es una representación gráfica donde se establecen las funciones de un sistema secuencial.

Este lenguaje consiste en una secuencia de etapas y transiciones, asociadas respectivamente con acciones y condiciones.

Las etapas representan las acciones a realizar y las transiciones las condiciones que deben cumplirse para ir desarrollando acciones. La Etapa - Transición es un conjunto indisoluble.

## 1.5 Sintonización

La sintonización es el proceso de selección de los parámetros del controlador. En el controlador proporcional se refieren a la determinación de  $K_P$ ; en el controlador PID hay que determinar tres constantes  $K_P$ ,  $K_I$  y  $K_D$ . Existen varios métodos para hacerlo, los más comunes son los propuestos por Ziegler y Nichols [2].

### 1.5.1 Método de la Reacción del Proceso

Por lo general, el lazo de control se abre entre el controlador y la unidad de corrección, para que no se produzcan acciones de control. A la unidad de corrección se aplica una señal de entrada de prueba y se determina la respuesta de la variable controlada. La señal de prueba debe ser tan pequeña como sea posible.

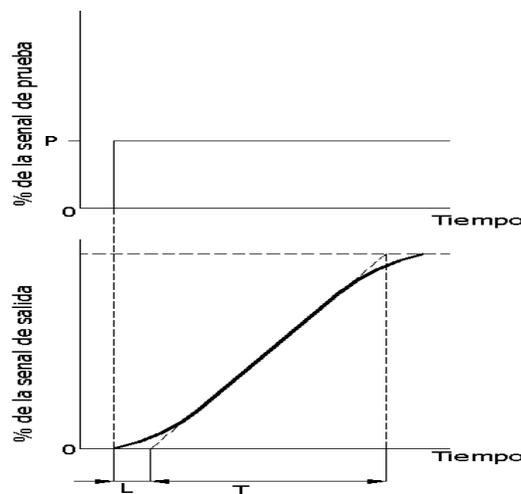


Figura 13 Curva de reacción del proceso

En la grafica se puede ver una forma típica de de una repuesta una señal de prueba tipo escalón, y la amplitud del escalón se expresa como cambio porcentual "P" en la unidad de corrección. La grafica de la variable medida en función del tiempo se conoce como "curva de reacción del proceso".

En la siguiente tabla se muestran los parámetros del controlador con base en los valores P, R y L recomendados por Ziegler y Nichols.

Modo de Control	$K_p$	$T_i$	$T_D$
P	P/RL		
PI	0.9P/RL	3.33L	
PID	1.2P/RL	2L	0.5L

Tabla 1 Criterio de la curva de la reacción de proceso

### 1.5.2 Método del Ciclo Final

En este método primero se reducen las acciones integral y diferencial a sus valores mínimos. Se define un valor bajo de constante de proporcionalidad, y luego se irá aumentando gradualmente.

Eso hace que la banda proporcional se estreche de manera gradual, al mismo tiempo se aplican pequeñas perturbaciones al sistema, y se sigue así hasta que se producen oscilaciones pequeñas continuas, entonces el valor crítico de la constante de proporcionalidad  $K_p$  se anota y se mide el periodo de las oscilaciones  $T_c$  [2].

Siguiente tabla muestra la relación entre el criterio recomendado por Ziegler y Nichols para los parámetro del controlador y este valor  $K_{pC}$ . La banda proporcional crítica es de  $100/K_{pC}$ .

Modo de Control	$K_p$	$T_i$	$T_D$
P	$0.5K_{pC}$		
PI	$0.45 K_{pC}$	$T_c/1.2$	
PID	$0.6 K_{pC}$	$T_c/2.0$	$T_c/8$

Tabla 2 Valores propuestos para sintonizar

### 1.6 Despliegue de la Función Calidad (QFD)

El despliegue de la función de calidad QFD (Quality Function Deploymet) se desarrollo en 1972 por Yoji Akao en el astillero de Mitusubishi en Kobe, luego a los Estado Unidos en 1986, y fue ampliamente adoptado por firmas japonesas, norteamericanas y europeas. En algunas aplicaciones, redujo el tiempo de diseño en un 40% y los costos en un 60%, manteniendo y mejorando la calidad del diseño [7].

El QFD pretende en general aportar un sistema que permita captar las demandas reales del mercado, plasmarlas como objetivos de diseño, y conseguir que dichos objetivos permanezcan presentes a lo largo de todo el proceso de diseño. La idea fundamental es trasladar lo que en QFD se conoce como la "voz del cliente" a todas las fases del diseño de un producto. Si se esto se consigue, se tendrá un producto que responde realmente a las expectativas del cliente.

### 1.6.1 Desarrollo del QFD

El QFD utiliza en total cuatro matrices principales (figura 14) para integrar las necesidades de información del equipo de desarrollo de productos. Las principales aplicaciones comienzan en la primera casa, la casa de la calidad (HOQ, House of Quality). El equipo utiliza en conjunto la HOQ para comprender la voz del cliente y traducirla a la voz del ingeniero. Esta matriz también se llama matriz de QUE/COMO (what vs how), por que relaciona las demandas del usuario y los parámetros técnicos del diseño [7].

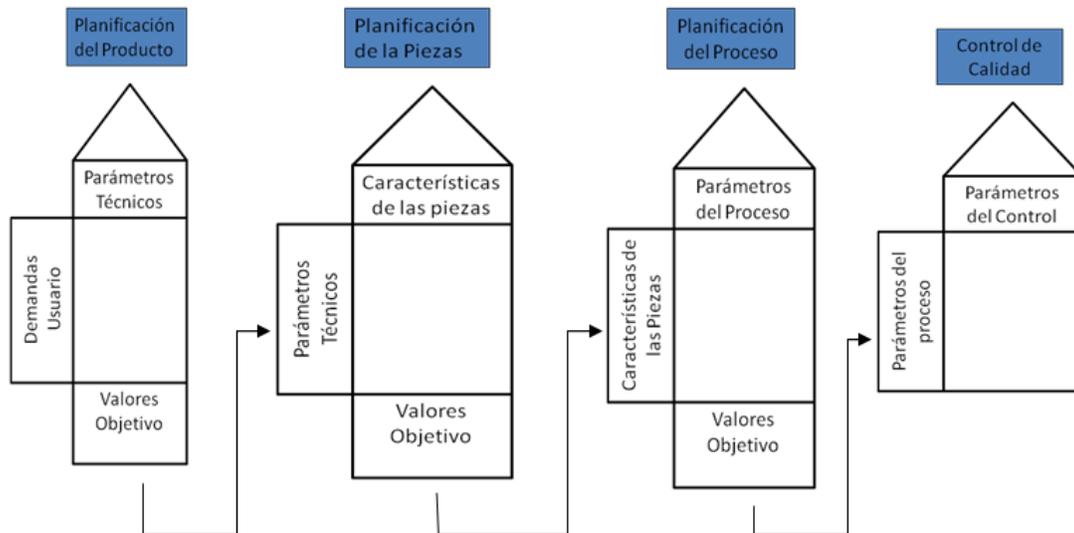


Figura 14 Matrices QFD

Desarrollo de la primera matriz:

1. Captación de las demandas del cliente (Voz del cliente)
2. Estructuración de las demandas
3. Priorización de las demandas
4. Evaluación del cliente
5. Elaboración de la lista de parámetros técnicos
6. Medida de los parámetros técnicos
7. Elaboración de la matriz de relaciones (Casa de la calidad)

**Captación de las demandas del cliente:** la necesidad de un cliente es una descripción, expresada utilizando sus mismas palabras, del beneficio que quiere obtener mediante el producto o servicio. Normalmente en las conversaciones con los clientes se pueden llegar a identificar entre 100 y 400 necesidades. A través de la investigación de mercado se busca determinar cuatro aspectos fundamentales:

- Las necesidades reales de los clientes
- Como valoran los clientes cada una de las demandas
- Cuáles son las principales quejas que plantean los clientes acerca del producto

- Qué opinión tiene los clientes de nuestro producto de los competidores líderes, tomando como referencia cada una de las necesidades detectadas

**Estructuración de las demandas:** Para poder manejar las necesidades del cliente, estas deben estar estructuradas en jerarquías. Las necesidades principales son en general las primeras 5 a 10 necesidades que fijan el rumbo estratégico del producto.

**Priorización de las demandas:** Los clientes quieren que sus necesidades son debidamente satisfechas pero algunas necesidades son más urgentes que otras. Estas prioridades dan al equipo de QFD a tomar decisiones que equilibran el costo de satisfacer una necesidad y el beneficio que recibe el cliente.

La priorización de demandas debe estar prevista en el cuestionario, mediante la petición al encuestado de una puntuación según la importancia otorgada a cada demanda.

Una vez se dispone de una lista de demandas estructurada, clasificada y priorizada, se puede rellenar la columna de la matriz referente a las demandas o columna de los QUE.

**Evaluación del cliente:** Las percepciones del cliente describen como evalúan a los clientes de los productos disponibles en función de la capacidad del producto o del servicio para satisfacer sus necesidades. Cuando sabemos que productos satisfacen mejor las necesidades del cliente, con qué grado de satisfacción, y si existen diferencias entre el mejor producto y el producto que se fabrica actualmente, equipo QFD puede proporcionar los objetivos e identificar las oportunidades para el diseño de los productos.

**Elaboración de la lista de parámetros técnicos:** Para cumplir con las necesidades del cliente, el producto debe satisfacer necesidades que se puedan medir.

Puede haber demandas difíciles de asociar a parámetros que se puedan medir. Suele ocurrir con demandas de carácter subjetivo. En estos casos es necesario objetivar de alguna manera, mediante asignación numérica de niveles, o técnicas de análisis de la percepción del usuario y semántica del producto.

**Medida de los parámetros técnicos:** de la misma manera que el equipo de diseño mide los productos disponibles con respecto a las necesidades del cliente, mide también los productos competitivos por medio de las unidades físicas especificadas por los atributos del diseño.

**Elaboración de la matriz de relaciones:** Una vez complementados los campos de la matriz relativos a las demandas de usuario y a los parámetros técnicos el equipo QFD juzga que parámetros o atributos del diseño influyen o están relacionados con las distintas demandas del cliente. Cada casilla de la matriz de las relaciones es un cruce entre una de las demandas del cliente. No se expresa mediante porcentaje, sino por medio de simbología propia del QFD basada en niveles de relación *muy fuerte, fuerte y muy débil y sin relación*.

●	Relación muy fuerte	9
○	Relación muy débil	3
△	Relación débil	1
	Sin relación	0

Tabla 3 Símbolos de relación en matriz QFD

Del mismo modo, en la parte superior de la matriz, se relacionan los parámetros entre ellos. Se pueden emplear los mismos símbolos que se usan para la parte central de la matriz. Otra posibilidad es relacionar los parámetros especificados si su relación es positiva o negativa. Una vez completa la matriz, se dispone de un plano visual de relaciones entre demandas y parámetros (Figura 15).

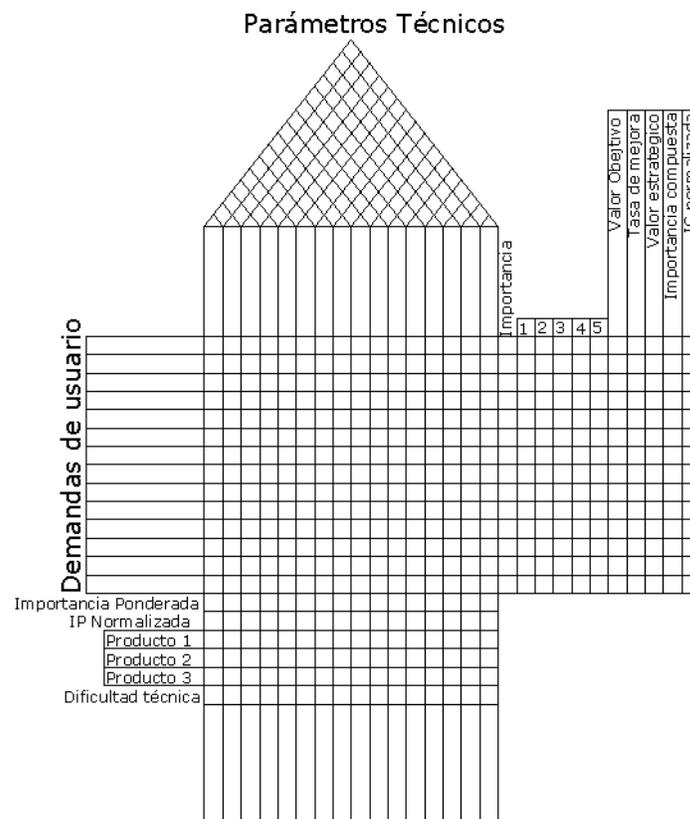


Figura 15 Matriz de calidad

*Importancia:* se insertan los valores de importancia de cada una de las demandas. Estos valores provienen de la priorización de demandas.

*Columnas de evaluación del cliente:* se indica cómo percibe el usuario el cumplimiento de las demandas por parte de varios productos. La manera de plasmarlo en la matriz es simbólica, se asigna un símbolo o color.

*Valor objetivo:* el usuario ha valorado como se cumple cada demanda en varios productos distintos. En ella el equipo de diseño fija el valor que desea que el usuario otorgue en cada demanda para el producto que se va a diseñar. Para ello observa que puntuaciones tiene el producto propio y el de la competencia y la importancia que tiene cada demanda para el usuario.

