

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



## **Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“SISTEMA HIDRÁULICO DE PRESIÓN CONSTANTE  
UTILIZANDO VARIADOR DE VELOCIDAD”**

### **EXAMEN DE GRADO (COMPLEXIVO)**

Previa a la obtención del grado de:

**INGENIERA EN ELECTRICIDAD  
ESPECIALIZACIÓN ELECTRÓNICA**

**MERCEDES ELIZABETH CEDEÑO MONTESDEOCA**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO: 2015**

## AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios porque es fiel a sus promesas, soy la niña de sus ojos.

Gracias a mis padres, Luis y Rita, ejemplos de compromiso, constancia y de integridad.

Gracias a mi esposo, Manuel, por su amor y compañerismo demostrado en todo momento.

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis hijos:

Rommel, Jonathan, Noemí y Manuel Elías.

Siempre podremos superarnos a nosotros mismos.

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

.....  
**Ing. Luís Fernando Vásquez Vera**

PROFESOR DELEGADO

POR LA SUBDECANA DE LA FIEC

.....  
**Ing. Elio Sánchez**

PROFESOR DELEGADO

POR LA SUBDECANA DE LA FIEC

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en este Informe me corresponde exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Mercedes Elizabeth Cedeño Montesdeoca

.....  
Nombre del Autor

## RESUMEN

En las instalaciones de provisión de agua potable, de cualquier capacidad, siempre se requiere que el suministro al usuario mantenga un nivel de presión constante independientemente de la demanda existente, sobre todo en sistemas de uso continuo: hoteles, centros comerciales, edificios de oficinas, condominios, hospitales, etc.

Este trabajo propone la implementación de un control automático que garantice una presión constante, en un sistema de provisión de agua, usando para ello variadores de velocidad. El control eléctrico se completa con los guardamotores, contactores, breakers para la fuerza; relés, PLC, transmisor de presión y otros elementos para el control automático.

La variable de proceso que va ser controlada en este caso es la presión de agua del sistema. Al producirse una variación en el consumo de agua, el PLC recibe la señal del sensor de presión (transmisor) y la compara con el valor de presión deseado (prefijado). Esta comparación resulta en un valor de error, que el PLC utiliza para ordenar al variador que aumente o disminuya la velocidad del motor, lo que se

traduce en una variación del caudal que proporcionan las bombas corrigiendo de esta manera la presión para mantenerla constante.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA .....	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL .....	viii
INTRODUCCIÓN.....	ix
CAPÍTULO 1.....	1
1. METODOLOGÍA.....	1
1.1 Vista general del equipo.....	1
1.1.1 Esquema multibomba.....	3
1.1.2 Características del control multibomba .....	5
1.1.3 Lógica de operación de control multibombas.....	6
CAPÍTULO 2.....	11
2. RESULTADOS OBTENIDOS.....	11
2.1 Aplicaciones del diseño.....	13
2.2 Seguridad del equipo .....	15
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	18
BIBLIOGRAFÍA.....	20



## INTRODUCCIÓN

La provisión de agua potable en hoteles, condominios, centros comerciales, hospitales, etc, siempre es motivo de preocupación de los diseñadores, constructores y en última instancia de los dueños y administradores de los mismos. Tanto el cálculo hidráulico (que determina el caudal y la presión requeridas), como el cálculo electromecánico (que determina cuántas bombas y la capacidad de las mismas, así como qué motor va a accionar las bombas y qué tipo de controlador) son elementos importantes en los diseños de estas construcciones.

Para nuestro proyecto, partimos de la premisa que ya están definidos las condiciones de caudal y presión requeridas, así como los equipos de bombeo que cumplen este requerimiento. En este punto decidimos el tipo de control que se va a aplicar para asegurar un suministro constante a cada usuario.

Se implementará un control automático para mantener la presión constante mediante la variación de velocidad del motor que acciona la bomba. Esta variación de velocidad causa una variación en el caudal que a su vez compensa la variación de presión. La detección de presión se realiza mediante un transmisor de presión de salida 4-20mA, que lee un valor de presión el cual es comparado con el valor deseado. La lógica de

control, así como el funcionamiento del sistema se programan en un PLC, que recibe tanto la señal analógica de retroalimentación, como las señales digitales de mando, y a su vez ordena que los motores arranquen o a los variadores que modulen la velocidad del motor.