*Tasa de mejora:* es una columna de cálculo en la cual se puntúa entre 1 y 2 acerca de la importancia estratégica de mejorar una determinada demanda.

*Normalización de la importancia compuesta (%):* Para disponer de una idea más clara y poder comparar mejor las importancias compuestas de cada demanda, se incluye una columna en la que se normalizan sus valores: se suman todas las importancias y se calcula el porcentaje de cada una frente al total.

En la parte inferior de la matriz aparecen igualmente unas filas debajo del cuerpo central.

Importancia ponderada																				
IP normalizada																				
Producto 1																				
Producto 2																				
Producto 3																				
Dificultad técnica																				
ESPECIFICACIONES																				

Tabla 4 Parte inferior de la matriz QFD

*Importancia ponderada:* en esta fila se recoge el resultado de esta operación: se toma cada demanda, se multiplica el valor del símbolo que figure en la casilla por su importancia compuesta y luego se suman todos esos valores. Dicho número mide en cierto modo la importancia del parámetro asociado a esa columna de cara a satisfacer el conjunto de demandas, cuanto más alto más importantes y por lo tanto hay que considerarlas en el diseño.

*Normalización de la importancia Ponderada (%):* al igual que con la importancia compuesta, la importancia ponderada también se normaliza para facilitar la comparación entre parámetros.

*Filas de comparación de parámetros:* como se sabe se toman varios productos de la competencia para estudiar la evaluación que el consumidor hace de cómo satisfacen cada una de las demandas. Estos mismos productos se utilizan para estudiar qué valores adoptan los parámetros técnicos en cada uno de ellos y también en un producto propio, si es que lo hay. El objetivo es comparar valores para estimar en que rango debe moverse el producto a diseñar.

*Dificultad técnica:* en ocasiones se puede añadir esta fila en la cual el equipo estima entre 1 y 5 la dificultad de actuar sobre un parámetro. De esta manera, se añade un criterio más para fijar las especificaciones.

*Valor objetivo (Especificaciones):* es el objetivo final de la primera matriz del QFD. Disponiendo de la importancia ponderada normalizada de cada parámetro, de los valores de dichos parámetros adquieren en otros productos y de la dificultad de actuar sobre cada parámetro, así como de las

relaciones entre los parámetros, el equipo de diseño debe fijar unos valores objetivos para el producto que se va a diseñar. Estos valores pasan después a la hoja de especificaciones.

Una vez completa la casa de la calidad, se dispone de la planificación del producto. A las especificaciones deducidas de esta matriz se deben añadir aquellas que vengan impuestas por normativa, y de este modo se prepara el listado completo de especificaciones de diseño del producto. Los requisitos del producto sirven de base para el diseño conceptual del mismo, y como control de las etapas subsecuentes. Una vez que se cuenta de varios conceptos para el producto, estos son analizados y evaluados con estudios de viabilidad, d costo, etc.

El paso siguiente es preparar la segunda matriz del QFD, que relaciona los requerimientos del producto con los subsistemas y piezas del mismo. Los requisitos del producto o las características técnicas definidas en la Casa de la Calidad se convierten en los QUE o entradas por filas de la matriz, mientras que las entradas por columnas, los COMO son aquellas piezas o ensamblajes que forman parte del producto. Los requisitos del producto son traducidos a características de subsistemas, piezas o ensamblajes críticos. Se calculan las importancias de manera similar y se obtienen los valores objetivos para cada subsistema, ensamblaje o pieza.

Luego de esto se prosigue con la tercera matriz, en la cual se lleva a cabo la planificación de los procesos de fabricación. Las características de las piezas y ensamblajes críticos se convierten en los QUE, y las características del proceso de fabricación son ahora los COMO.

En la última matriz del QFD se utilizan como entradas QUE (filas) las características del proceso de fabricación, y como entradas COMO (columnas) parámetros de control de calidad de procesos. El objetivo es disponer de parámetros que permitan controlar los procesos de fabricación para que no sufra desviaciones.

Al final, el resultado de todo el proceso, planificación y toma de decisiones es que los esfuerzos de fabricación se centran en los procesos críticos, dimensiones y características que tendrán un efecto significativo en generará un productos que cumple con las necesidades del cliente que se introdujeron en la primera matriz.

### 1.6.2 Ventajas e Inconvenientes del QFD

Entre las ventajas cabría destacar el aumento de la satisfacción del cliente, la reducción de costos de lanzamiento y de lead time, la mejora de la calidad del producto, disminución de los errores de lanzamiento y por tanto de las averías en intervenciones en garantía, el aumento de la productividad etc. [7]

La principal limitación del QFD es que resulta una metodología muy laboriosa cuando se trata de productos complejos o con un gran número de componentes, ya que precisan un elevado número de despliegues, matrices demasiado grandes y equipos de trabajo numerosos, lo que conlleva a problemas de organización y coordinación.

## 1.7 Dinamómetros

El dinamómetro es un aparato que provee una fuerza externa al motor y absorbe la potencia generada por el motor, los primeros dinamómetros eran de frenos que usaban la fricción para absorber la fuerza generada por el motor como el freno de Prony, un dinamómetro no solo debe ser capaz de absorber la energía generada por el motor sino que también debe ser capaz de liberar el calor que se genera para mantener en óptimas condiciones el equipo. [4]

Actualmente los dinamómetros más usados son los hidráulicos y eléctricos. Existen diferentes tipos de dinamómetros eléctricos. Estos pueden ser de corriente alterna regenerativa, corriente continua y corrientes parasitas. La potencia absorbida por un dinamómetro eléctrico es convertida en energía eléctrica o en corrientes de Foucault. La electricidad puede ser liberada por medio de calor, por medio de una resistencia, a su vez esta, este en contacto con un sistema de enfriamiento, el cual puede ser por medio de agua o corriente de aire. Las máquinas de corriente directa, siempre han tenido una mayor flexibilidad, pero también son de mayor costo.

### 1.7.1 Freno de Fricción

La medición de potencia o trabajo realizado en la unidad de tiempo, es importante al determinar la capacidad de producción de un motor. Uno de los primeros dispositivos empleados para este trabajo fue, el freno de Prony [10].

Se fija la flecha del motor cuya potencia debe medirse un tambor. Mediante la manivela puede apretarse la banda que envuelve al tambor, el valor de ese ajuste determina la fricción de arrastre que actúa en la periferia del tambor y opone resistencia a la rotación de la flecha. Mediante un brazo de palanca apoyado en la plataforma de la báscula, se impide el movimiento de la banda y sus superficies de fricción excepto en un arco limitado.

El freno de Prony (figura 16) es económico, sencillo, fácil de construir. Por esta razón se usa ampliamente en pruebas de baja velocidad. En altas velocidades ocurren oscilaciones, la principal desventaja es su par de torsión constante con cualquier presión de la banda y por lo tanto es incapaz de compensarse bajo condiciones de carga variable.

La energía que se suministra a la máquina, se disipa en forma de calor, y es por eso que los frenos están provistos de algún medio que los enfríe por medio de agua.

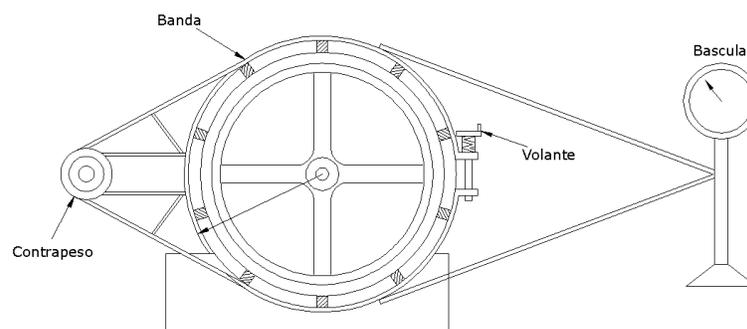


Figura 16 Freno de Prony

### 1.7.2 Freno de Agua

Un freno simple de agua (figura 17) consiste en un disco montado en una cubierta, la cual contiene un fluido. La resistencia que encuentra el disco al girar es igual y opuesta a la reacción que tiende a hacer girar la funda o cubierta. La cubierta está montada sobre unos rodamientos independientes, y la fuerza es medida mediante la fuerza ejercida en la cubierta. Para aumentar la carga puede aumentarse el agua a la cubierta [10].

Los frenos de agua normalmente se emplean cuando se tienen cargas muy grandes y a altas velocidades.

La potencia del motor es absorbida por un flujo continuo de agua, la energía que el dinamómetro absorbe se manifiesta en la temperatura del agua, ya que esta se eleva y por lo tanto se debe de contar con suficiente líquido para absorber la mayor potencia.

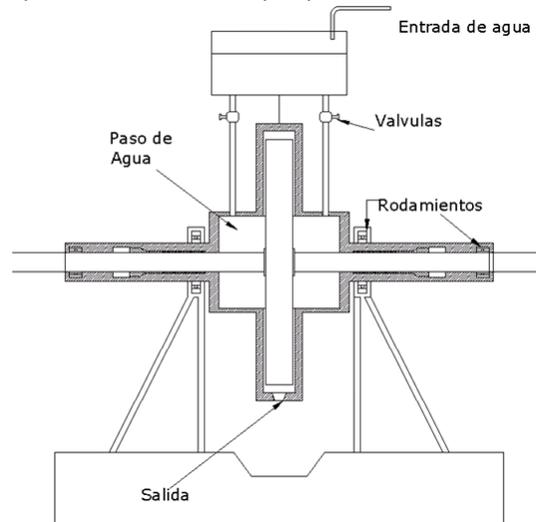


Figura 17 Freno Hidráulico

### 1.7.3 Dinamómetro de Corrientes Parasitas (Foucault)

Una de las formas más antiguas de dinamómetros, son los de corrientes parásitas o corrientes de Foucault, una versión simple consiste de un disco sujeto al eje del motor, y este gira en un campo magnético, e cual puede ser controlado variando la corriente que pasa por una serie de bobinas colocadas en ambos lados del disco, este actúa como un conductor cortando al campo magnético. En el disco se introducen corriente y al no haber un circuito externo este se calienta[10].

Al contrario de un motor eléctrico donde se desean reducir al máximo las corrientes parásitas para elevar el rendimiento, un freno de corrientes de Foucault aprovecha las corrientes parásitas, que se producen en el estator, para oponer resistencia al giro del eje.

Toda la potencia frenada se transforma en calor, por lo que es necesario enfriar la máquina evacuando el calor por medio de la circulación de agua.

#### 1.7.4 Dinamómetro Eléctrico

Puede emplearse el generador eléctrico para cargar el motor, sin embargo, la producción del generador debe medirse con instrumentos eléctricos. El rendimiento del generador depende de la carga, la velocidad y la temperatura. El dinamómetro eléctrico puede ser de corriente alterna o de corriente continua y no solo puede ser usado para cargar al motor. El montaje de dinamómetro eléctrico es similar al freno hidráulico [10].

El dinamómetro eléctrico puede ser usado tanto para encender el motor ya que este se puede comportar como motor eléctrico, o como generador para absorber la potencia del motor.

# CAPÍTULO 2

## MARCO TEORICO

En este capítulo se trataran la adquisición de datos, sistemas de enfriamiento industrial y descripción de los sistemas SCADA

## 2.1 Acondicionamiento de Señales

La señal de salida que se obtiene de un sensor de un sistema de medición por lo general debe procesarse de forma adecuada para que puede ser utilizada por la siguiente etapa de la operación, la señal puede ser demasiado pequeña y es necesario amplificarla, también podría contener interferencias que tiene que eliminarse, podría ser no lineal y requiera su linealización, o ser analógica y necesite digitalizarse o viceversa, entre otras muchas posibilidades que se necesiten. A todas estas adecuaciones que se hacen le conoce como acondicionamiento de señales [3].

### 2.1.1 Intercomunicación con Microprocesadores

El termino interfaz se refiere a un elemento que se usa para interconectar a diversos dispositivos. Una interfaz cuenta con acondicionamiento de señales y protección; esta última es para prevenir daños el sistema del microprocesador [3].

Los microprocesadores requieren de señales tipo digital, por lo que cuando un sensor produce una señal analógica, es necesario una conversión a señal digital, pero muchos sensores producen señales muy pequeñas de apenas unos mili volts y es necesario amplificarlas, para después convertirlas a señal digital, pero aun así la señal digital debe ser acondicionada para mejorar su calidad, por lo tanto una interfaz requiere de varios elementos.

Hay que tomar en cuenta también la salida del microprocesador, ya que este podría controlar diversos dispositivos, y es necesario tener una interfaz de salida para que el equipo pueda funcionar.

### 2.1.2 Procesos de Acondicionamiento de Señales

**Protección.** Para evitar el daño al siguiente elemento, se colocan resistencia limitadores de corriente, fusibles, circuitos de protección de polaridad y limitadores de voltaje.

**Convertir un en un tipo de señal adecuado.** Algunos equipos usan diferentes señales en el control y en la operación y es necesario hacer una conversión de estas digital-analógica o analógica digital, según sea el caso [3].

**Obtención del nivel adecuado de la señal.** En un termopar, la señal de salida es solo de milivolts, la señal necesita amplificarse para poder convertirla digital y después entre al microprocesador, en la amplificación es muy común usar los amplificadores operacionales.

**Eliminación o reducción del ruido.** Para la eliminación de ruidos se utilización filtros, esto es la eliminación de cierta banda frecuencias de señal y permite que otras si se transmitan. Los filtros se clasifican de acuerdo a los rangos de frecuencia que transmite o rechazan.

**Manipulación.** Algunas veces la señal no es lineal como por ejemplo los medidores de flujo, no son lineales y hay que usar un acondicionador de señal de manera que el siguiente elemento reciba una señal lineal, esto se puede hacer con el amplificador logarítmico.

## 2.2 Sensores

Muchos dispositivos sensores y diversos elementos de análisis, son realmente transductores. Un transductor es, un dispositivo que proporciona una salida utilizable en respuesta, a una magnitud física, propiedad o condición, que se desea medir [5].

Un transductor normalmente se diseña para poder medir una magnitud en específico, y responder solo a ese tipo de magnitud, como puede ser un transductor de temperatura, proporciona una señal de salida, de acuerdo a la temperatura, al igual lo hace un transductor de cualquier otra magnitud.

**El rango** de un transductor se especifica entre sus límites superior e inferior, y pueden ser unidireccionales (0 a 3 cm), bidireccionales (+/- 45°), asimétrico (-2 a 10g), o desplazado, es decir si pasar por el cero (50-100°), la diferencia algebraica entre los límites del rango, se le conoce como amplitud por ejemplo: un rango de 2 a 10 g, su amplitud sería de 12g.

**El error.** El error es la diferencia entre el resultado de una medición y el valor verdadero de la cantidad de la cantidad que se mide.

$$\text{Error} = \text{valor medido} - \text{valor real.}$$

**Exactitud.** Es el grado hasta el cual un valor producido de un sistema de medición podría estar equivocado, por ejemplo una exactitud de +/- 2°C en el valor medido de 40°C, significa que el valor se encuentra entre 42°C y 38°C.

**Repetitividad.** Es decir que el transductor sea capaz de repetir la misma salida después de aplicar varias veces el mismo valor de entrada, cuando ya no se logra obtener el mismo valor a la salida, se produce un error y se expresa:

$$\text{Repetitividad} = (\text{valor máx} - \text{valor mín}) \times 100 / (\text{rango total})$$

Las características mecánicas de diseño se especifican en los transductores principalmente por tres razones: para facilitar su manejo e instalación, para prevenir utilizaciones inadecuadas o una degradación de las prestaciones ocasionadas por el medio que se está midiendo, y para tener una adecuada comunicación con el sistema que se está operando.

### 2.2.1 Sensores de Temperatura

La temperatura es una magnitud no direccional que caracteriza el estado energético de un medio y puede depender del lugar y del tiempo.

La temperatura de medios gaseosos o líquidos por lo general se puede medir sin problemas. La temperatura de medios sólidos, por regular solo es superficial. La mayoría de los sensores de temperatura, necesitan estar en contacto directo con el medio, para que su precisión mayor, en ciertos casos no se necesita el contacto directo con el medio, estos determinan la temperatura de un medio o cuerpo, en virtud de su radiación térmica (infrarroja) [10].

En general, los cambios que se utilizan para medir la temperatura son la expansión o contracción de sólidos, líquidos o gases el cambio de resistencia en conductores y semiconductores y la fuerza electromotriz (fem) termoeléctricos.

Debido a que la mayoría de los fenómenos físicos se ven afectados por la temperatura, existen varias maneras de poder medir esta. Pero hay que dar prioridad en los que el fenómeno es más notable y que siguen una curva característica, y otro aspecto importante es que estos puedan ser fabricados en grandes cantidades, y relativamente económicos.

### 2.2.2 Bandas Bimetálicas

Este dispositivo consta de dos bandas de distinto metal (figura 18). Los coeficientes de expansión de los metales son distintos y al cambiar la temperatura la banda adjunta se dobla y se curva; el metal con coeficiente mayor coeficiente queda en la parte externa de la curva. Esta deformación puede servir como interruptor controlado por temperatura. El pequeño imán sirve para que el sensor tenga histéresis, es decir los contactos del interruptor se cierran a diferente temperatura que a la que se abren [3].

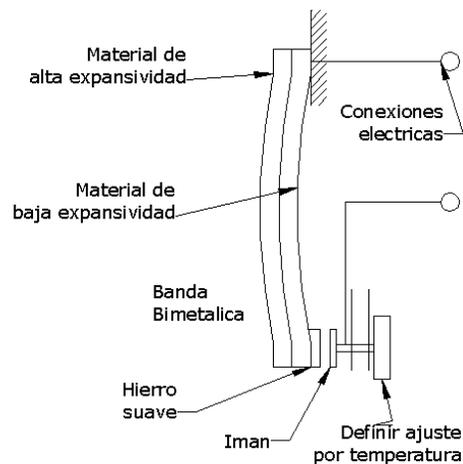


Figura 18 Sensor Bandas Bimetálicas

### 2.2.3 Sensores Resistivos Mediante Conductores

Los conductores generalmente muestran un cambio en su resistencia, de acuerdo a la temperatura a la que se encuentren, dicho cambio viene dado por el coeficiente de temperatura de resistencia del conductor ( $\alpha$ ) y de la resistencia base (usualmente  $0^\circ$ ). Para fines de medición es conveniente que el conductor tenga valores altos de  $\alpha$ , para que se obtengan cambios los razonables en la resistencia, que tenga un valor constante de  $\alpha$ , dentro de un rango amplio de temperatura, con el fin de que la relación de la resistencia y la temperatura sea lineal [5].

Una relación aproximada de la relación entre la resistencia en función de la temperatura es dada por la siguiente ecuación.

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

Dónde:

$R_t$  = resistencia a la temperatura  $t$ , en °C

$R_0$  = resistencia a 0°C

$\alpha$  = coeficiente termico de resistencia

Al principio se utilizó el cobre como elemento resistivo, pero su principal desventaja es la baja resistencia del cobre y la excesiva longitud de hilo que tenía que emplearse para que pudiera ser útil. Posteriormente se utilizó el platino, níquel y algunas aleaciones como el rodio-0.5% yodo. Para todos los elementos bobinados es importante que sean templados después de que se bobinaron ya que así se obtiene una mayor estabilidad en la relación R/T (resistencia en función de la temperatura).

## 2.2.4 Sensores Resistivos Utilizando Semiconductores

Los sensores de temperatura semiconductores más utilizados son los termistores, que son pequeñas piezas de materiales hechos con la mezcla de óxidos metálicos, como, cromo, cobalto, manganeso y níquel y el cual puede tener diferentes formas como discos o varillas, su rango de medida es entre los -50 y 300°C, aunque se han desarrollado algunos para temperaturas de rango criogénico bajo. Los termistores se caracterizan por una elevada resistividad y un alto coeficiente de temperatura negativo, su relación R/T no es lineal [10].

Sus características están definidas como características de potencia nula, incluyendo la resistencia base, que esta normalmente indicada como  $R_{25^\circ}$  en vez de cero, y la relación R y T.

La resistencia base en función de la característica de temperatura de un termistor, a potencia nula se expresa mediante.

$$\frac{R_T}{R_{ref}} = e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}})}$$

Dónde:

$R_T$  = resistencia de potencia nula medida a la temperatura absoluta  $T$

$R_{ref}$  = resistencia de potencia nula a la temperatura absoluta  $T_{ref}$

$\beta$  = constante del material

Los valores de beta normalmente se encuentran entre 3000 y 4500K.

## 2.2.5 Termopares

Cuando dos metales, se unen, en el sitio de unión se produce una diferencia de potencial. Esta depende de los metales utilizados y la temperatura de la unión. Los termopares constituyen circuitos completos en los que hay este tipo de uniones. Si ambas uniones están a la misma temperatura, no se produce fem neta. El valor de E de esta dependerá de los dos metales

utilizados y de las temperaturas  $t$  de ambas uniones. Por lo general una de ellas se mantiene a  $0^{\circ}\text{C}$ , cumpliendo en grado razonable la relación [3]:

$$E = at + bt^2$$

Donde  $a$  y  $b$  son las constantes de los metales utilizados. En la tabla se muestran los tipos más comunes de termopares, sus rangos y su sensibilidad. A estos termopares se les asignan letras de referencia.

Referencia	Materiales	Rango $^{\circ}\text{C}$	$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
B	Rodio/platino, Platino 30%, Rodio 6%	0 a 1800	3
E	Cromel/constantán	-200 a 1000	63
J	Hierro/constantán	-200 a 900	53
K	Cromel/alumel	-200 a 1300	41
N	Nirosil/nisil	-200 a 1300	28
R	Platino/platino con 13% de rodio	0 a 1400	6
S	Platino/platino con 10% de rodio	0 a 1400	6
T	Cobre/constantán	-200 a 400	43

Tabla 5 Características Termopares

Aunque en un circuito de termopar haya otros metales, éstos no tienen efecto en la f.e.m. termoeléctrica, siempre y cuando todas sus uniones estén a la misma temperatura. Es posible que la temperatura de la unión de referencia no sea  $0^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, en las tablas estándar se supone que la unión está a  $0^{\circ}\text{C}$ , por lo que para usar dichas tablas habrá que hacer la corrección respectiva, que se hace utilizando lo que se conoce como ley de las temperaturas intermedias.

$$E_{t,0} = E_{t,t} + E_{t,0}$$

Por lo general los termopares están montados dentro de una cubierta que les da protección mecánica y química, el tipo de cubierta dependerá de la temperatura a la que será usado el termopar. El tiempo de respuesta de los termopares sin cubierta es muy rápido, en cambio cuando se usa una cubierta muy grande el tiempo de respuesta puede aumentar algunos segundos.

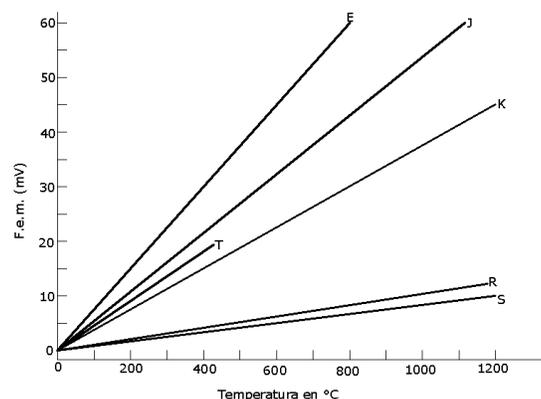


Figura 19 Grafica termoeléctrica-temperatura

## 2.3 Control Automático

La mayoría de las industrias necesitan medir y controlar sus procesos, tanto para la calidad de los productos como para el uso más eficiente de los recursos.

Cualquier sistema de control automático tiene dos componentes principales.

- El proceso
- El controlador industrial

Un controlador automático es un dispositivo que contiene un mecanismo que mide una variable y corrige las variaciones con respecto al valor que se desea tener (punto de ajuste), el cual fue previamente ajustado, el término controlador automático relaciona a los elementos de medición, como a los de control.

Un proceso define como las funciones colectivas realizadas en y por el equipo en el cual la variable es controlada.

Todos los sistemas de control automático están basados en la retroalimentación (feed back), y consiste en la medición del valor de la variable, el cual es comparado dentro del controlador con el valor al que se ajustó, con el set point.

Cuando hay una diferencia entre el valor de ajuste y el valor obtenido de la variable, el controlador envía una señal para que el proceso quede en el valor que se desea mantener.

Los sistemas de control automático constan de, sistemas de medición, controladores y un elemento final de control, sin que estos se incluyan en el proceso.

El control automático puede emplearse a todo proceso en el que la variable pueda ser medida, como la temperatura, presión, flujo, etc.

Un aspecto muy importante es la selección de elemento de medición, ya que no tendría utilidad un buen sistema de control, y que la precisión de dicho elemento sea pobre, ya que la precisión del sistema definida por el elemento de medición [2].

### 2.3.1 Ventajas de Controladores Digitales

El uso de controladores digitales en un lazo produce las siguientes ventajas sobre los sistemas analógicos:

- Costo reducido
- Protección contra el ruido.
- Flexibilidad en respuesta a los cambios de diseño
- 

Los sistemas de control modernos exigen el control de numerosos lazos al mismo tiempo como pueden ser: presión, temperatura, velocidad, voltaje, al reducir, el número de elementos se reducen los costos, los bancos de perillas, medidores, son sustituidos por terminales digitales, donde la información se puede obtener por medio de menús y pantallas.