Al utilizar variadores de velocidad se obtienen ahorros importantes en el consumo de energía eléctrica, pues el equipo solo consume la energía requerida para mantener la presión, y también al arrancar con una rampa suave se elimina el pico de corriente de arranque lo que disminuye la demanda eléctrica. Este ahorro puede ser del orden del 40%. También se disminuyen los costos de mantenimiento tanto eléctrico como mecánico.

Este método de control de presión puede ser utilizado en sistemas de 2-3-4 o más bombas, y de cualquier capacidad, pero todas iguales, pues actúa sobre la presión del sistema. En nuestro caso implementamos el control en sistemas de dos y de tres bombas de igual capacidad, con un esquema en el que un solo variador puede manejar todo el sistema, mejorando significativamente los costos del control.

## **CAPÍTULO 1**

### **1. METODOLOGÍA**

#### **1.1 Vista general del equipo**

El equipo de velocidad variable es un sistema tipo paquete que mantiene constante la presión dentro de un circuito hidráulico de manera automática, independientemente de las variaciones en el consumo de agua. Para conseguirlo utiliza la señal de un transmisor de presión que es procesada por la unidad lógica programable o PLC, el cual ejecuta un programa con una secuencia definida para operar las tres bombas de acuerdo a las necesidades del sistema por la variación de la demanda de agua.

El equipo responde a las variaciones de presión: un incremento en el consumo hace disminuir la presión, entonces para mantenerla en el nivel fijado se debe aumentar el caudal de la bomba, lo que se logra aumentando la velocidad del motor. Una vez alcanzado y mantenido el nivel de presión fijado, para evitar que la presión siga subiendo, se modula la velocidad del motor para regular el caudal de la bomba y mantener la presión constante.

En ocasiones se implementa con dos variadores de frecuencia, totalmente redundante uno del otro, para garantizar la no interrupción del servicio, ya que al ocurrir una falla en un variador, automáticamente entra el otro variador, sin afectar a la operación del sistema.

El equipo básico está compuesto por:

- Tres motobombas de iguales características mecánicas y eléctricas.
- Dos cabezales, uno en la succión y otro en la descarga, contruidos en tubería de acero inoxidable, con sus respectivas válvulas de bola para control y válvulas check en cada bomba.
- Un transmisor de presión con rango de salida de 4 a 20mA (que representa 0-300 psi), que mide la presión en el sistema y cuya señal es procesada por el PLC. El PLC es el elemento que ejecuta el programa en el que se define la secuencia de trabajo de las bombas.
- Un panel de control y mando, que contiene:

- 1) Opciones de operación manual y automática mediante selectores, para el arranque de cada bomba individualmente y un selector para la operación automática del sistema completo.
- 2) Indicadores luminosos de motor operando y de seguridad de sobrecarga activada; además de la luz indicadora de sistema listo y nivel de cisterna.
- 3) Horómetros (contadores de horas de funcionamiento) para cada bomba
- 4) Un supervisor de voltaje que vigila los niveles de la acometida eléctrica, controlando el sobre y bajo voltaje, así como la falta de una de las fases. Adicionalmente asegura que la acometida esté conectada en secuencia de fase correcta.
- 5) La fuerza para los motores está compuesta por el variador de velocidad, y tres arrancadores directos protegidos con guardamotores.
- 6) El variador está protegido por tres fusibles ultrarrápidos.
- 7) Una interface hombre-máquina HMI, ubicada en la parte frontal del panel, para visualizar los parámetros de operación como presión del sistema, velocidad del motor y otros. Esta interface también sirve para fijar los valores de los parámetros de operación tales como: la presión de trabajo deseada, los límites de velocidad del motor, los datos del motor y de la bomba, los tiempos de las rampas de aceleración para el arranque y de desaceleración para el apagado, etc.
- 8) Un multímetro digital, ubicado en la parte frontal del panel para visualizar los parámetros eléctricos de voltaje y corriente. Tiene además un manómetro analógico, colocado en el cabezal de descarga para lectura de presión de trabajo del sistema.

- 9) Un controlador lógico programable PLC, que es el que almacena y ejecuta el programa que define la lógica de operación del sistema.