### 2.3.2 Estructura

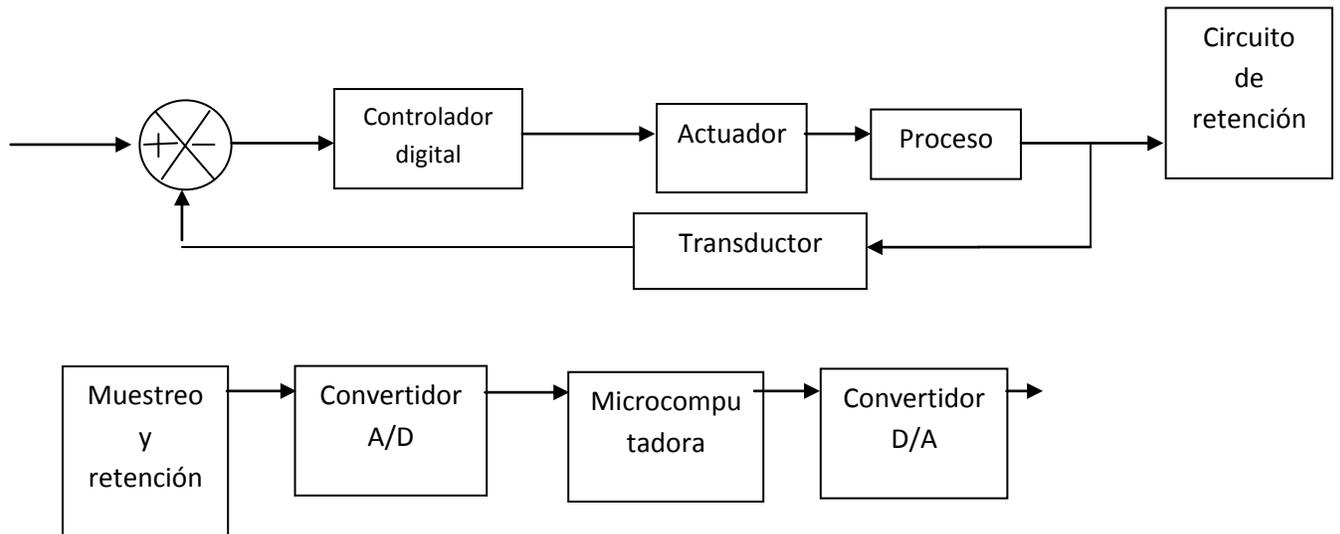


Figura 20 Estructura Controlador Digital

*Muestreo y retención:* Es el circuito que recibe la señal, y la mantiene durante un periodo para el que pueda ser usada por el convertidor A/D.

*Convertidor analógico/digital A/D:* Es un dispositivo que convierte la señal analógica en digital, para que la señal pueda ser usado por la microcomputadora.

*Computadora:* Es aquí donde se realiza las operaciones del algoritmo de control, recibe la señal digital del convertidor y genera una respuesta.

*Circuito de retención:* nuevamente es necesario un circuito de retención para que el convertidor pueda usar la señal, esta vez la conversión se hace de digital a analógica.

### 2.4 Elementos Físicos de un Sistema de Enfriamiento (Chiller)

Un Chiller (o enfriador de agua) es un aparato industrial que produce agua fría para el enfriamiento de procesos industriales. La idea consiste en extraer el calor generado en un proceso por contacto con agua a una temperatura menor a la que el proceso finalmente debe quedar. Así, el proceso cede calor bajando su temperatura y el agua, durante el paso por el proceso, la eleva. El agua ahora "caliente" retorna al chiller adonde nuevamente se reduce su temperatura para ser enviada nuevamente al proceso [8].

Un chiller es un sistema completo de refrigeración que incluye un compresor, un condensador, evaporador, válvula de expansión (evaporación), refrigerante y tuberías, además de bomba de impulsión de agua a/desde el proceso, sistema electrónico de control del sistema, depósito de agua, gabinete, etc.

### 2.4.1 Compresor

Los compresores son la parte vital de un sistema de enfriamiento y pueden ser de tipo hermético, semihermético o de tronillo, su función es la de hacer circular el refrigerante a través de todo el sistemas de refrigeración, succiona el refrigerante sobrecalentado a baja presión y temperatura, lo comprime aumentando la presión a tal punto que este se puede condensar por medios condensantes normales.

### 2.4.2 Evaporador

La función del evaporador es proporcionar una superficie para transmitir calor del líquido a enfriar al refrigerante. Mediante la línea de succión el gas fluye, como vapor a baja presión proveniente del evaporador, la succión del compresor hace que se efectúe el cambio de fase del refrigerante y es en esta parte donde el calor del agua es transferido al refrigerante.

### 2.4.3 Condensador

El condensador es en donde se extrae el calor del refrigerante y lo transfiere al aire o agua, esta pérdida de calor provoca que el refrigerante se condense, una vez en forma líquida a alta presión, este fluye hacia la válvula de expansión.

### 2.4.4 Válvula termostática

La función de esta válvula es el controlar el suministro de refrigerante en estado líquido, hacia el evaporador, así como también reducir la presión del refrigerante de manera que se vaya vaporizando a la temperatura deseada.

### 2.4.5 Dispositivos de control

Es necesario que el chiller cuente con dispositivos de control, para que funcione de manera autónoma, los principales dispositivos con lo que cuenta un chiller son:

- Termostatos
- Presostatos de presión baja
- Presostato de presión alta
- Calefactor de cárter
- Filtro deshidratador de succión
- Filtro deshidratador de líquido
- Indicador de cristal

## 2.5 Sistemas SCADA

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) control supervisor y adquisición de datos. Los sistemas SCADA utilizan la computadora y tecnologías de comunicación para automatizar el monitoreo y control de procesos industriales.

Estos sistemas son partes integrales de la mayoría de los ambientes industriales complejos o dispersos, ya que pueden recoger la información de varias fuentes muy rápidamente, y la presentan en una interfaz amigable para el operador.

### 2.5.1 Definición General de SCADA

Son sistemas industriales de medición y control que consisten en una computadora principal o master (MTU), una o más unidades control, obteniendo datos de campo (RTU) y una aplicación software a la medida que es usado para monitorear y controlar remotamente dispositivos de campo. Los sistemas SCADA modernos presentan normalmente características de control de lazo abierto aunque se pueden encontrar sistemas de lazo cerrado y de comunicación de cortas distancias.

Sistemas similares a los SCADA se pueden ver normalmente en fábricas, plantas de tratamiento, etc. Estos son llamadas sistemas de control distribuido (DCS), tiene funciones similares a los sistemas SCADA, pero las unidades de obtención de datos de campo se establecen generalmente dentro de un área confinada.

Un sistema SCADA por otra parte generalmente cubre áreas geográficas más grandes y normalmente depende de una variedad de sistemas de comunicación menos confiables que una LAN. El control a lazo cerrado en esta situación es menos deseable. La adquisición de datos se logra en primer lugar por las RTU que exploran las entradas de información de campo conectadas a ellos (pueden usarse PLC's).

Esto generalmente se hace a intervalos muy cortos. La MTU entonces explora las RTU, los datos se procesan para detectar condiciones de alarma, y si una alarma estuviera presente, sería catalogada y visualizada.

La interfaz primaria al operador es una pantalla que muestra una representación de la planta o del equipo en forma gráfica, los datos se muestran como dibujos o esquemas de primer plano (foreground) sobre un fondo estático, mientras los datos cambian el foreground es actualizado. Los datos analógicos se pueden mostrar como números, o gráficamente, el sistema puede tener varias pantallas y el operador puede seleccionar la más relevante para él en cualquier momento.

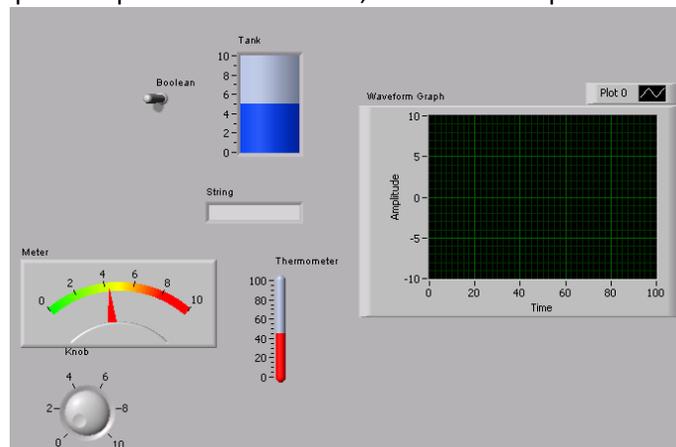


Figura 21 Ejemplo de interfaz hombre-máquina

## 2.5.2 Unidades Maestras (Master Terminal Units)

La parte más visible de un sistema SCADA es la estación central o MTU. Este es el centro del sistema es el componente del cual el personal de operaciones se valdrá para ver la mayoría de la planta.

### 2.5.2.1 Características de MTU

*Adquisición de datos:* recolección de datos de las unidades remotas (RTU)

*Gráficos de tendencia:* salvar los datos en una base de datos, y ponerlos a disposición de los operadores en forma grafica.

*Procesamiento de alarmas:* analizar los datos recogidos de las RTU para ver si han ocurrido condiciones anormales y alertar a personal de operaciones sobre las mismas.

*Control:* lazo cerrado, e indicados por operador.

*Visualizaciones:* gráficos del equipamiento actualizado para reflejar datos del campo.

*Informes:* la mayoría de los sistemas SCADA tienen un ordenador dedicado a la producción de reportes conectados en red (LAN o similar) con el principal.

*Mantenimiento de sistema Mirror:* se debe mantener un sistema idéntico con la capacidad segura de asumir el control inmediatamente si la principal falla.

*Interfaces con otros sistemas:* transferencia de datos hacia y desde otros sistemas corporativos.

*Seguridad:* control de acceso a los distintos componentes del sistema.

*Administración de la red:* monitoreo de la red de comunicaciones.

## 2.5.3 Hardware y Software

Las MTU de sistemas SCADA se pueden implementar en la mayoría de las plataformas existentes. Los primeros sistemas solían ser muy especializados, esto debido a que los requisitos de SCADA superaban los límites de la tecnología disponible en aquellos momentos, a menudo el hardware tenía que ser modificado para requisitos particulares. La serie Digital Equipment Corporation PDP11 y el sistema operativo RSX11M eran usados como una plataforma en los sistemas SCADA, posteriormente, unix comenzó a ser el sistema operativo más frecuente, al tiempo que la PC aumentada, Actualmente han tenido una gran aceptación estaciones de trabajo Unix (QNX o solaris), las cuales son más veloces en sus respuestas.

El uso de PC's se ha generalizado y la industria ha aprovechado el gran progreso que estas ha tenido, de cual podemos destacar; 1supervision de procesos en la que se utiliza fundamentalmente los recursos del procesador para mostrar dinámicamente el funcionamiento de un proceso, 2 El control, en el que el procesador, atreves de interfaces de entrada y salida especificas permite manipular directamente el proceso, 3 El sistema SCADA el que se utilizan las

dos funciones antes mencionadas, para sistemas relativamente complejos en los que generalmente están involucradas comunicaciones.

Los sistemas SCADA están constituidos por el hardware, que generalmente es una red de controladores y estaciones remotas de adquisición de datos. El corazón de un sistema SCADA está en el software SCADA, que es el encargado de supervisar y controlar el proceso a través de una red de PLC (u otros controladores). El software permite supervisar el proceso desde un microcomputador, así como realizar las acciones de control atrás de un controlador, PLC, o sistema de control.

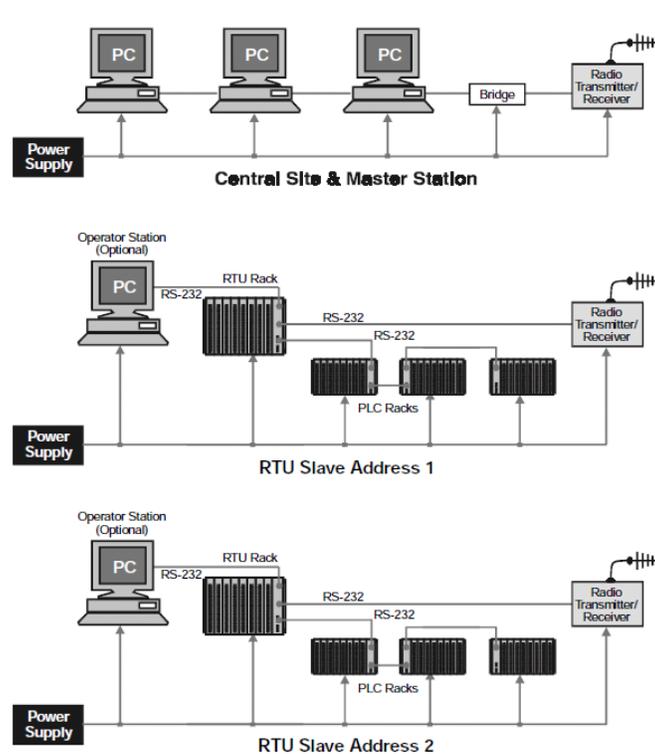


Figura 22 Arquitectura de comunicación de un sistema SADA

### 2.5.4 Terminales Remotas (Remote Terminal Units)

Las unidades terminales remotas consisten en una pequeña pero robusta computadora que almacena datos y los trasmite a la terminal maestra para que esta controle los instrumentos. Hay dos tipos básicos de RTU, "single boards" (de un solo modulo), compactos que contienen todas las entradas de datos en una sola tarjeta, y "modulares" que contienen un módulo CPU separado, y pueden tener otros módulos agregados, normalmente enchufados en una placa común.

Una RTU single board tiene normalmente I/O fijas, normalmente no es posible ampliar su capacidad.

Un RTU modular se diseña para ser ampliado agregando con módulos adicionales. Los módulos típicos son de 8 entradas analógicas y de 8 salidas digitales.

La mayoría de terminales incluyen software embarcado que integra potentes recursos de comunicación y supervisión, sin necesidad de programación específica. La mayor parte de las RTU tiene como características principales:

- Comulación a traves de la red telefónica o móvil, radio enlaces, líneas dedicadas, bus de campo
- Adquisición y mando (señales digitales, analógicas, conteos)
- Capacidad: entre 280 y 700 variables
- Procesamientos y automatismos parametrables
- Almacenamiento de datos a largo plazo
- Alerta hacia estaciones maestras
- Enlaces entre instalaciones
- Compatibilidad con otros productos
- 

El hardware de una RTU tiene los siguientes componentes:

- CPU y memoria volátil (RAM)
- Memoria no volátil para grabar programas y datos
- Capacidad de comunicaciones a través de puertos seriales o veces con modem incorporado
- Fuente de alimentación segura (con batería)
- Watchdog timer (que asegure reiniciar el RTU en caso de falla)
- Interfaces de entrada y salida a DI/DO/AI/AO.
- Reloj de tiempo real

# CAPÍTULO 3

## ANÁLISIS DE LA CELDA Y REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

En este capítulo se analiza la celda dinamométrica, sus secciones y los requerimientos necesarios de funcionamiento

### 3.1 Celda Dinamométrica.

Para determinar los valores y parámetros de un motor de combustión interna, como el torque, la velocidad, el flujo de gasolina y de aire, las emisiones contaminantes, la presión en el cilindro, la temperatura del refrigerante, la temperatura del aceite, entre otros valores, es necesario el uso varios instrumentos de medición [9].

Algunas mediciones son fáciles de obtener y medir, La temperatura es fácilmente medible con la inserción de termoacopladores o termistores, pero de algunas más allá de su medición, necesitan de su análisis para obtener el resultado deseado.

El uso de microprocesadores y de sensores modernos ha permitido el uso de sistemas de control, que permiten mejoras en la eficiencia del motor, como el eficiente consumo de combustible y la reducción de emisiones contaminantes, lo cual lleva a un ahorro económico, y el cuidado del medio ambiente.

Las celdas de pruebas son un conjunto de varios sistemas que miden diferentes aspectos del motor.

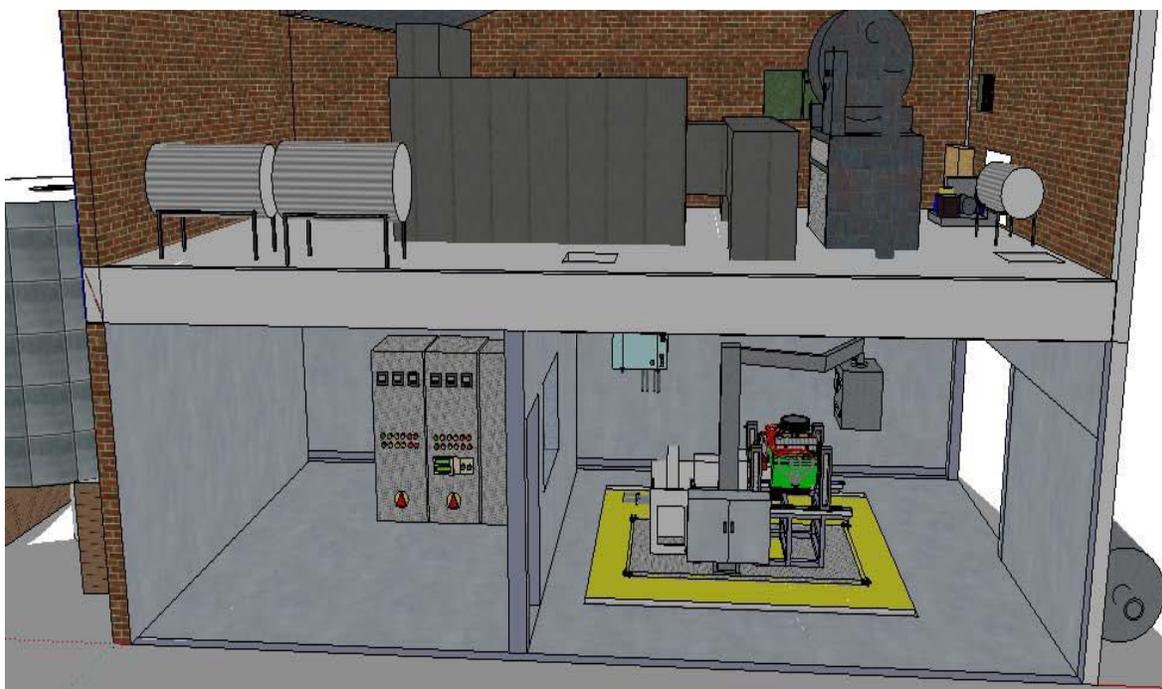


Figura 23 Celda Dinamométrica

### 3.2 Secciones de una Celda Dinamométrica

La celda dinamométrica se divide en tres secciones principales las cuales son:

- Zona de ensayos
- Zona de control
- Zona de abastecimiento

### 3.2.1 Zona de Ensayos

Es la parte de la celda donde se encuentran el motor y los dispositivos para simular las condiciones ambientales, así como también se encuentran diversos sensores y dispositivos de medición, necesarios para el análisis del motor.



Figura 24 Zona de Ensayos

La zona de ensayos es una habitación que cuenta con sistemas de seguridad tanto para la misma habitación como el operador, así como un sistema anti incendios, sistemas de inyección y extracción del aire, ya el motor necesita aire para poder llevar a cabo la combustión, pero la acumulación de gases puede ser nociva, así es que necesita ambos sistemas.

La zona pruebas cuenta con los siguientes sistemas:

- Motor de pruebas
- Freno dinamométrico
- Caja de conexiones
- Torre de enfriamiento
- Escape del automóvil
- Dosificador de combustible
- Sensor de emisión de gases
- Sensor de humedad

- Sensor de presión atmosférica
- Botones de paro de emergencia
- Gabinetes interbus
- Servomotor para el acelerador
- Pedal de acelerador
- Relevadores de control
- Suministro de agua
- Suministro de presión atmosférica
- Suministro de refrigerante

### 3.2.2 Zona de Control.

En esta zona es desde donde se controla y monitorea la celda, cuenta con dos gabinetes con dispositivos de control, mando y señalización de los equipos que intervienen en la prueba del motor, es aquí donde se encuentra el botón de paro general, esta zona y la zona de ensayos, están separadas, por lo cual en esta existe una ventana a través de la se puede observar al interior de la zona de ensayos.

Los gabinetes son para el funcionamiento de los dispositivos que se encuentran en la zona de ensayos, uno controla los dispositivos de forma manual, y el otro es para la parte autónoma, que era controlado por el programa de control en VW Puebla



Figura 25 Zona de control

### 3.2.3 Zona de Abastecimiento

La zona de suministros se encuentra en la parte superior del laboratorio y en es en que se encuentran los sistemas de suministro, de agua, gasolina, refrigerante, el equipo de circulación de aire, y el gabinete de control, el cual administra al alimentación eléctrica y comunicas a estos elementos con el área de control.

La zona abastecimiento cuenta también con elementos como válvulas, compresores, bombas, demás sistemas para que estos puedan ser suministrados a la zona de ensayos.

#### 3.2.3.1 Elementos de la zona de suministros



Catalizador



Gabinete de tensión y centro de cargas



Chiller



Tanque de gasolina



Soplador



Interconexiones con el panel principal



Figura 26 Zona de elementos de la zona de suministros

### 3.3 Requerimientos Funcionales

- La temperatura no debe de sobrepasar los 70°C.
- El encendido y apagado del Chiller debe hacerse de manera automática en función de la temperatura.
- El sistema funciona a 440V.
- El sistema debe contar con al menos 40 litros de agua para evitar cavitación, que puedan provocar daños a la bomba del chiller.
- Se debe contar con sistema de paro local enlazado al chiller de forma que se puede apagar el Chiller en caso de falla o automáticamente. Así mismo debe de estar conectado al paro general, para que en caso de emergencia detener el suministro de agua al freno, ya que dañaría a esto por cuestión de choque térmico.
- La presión del agua debe de ser al menos de 4 bar a la entrada del freno dinamométrico, óptimamente la presión debe de ser de 6 bar.
- El encendido y el control del sistema de suministro de agua y enfriamiento del freno dinamométrico debe ser centralizado en el tablero principal.

# CAPÍTULO 4

## MODELADO Y DESARROLLO

## DEL CONTROLADOR

En este capítulo se desarrolla el sistema de control para la bomba centrífuga, que bombea agua al sistema de enfriamiento, así como también se simularán los resultados en simulink

## 4.1 Sistema de Bombeo de Agua

La celda dinamométrica necesita ser enfriada por medio de un flujo de agua, la cual es bombeada desde el exterior, por una bomba centrífuga, está a su vez es impulsada por un motor trifásico de inducción, la presión a la entrada del sistema debe de ser d 4 bar, y el agua debe estar a una temperatura de 25°C, y a la salida debe de haber una presión de 2bar y una temperatura de 35°C.

Componentes de sistema y características del sistema:

1. **Tubería:** 2" de diámetro de PVC
2. **Motor trifásico de inducción para bomba 1 de tanque a la celda (figura 27)**
  - V=220 ca 9.08A
  - frecuencia:60Hz
  - RPM=3440
  - potencia: 3HP
  - factor de potencia  $\cos \phi= 0.82$
  - nivel de aislamiento clase B
3. **Bomba 2 de la torre de enfriamiento al tanque (figura 27)**
  - V= 127 ca
  - Frecuencia: 60 hz
  - RPM=3400
  - Potencia: 3/4HP
  - $Q_{\max}=100\text{L}/\text{min}$
  - $H_{\max}=25\text{m}$
  - Capacitor=25 $\mu\text{F}$
4. **Torre de enfriamiento**
5. **Tanque de agua**

El objetivo es mantener una presión de agua en la tubería de entrada de 4 bar para mantener a una temperatura (máx. 70°C) segura la celda

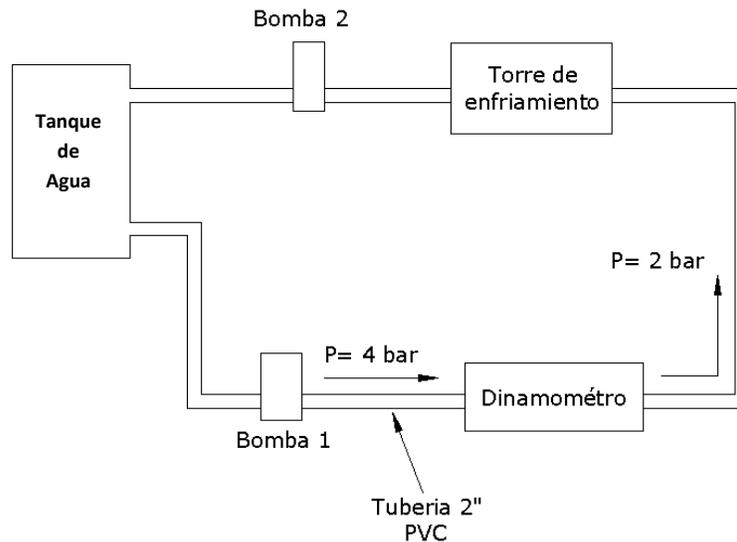


Figura 27 Sistema de enfriamiento

## 4.2 Calculo tubería y bomba

Requerimientos del sistema:

$L(\text{longitud}) = 23\text{m}$

$D(\text{Diámetro}) = 2''$

$Q(\text{caudal}) = 35\text{gal/min}$

Accesorios = 9 codos 90° estandar

Formula de general de la energía (Ec. de Bernoulli):

$$\frac{P_A}{\gamma} + z_A + \frac{v_A^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{P_B}{\gamma} + z_B + \frac{v_B^2}{2g} \quad \text{ecuación 1}$$

donde:

$\frac{P}{\gamma}$  = carga por presión en el punto A y B P=presión,  $\gamma$ = peso específico del fluido

Z= carga por elevación

$\frac{v^2}{2g}$  = carga por velocidad (v= velocidad del fluido, g= gravedad)

$h_A$ =Carga del sistema (Bomba)

$h_L$ =perdidas de carga por longitud y accesorios( $h_{L1} = h_{L1} + h_{L2}$ )

Los cálculos se realizan tomando en cuenta en fluido de nuestro sistema en este caso agua, y la temperatura a la que se encuentra en este caso tomaremos una temperatura de 25°C[11].

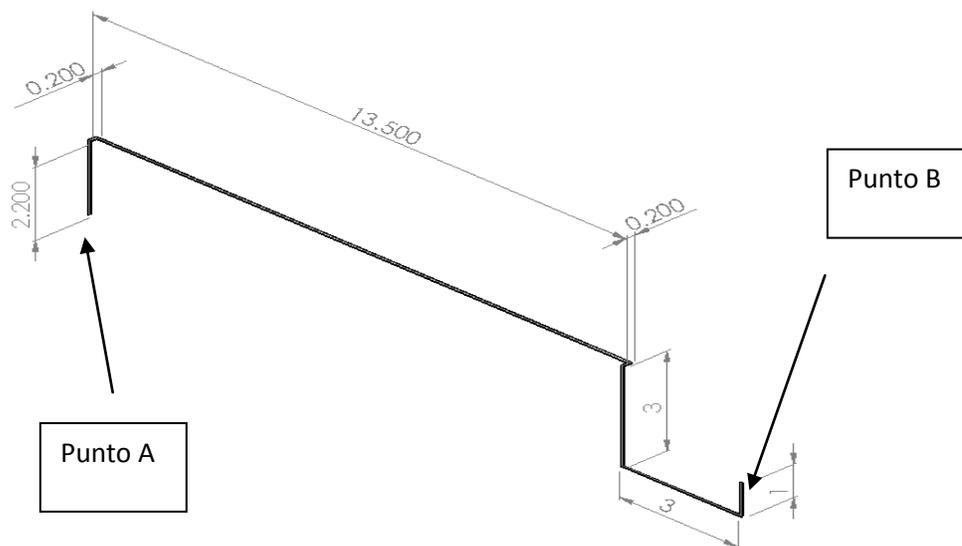


Figura 28 Tubería del sistema de enfriamiento

A continuación despejamos la presión en el punto quedando de la siguiente forma:

$$P_A = P_B + \gamma[(Z_B - Z_A) + h_L] \quad \text{ecuación 2}$$

Debido a que el caudal es el mismo en ambos puntos se elimina el término  $\frac{v^2}{2g}$  y  $h_A$  es la altura proporcionada por algún medio, en este caso no tenemos ningún medio que impulse entre estos puntos el fluido por lo tanto igualmente es cero.

Para calcular las pérdidas en la tubería hay que calcular las pérdidas por fricción a lo largo de la tubería y las pérdidas por accesorios [11].

$$h_{L1} = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad \text{ecuación 3}$$

Dónde:

f= coeficiente de fricción

L= longitud de la tubería

D= diámetro de la tubería

v= velocidad

g= gravedad

Para obtener el coeficiente de fricción es necesario obtener el número de Reynolds, para saber si el flujo es laminar o turbulento [11].

$$N_R = \frac{vD}{\nu} \quad \text{ecuación 4}$$

Dónde:

v= velocidad

D= diámetro

$\nu$ =viscosidad cinemática en  $m^2/s$

$$= \frac{(1.089 \text{ m/s})(0.0508\text{m})}{8.84 * 10^{-7} m^2/s} = 6.188 * 10^4$$

Al ser mayor a 4000 el número de Reynolds, se sabe que es un flujo turbulento por lo tanto para obtener el coeficiente de fricción se puede consultar el diagrama de Moody o aplicar la siguiente fórmula:

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3.7(D/\epsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2} \quad \text{ecuación 5}$$

Dónde:

$\frac{D}{\epsilon}$  = relacion diametro(D) y rugosidad( $\epsilon$ )

$(D/\varepsilon)$  Es una relación entre el diámetro de la tubería y la rugosidad del material este caso la rugosidad del PVC es de  $1.5 \times 10^{-6} \text{m}$ .

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3.7(3.38 * 10^4)} + \frac{5.74}{(6.188 * 10^4)^{0.9}} \right) \right]^2} = 0.0199$$

Una vez obtenido el coeficiente de fricción sustituimos valore en l ecuación 3

$$h_{L1} = 0.019 * \frac{23\text{m}}{0.0508\text{m}} * \frac{(1.089\text{m/s})^2}{2g} = 0.544\text{m}$$

Ahora hay que obtener las perdidas por accesorios (7 codos)

$$h_{L2} = f * \frac{L_e}{D} * \frac{v^2}{2g} \text{ ecuación 6}$$

$L_e$  es una relación para los accesorios y representa la longitud equivalente en diámetro la cual tiene un valor de 30 para codos de  $90^\circ$  estándar.

$$h_{L2} = 0.019 * 30 * \frac{(1.089\text{m/s})^2}{2g} * 7 = 0.24\text{m}$$

Por lo tanto las pérdidas en metros totales son:

$$h_L = 0.24\text{m} + 0.544\text{m} = 0.78\text{m}$$

Se sabe que la presión necesaria en el punto B debe de ser de 4 bar (400MPa), así que se sustituyen valores en la ecuación 2 para cual debe ser la presión en el punto A.

$$P_A = 400 + 9.78[(1) + 0.78] = 417.4\text{KPa}$$

Para obtener la potencia que el motor transmite al fluido es necesario saber la altura que alcanza para lo cual usamos la ecuación 1

$$\text{Pot} = h_A \gamma Q \text{ ecuación 6}$$

$$h_A = \frac{400}{9.78} + 1 + \frac{1.089^2}{2 * 9.81} - 0.78 = 42.74\text{m}$$

$$\text{Pot} = 41.9 * 9.78 * 2.207 * 10^{-3} = 0.905\text{Kwatts} \\ = 1.21\text{hp}$$

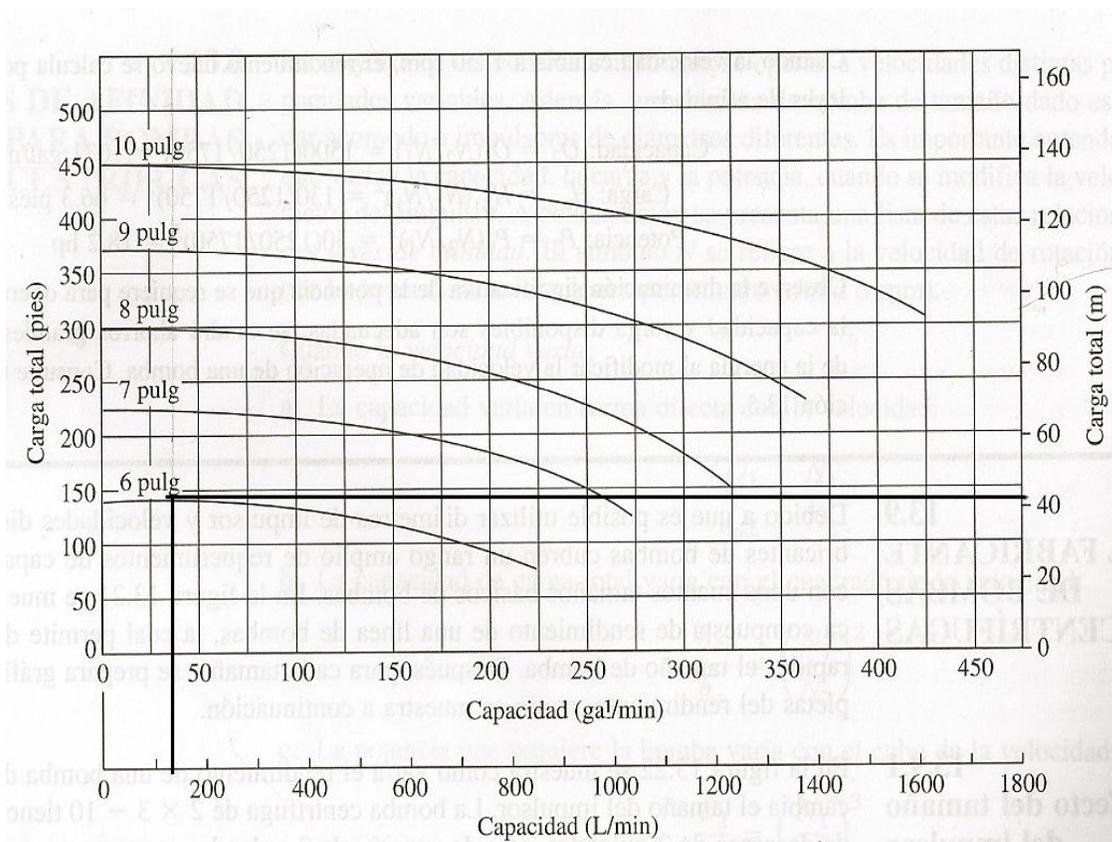


Figura 29 Curvas Para una Bomba 2x3-10 a 3450 RPM [12]

Si comparamos la altura que nos proporciona la bomba según los cálculos realizados según los datos proporcionados por el laboratorio de la celda dinamométrica y el valor de la curva característica de una bomba de características similares a la que se tiene en el sistema podemos ver que son similares aproximadamente 42 metros para un diámetro de impulsor de seis pulgadas.

### 4.3 Modelado y Control de la Presión

Se siguen los pasos sugeridos en el método de diseño orientado a objetos estructurados para sistemas de tiempo real estricto HRT-HOOD, proceso iterativo centrado en la etapa de diseño (Fig. 31) de amplia utilización en esta área.

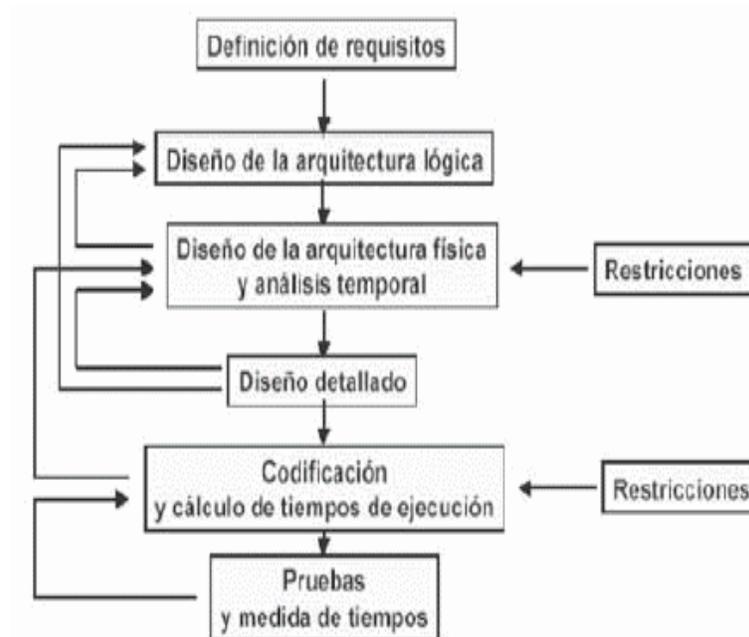


Figura 30 Proceso de Desarrollo Interactivo

En las aplicaciones en tiempo real se considera el soporte debido al sistema operativo.

#### Requisitos

Se definen los funcionales y no funcionales, tomando como caso de estudio la PPC [1] manejada por una computadora Pentium III de 450 MHz. Tiene una aplicación en LabView™ bajo Windows™, ubicada en el Laboratorio de la SEPI ESIME Unidad Azcapotzalco. Consta de dos tanques, dos bombas a la salida de cada uno de ellos (Figura 29), varios equipos de medición y 2 válvulas neumáticas para las acciones de control (FCV-01, PCV-03). Todas las salidas de los medidores pasan por acondicionadores de señal y entran a la computadora, donde está el programa de aplicación con instrumentos virtuales que contempla: manejo manual de la planta, determinación de la respuesta al escalón y uso de instrumentos de medición.

#### Requisitos funcionales

Se puede dividir en dos componentes: operación real e interacción con el operador. Todos los eventos deben ser almacenados en un archivo de datos y recuperados cuando así lo requiera el operador, para su posterior estudio, utilizando una computadora portátil.

Operación Real. Permitirá la operación en tiempo real de los diferentes lazos abiertos o cerrados (individual o multivariable) que conforman la planta: caudal en la tubería, presión en Bomba 1, nivel en Tanque 2. También se encuentra el control de seguridad de las bombas. Para operar físicamente el sistema se debe realizar programas puentes entre las dos computadoras, como instrumentos virtuales, funciones o procedimientos que permitan esta comunicación.

#### Arquitectura del Sistema

El diseño de la arquitectura se define en dos fases, la primera el diseño de la arquitectura lógica que se avoca a la definición de compromisos con los requisitos funcionales, y la segunda, la arquitectura física donde se incorporan los requisitos temporales y la planificación.

Arquitectura lógica

Descomposición de primer nivel. Los requisitos funcionales sugieren nueve (9) subsistemas, según se muestra en la Fig. 32.

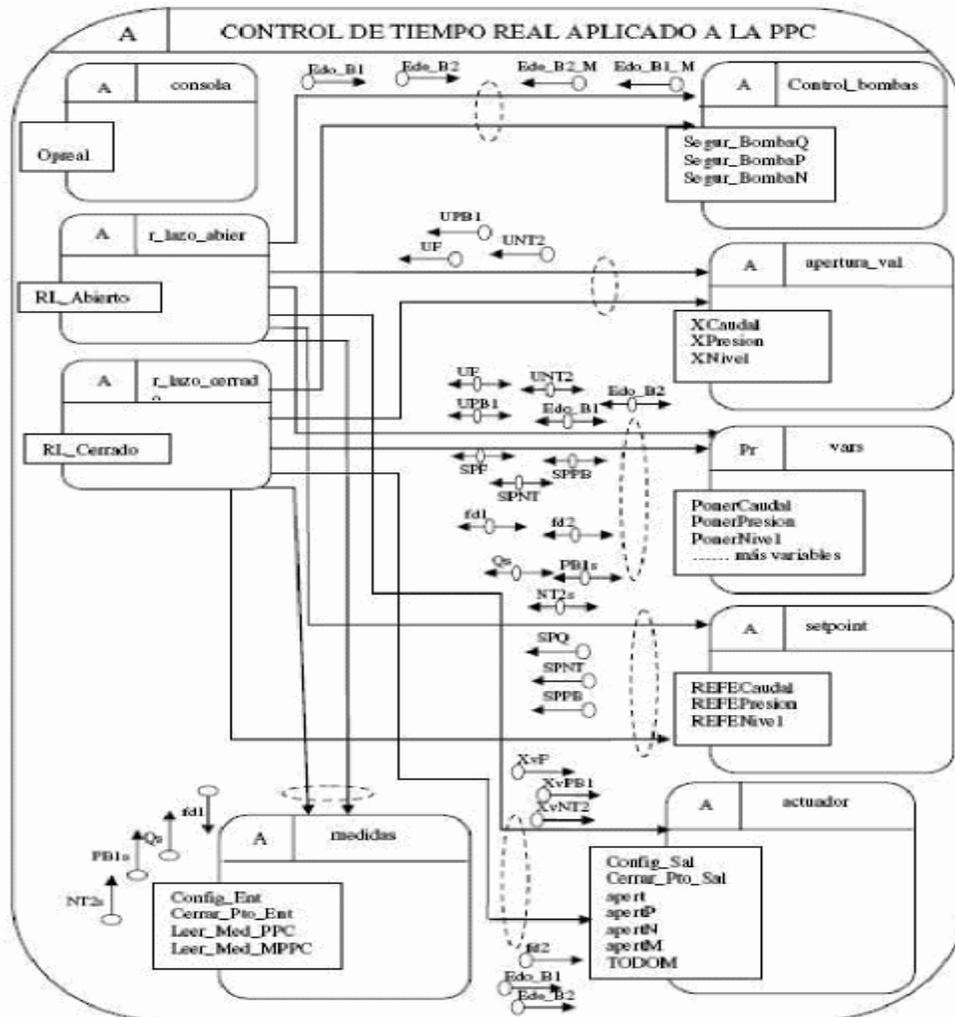


Figura 31 Descomposición jerárquica de primer nivel

Subsistema Consola. Responsable de la interfaz con el operador, al invocar Opreal (figura 31). Llama a las operaciones: RL\_Abierto de rlazo\_abier y RL\_Cerrado de rlazo\_cerrado

Subsistema r\_lazo\_abier y r\_lazo\_cerrado (figura 31). Aquí se encuentran las tareas periódicas necesarias para operar físicamente los diferentes lazos de la PPC, y están los controladores discretos de los tres lazos planteados.

La presión y caudal de la bomba está dada en función de las rpm del impulsor el cual gira a la misma velocidad que el eje del motor, para lo cual existen varios métodos de variar la velocidad del motor, como la variación de la frecuencia, voltaje en la línea, resistencia en el rotor (solo para motores de anillos deslizantes), control vectorial V/F.

La velocidad síncrona de un motor de inducción está dada por[12]:

$$n = \frac{120f}{p}$$

Dónde:

n= velocidad en rpm

f=frecuencia

p= número de polos

Todos los motores tienen un deslizamiento de velocidad, y por lo regular es menor a 5% en motores de alta velocidad, y puede llegar a un 20% en motores de baja velocidad.

Al modificar la velocidad de un motor por medio de cualquier método, se modifica también el par del motor.

En nuestro caso al tener un motor de dos polos a una frecuencia de 60hz tenemos que la velocidad síncrona del motor es:

$$n = \frac{120 * 60}{20} = 3600$$

Pero debido al deslizamiento se llega normalmente a una velocidad aproximada de 3440

Una forma de mantener el motor a una velocidad constante es mantener a un voltaje constante el motor, esto para mantener el par electromagnético constante.

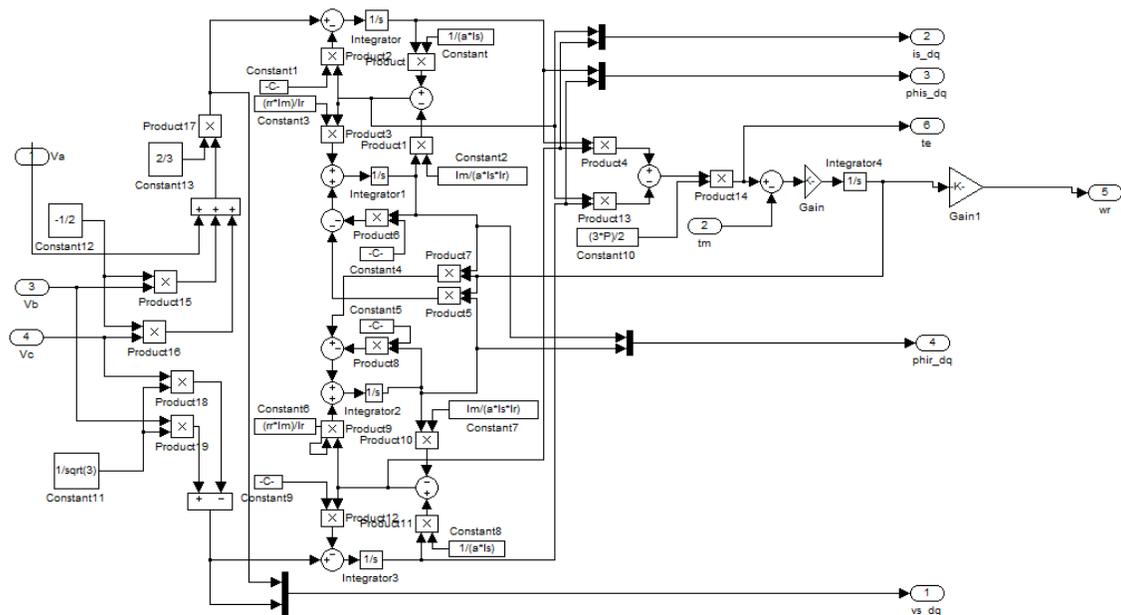


Figura 32 Modelo Motor [12]

Para la sintonización se ocupó el primer método de Ziegler – Nichols que consiste en:

Obtener los datos del sistema a sintonizar.

Obtener el valor T de la pendiente de la curva.

Obtener el valor L del retraso de la curva obtenida.

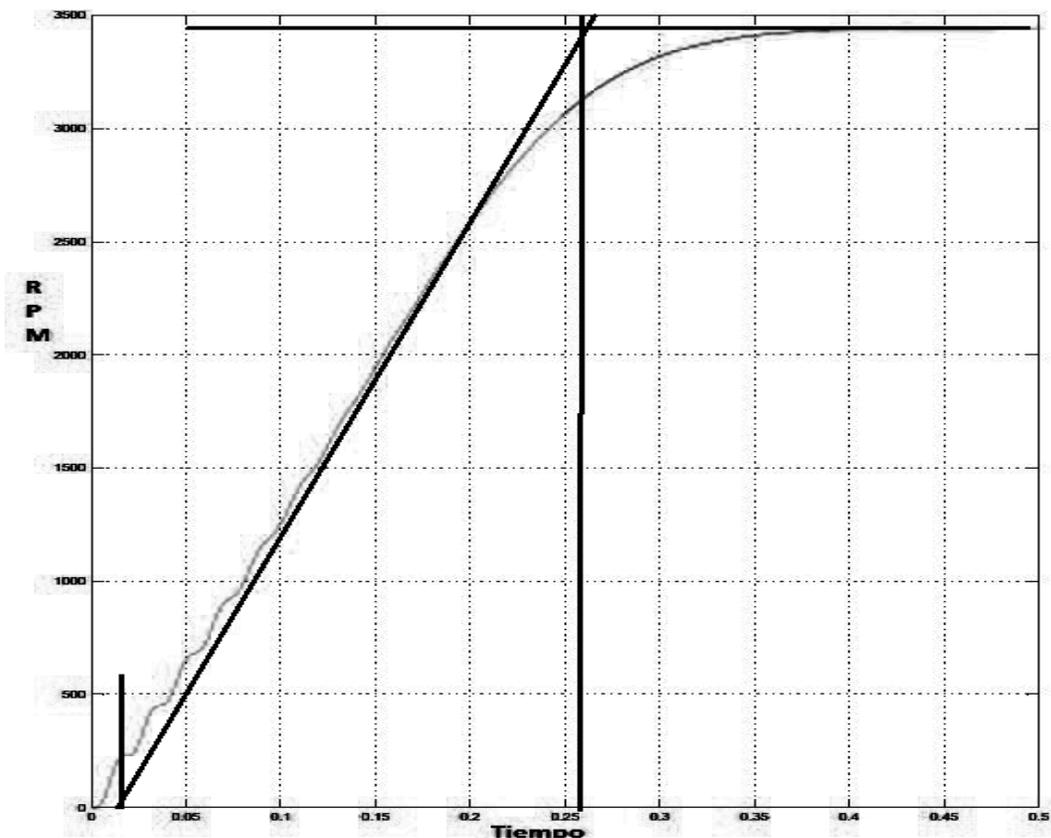


Figura 33 Obtención de los valores T y L

Los valores obtenidos son:

$$T = .23s$$

$$L = 0.013s$$

Tomando como base estos datos, todavía se pueden seguir afinando los valores del controlador, ya que este método sólo nos da una aproximación de los valores que se deben ocupar para tener un sistema bien controlado. Tomando en cuenta dichos valores tenemos los siguientes valores:

$$K_p=20.4$$

$$t_i=0.026$$

$$t_d=0.0065$$

Ocupando los valores obtenidos, se realizó la sustitución de los mismos en el modelo anteriormente obtenido en Simulink en el cual se obtuvo que las revoluciones del motor oscilan entre 3434 y 3436, el valor deseado es de 3440, por lo cual podemos ver que el resultado del control es bueno, ya que nos aproximamos demasiado al set point.

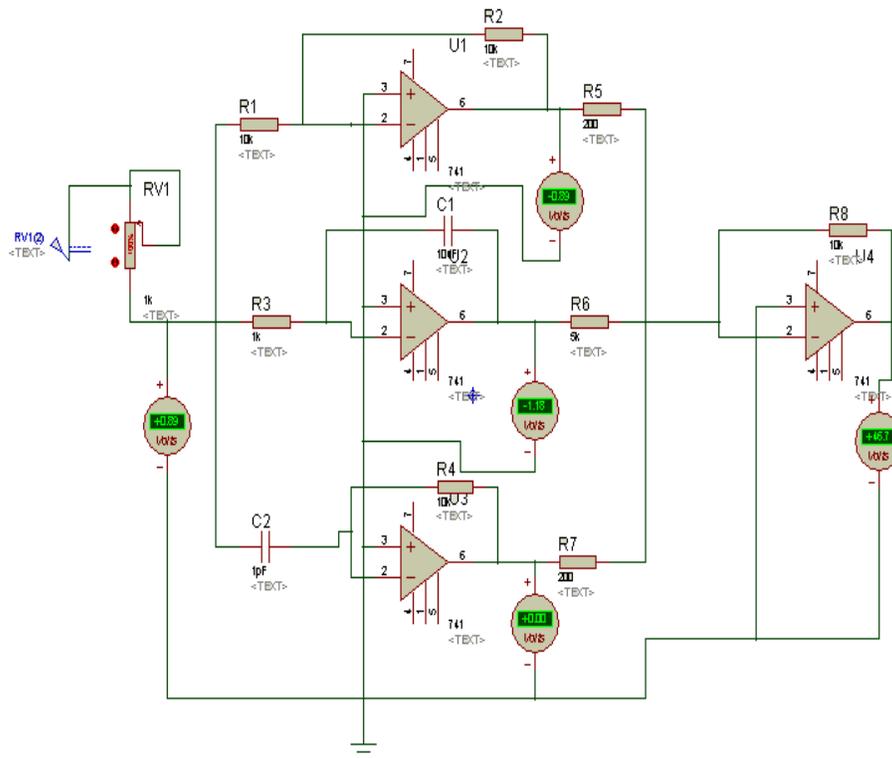


Figura 34 Control PID

Al mantener la velocidad del motor constante, el caudal y la presión que suministra la bomba serán de igual manera constantes, alcanzando una presión de 4.17 Bar con el sistema controlado a la salida de la bomba la cual debe ser mayor en este punto y que debido a las pérdidas esta tiende a caer ligeramente durante su recorrido y finalmente llegara a una presión de 4Bar en la entrada al dinamómetro.

Para el motor se aplicaron lo siguientes parámetros, los cuales fueron consultados de un motor de características similares en potencia, voltaje, y velocidad

*Resistencia en el estator* =  $R_s = 3.53\Omega$

*Resistencia en rotor* =  $R_r = 2.619\Omega$

*Inductancia en estator*  $L_s = 6.94e - 3H$

*Inductancia rotor* =  $L_r = 0.0058H$

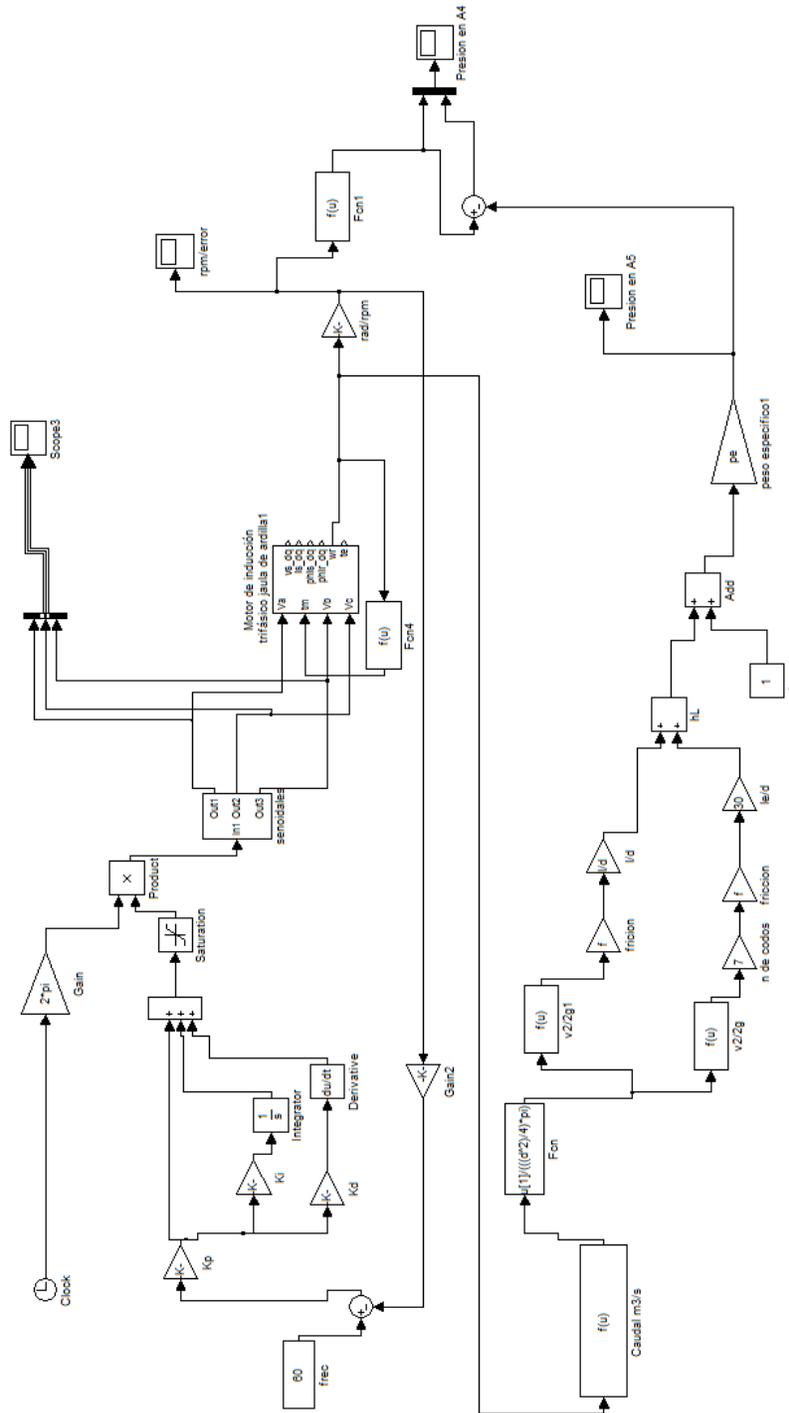


Figura 35 Diagrama simulink del sistema de enfriamiento

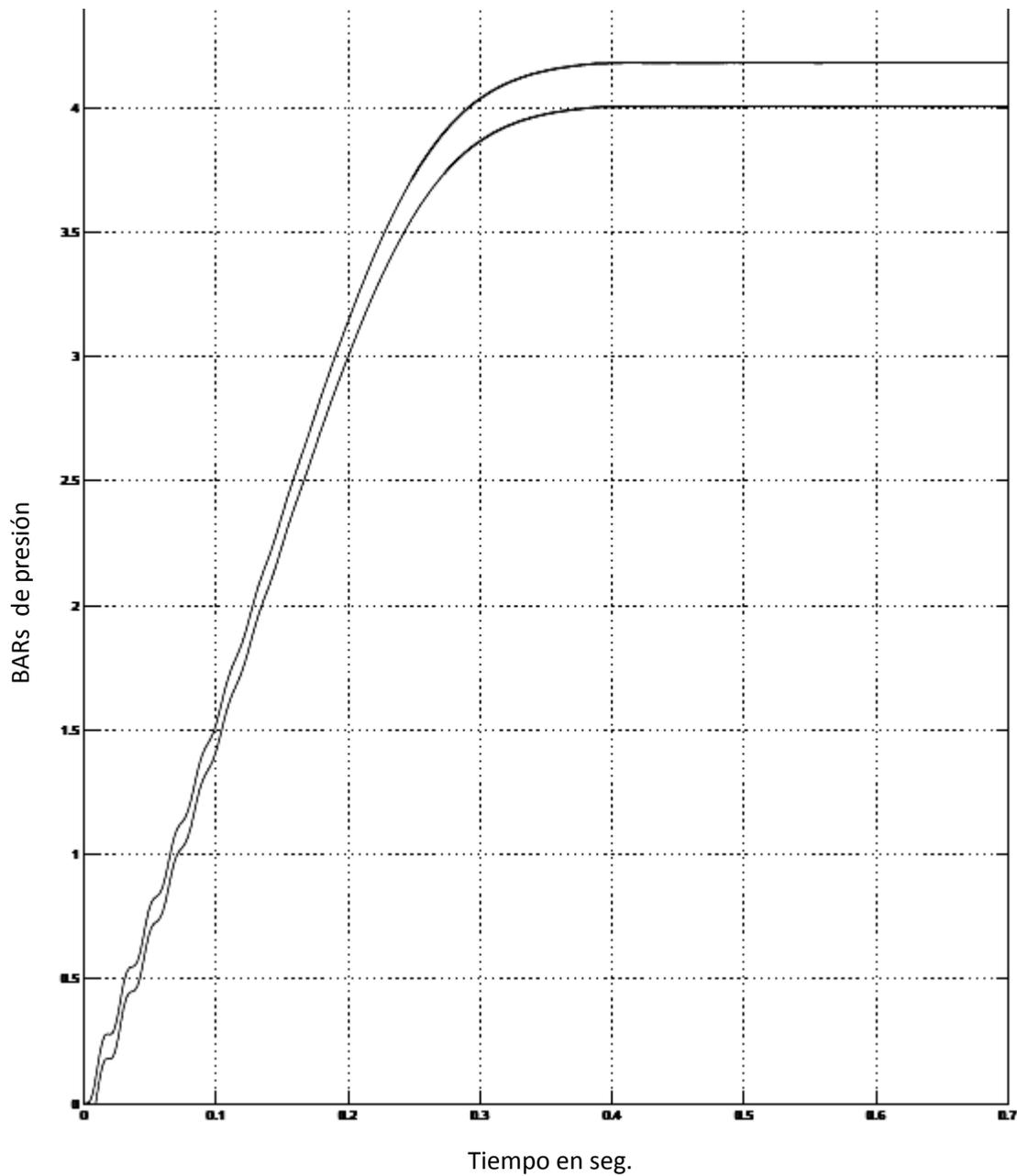


Figura 36 Simulación del sistema a la salida de la bomba y a la entrada del dinamómetro

En la grafica de la figura 35 se observa la caída de presión que hay entre la salida de la bomba y la entrada de dinamómetro debido a las pérdidas que esta tiene debido a la fricción y a los accesorios que se encuentran en la tubería.

La presión alcanza en un tiempo de respuesta de alrededor de 0.4 s y se aproxima al valor deseado teniendo un error del 2% al igual que en la velocidad del motor esto debido a las leyes de afinidad de las bombas.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$
$$\frac{H_1}{H_2} = 2 \left( \frac{N_1}{N_2} \right)$$
$$\frac{P_1}{P_2} = 3 \left( \frac{N_1}{N_2} \right)$$

Dónde:

Q= caudal en m<sup>3</sup>/s

N= velocidad del motor rpm

H= altura en metros

P= potencia Kw

# CONCLUSIONES

## Conclusiones

El trabajo se llevó a cabo con el fin de realizar la automatización del sistema de bombeo de agua de la celda dinamométrica, el cual es el que suministra agua a la celda, con el fin de enfriar la celda y así mantener una temperatura correcta de funcionamiento, ya que de no ser así, el sistema puede resultar afectado, y teniendo en cuenta que el equipo tiene un costo muy elevado, la automatización del mismo ayudaría a mantener el sistema de enfriamiento funcionando correctamente y de manera automática sin tener que tener necesariamente al operador, al tanto del sistema.

Utilizando el 1er método de Ziegler – Nichols se obtuvieron los valores de sintonización, los cuales ya implementados dieron resultados muy parecidos a los esperados, lo que los vuelve “satisfactorios”.

Se programó y se simuló un controlador industrial que cumple los requisitos exigidos por VW, a saber que no importando el régimen de funcionamiento del motor, la presión del fluido a la entrada debe ser de 4 bar por sugerencia de operación para tener un correcto funcionamiento del freno dinamométrico. Además que al menos el tiempo de muestreo sea dos veces más rápido que el tiempo de respuesta del sistema, que es de 0.75 s. [no se trabajó en el tiempo de muestreo]

Se realizaron numerosas pruebas a fin de validar el trabajo realizado, tanto matemática como físicamente.

La implementación de la solución propuesta es de fácil acceso y comprensible, ya que se utilizó un lenguaje gráfico, asegurando así un gasto menor en la inversión respecto a la capacitación de los operadores del mismo.

Se trata de tecnología abierta y es escalable ya que se pueden ir agregando tantas variables de entrada y salida como lo permita el hardware ocupado. Como se había comentado en el párrafo anterior, no se necesita de un técnico especialista para manipularlo, modificar los valores de PID y el set point, así como para darle mantenimiento, ya que la interfaz es relativamente sencilla para alguien que está ligeramente familiarizado con el proceso.

Como trabajos futuros serían, el desarrollo de un sistema SCADA, el cual involucra, el control, monitoreo y la adquisición de datos, con el cual se tendría un sistema más completo, y en el cual el usuario de la celda tendría una interfaz más amigable en la cual ver el estado de sistema.

Debido a que se desarrolló un método escalable se pueden hacer mejoras e implementaciones de los otros sistemas que componen la celda, sin necesidad de realizar una inversión mayor.

Se espera realizar un estudio de factibilidad para incorporar el sistema de monitoreo y control vía web, de manera también inalámbrica, para suprimir los cables y reducir costos en este aspecto.

Gracias a la obtención del modelo de la bomba y de los valores de ganancias, se podría realizar un PID digital de menor costo para lo que se debe trabajar con la linearización del sistema.

Implementar filtros analógicos y/o digitales para evitar perturbaciones mayores en casos extremos de cambios bruscos de RPM.

# ANEXOS





A continuación se muestra una sección del programa del controlador de la celda, llamado “lazo\_cerrado.ads”, referente a la presión:

```
package r_lazo_cerrado is

task OP_PRIN_C is

entry RL_Cerrado; -- Entrada a lazo cerrado

end OP_PRIN_C;

...

task C_CAUDAL is

pragma Priority (system.Priority'_last);

entry C_Flujo;

end C_CAUDAL;

task REAL_RQ is

pragma Priority (system.Priority'_last-1);

entry Caudal_rr;

end REAL_RQ;

task CTRLR_CAUDAL is

pragma Priority (system.Priority'_last-2);

entry CR_Caudal;

end CTRLR_CAUDAL;

...

end r_lazo_cerrado;
```

La tarea CTRLR\_CAUDAL es donde se implementa el controlador digital, su código puede ser modificado para adaptarlo a otro algoritmo de control, sin necesidad de cambiar todo el sistema.

A continuación se presenta el cuerpo de esta tarea:

```
task body CTRLR_CAUDAL is

Qct, SPQC, e1Q, e0Q, S1Q, S0Q: Float:= 0.0;

Proxima_Vez: Time;

begin

accept CR_Caudal; -- Entrada de la tarea

Fin:= Var.RSALIR;

while (Fin=false) loop

Var.LeerCaudal (Qct);-- Leer caudal de la PPC

SPQC:=Var.retor_RQ; -- Leer el setpoint indicado

e1Q:= SPQC - Qct; -- Magnitud del error

-- Controlador lazo de caudal --

S1Q:= S0Q + 263.1578*e1Q - 261.10526*e0Q;

S0Q:= S1Q;

e0Q:= e1Q;

Var.Apertura_Q (S1Q); -- Nueva apertura FCV-02

Visor.Escribe_Dato (S1Q);new_line;

Proxima_Vez:=Clock + Intervalo; -- Próximo período

delay until Proxima_Vez; -- Esperar

Fin:= Var.RSALIR;
```

```
end loop;
```

```
end CTRLR_CAUDAL;
```

El paquete VARS implementa la comunicación de variables mencionada anteriormente. A continuación se muestra un trozo de la especificación del paquete.

```
package VARS is
```

```
protected type VARIABLES is
```

```
procedure PonerCaudal (valor: in float);
```

```
procedure LeerCaudal (valor: out float);
```

```
...
```

```
private
```

```
Qs,PB1s,NT2s:float;
```

```
...
```

```
end VARIABLES;
```

```
end VARS;
```

## Referencias bibliográficas

- [1] Técnicas del Automóvil: motores/ J.M. Alonso, 10 ed. editorial Paraninfo
- [2] Mecatrónica: Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica / W. Bolton, 3a ed , México Alfaomega
- [3] Introducción a la Mecatrónica y los Sistemas de Medición/ David G. Alciatore, Victor Campos Olguin, 3a ed, México McGraw Hill
- [4] Internal combustion engine fundamentals/ Heywood, Jhon , New York McGraw Hill 1988
- [5] Los sensores en el automóvil/ Erich Zabler, edicion 2002, Robert Bosh GmbH, Alemania
- [6] Ingeniería de Control Moderna/ Ogata Katsuhiko, 5 ed, Madrid, Pearson
- [7] Introducción al Proyecto de Producción: ingeniería concurrente para el diseño de producto/ salvador Capuz Rizo, Alfaomega 2001 México
- [8] Tesina : Implementación y Monitoreo de un Sistema Anticongelante para una Celda Dinamométrica / Hernández Baylon Vered , IPN, México 2010.
- [9] Monitoreo de una Celda Dinamométrica en el Proceso de pruebas Automotrices VW/ López Islas José Alberto, IPN, México 2010
- [10] Motores de Gasolina/ Jean Thonon, 3a Ed, Alfaomega 1996
- [11] Mecánica de Fluidos/ Mott Robert, 6ta ed, Person Education, México 2006
- [12] Maquinas Eléctricas y técnicas modernas de control/ Ponce Cruz Pedro, 1ra ed, Alfaomega, México 2008