### **1.1.1 Esquema multibombas**

El sistema multibombas o sistema de bombeo con múltiples bombas se refiere al control de más de una bomba utilizando para eso solamente un único variador de frecuencia para el control de la presión del sistema. El variador de frecuencia selecciona las bombas que irán funcionar en el sistema para mantener / controlar la presión de salida de un sistema de bombeo. Se hace también un control de rotación entre las bombas, lo que posibilita así, un uso por igual de las mismas.

Para controlar la presión de salida del sistema, se utiliza lazos de control cerrado, con retroalimentación de la señal de presión, la cual es comparada con el valor fijado en el setpoint. De esta comparación resulta un valor de error el cual es manipulado mediante algoritmos matemáticos programados en el PLC, dando como resultado acciones de corrección para lograr que la presión se mantenga constante. Además hay programadas un conjunto de operaciones con que se ejecutan las lógicas de arranque y de parada de las bombas.

### **1.1.2 Características del control multibomba**

El sistema multibombas desarrollado presenta las siguientes características:

- Control automático de las 3 bombas;
- Control automático del cambio de la bomba accionada por el variador de frecuencia;
- Rampa de aceleración y de desaceleración para la bomba accionada por el variador de frecuencia;
- Setpoint de presión del sistema por parámetro;
- Habilitación o no de la bomba a través de entrada digital;
- Sistema en modo dormir (sleep) o despertar;
- Llenado de tubería antes de permitir el control de la presión, para evitar golpes de ariete y esfuerzos mecánicos en la instalación;
- Falla y alarma para presión de salida mínima (rompimiento de la tubería);
- Falla por presión de salida máxima (estrangulamiento de la tubería);
- Rotación de las bombas de acuerdo con el tiempo de operación, este tiempo se mide en horas efectivas de trabajo;
- Posibilidad de accionar la bomba del variador de frecuencia vía HMI (modo local);

### **1.1.3 Lógica de operación del sistema multibomba**

El equipo de velocidad variable ha sido diseñado para trabajar automáticamente de manera segura y confiable. Su operación es automática

y su finalidad es mantener la presión constante en el sistema, compensando las variaciones de la demanda o caudal con la variación de velocidad del motor.

Cada bomba tiene una Opción de **Operación Manual**, mediante la cual se puede operar cada bomba independientemente de las otras, una Opción de **Operación Automática** por bomba, la misma que está ligada a un selector de Automático para todo el equipo, que habilita al PLC a efectuar la rutina de operación según una secuencia lógica establecida. También tiene una **Opción 0** para el caso de que alguna bomba quede fuera de servicio por daño o para trabajos de mantenimiento.

#### Operación manual:

Para operar el equipo manualmente se debe subir el breaker principal que está dentro del panel, esperar hasta que se encienda la indicación de Sistema Habilitado. Si esto no ocurre se debe verificar que los niveles de voltaje sean los adecuados. Si el indicador está activado el procedimiento para operar las bombas manualmente es el siguiente:

Cada bomba tiene su selector. Seleccionar en Manual el que corresponde a la bomba que se desee operar. Se encenderá la luz piloto verde de marcha.



La presión que alcance el sistema y velocidad del motor se podrán leer en la interface, de igual manera se podrán leer los parámetros eléctricos. Para apagarla se deberá posicionar el selector en posición 0. La luz piloto de Falla Térmica se encenderá cuando el motor se mantenga operando sobrecargado lo que provoca el calentamiento del mismo por sobre corriente. En la opción manual la bomba trabajará con arranque directo, al 100% de su velocidad nominal. Por lo tanto no hay control de la presión, sino que se obtendrá la presión máxima que la bomba pueda desarrollar. En esta opción pueden trabajar las tres bombas simultáneamente y se recomienda solo en caso de falla del control automático o para pruebas.

#### Operación automática

Antes de explicar la secuencia de operación automática se debe indicar que el sistema de velocidad variable ha sido diseñado para que, en algún momento, las tres bombas trabajen como líder en un intervalo de tiempo definido por el usuario. El tiempo de alternación de las bombas corresponde al tiempo efectivo de trabajo y no tiempo horario, y puede ser modificado a conveniencia. El PLC tiene en su programación unos acumuladores de tiempo de trabajo por cada bomba, de tal manera que al terminar el intervalo de trabajo de cualquier bomba, se rota la operación de bomba líder a la bomba que tiene menos tiempo de trabajo, asegurando así un desgaste parejo del equipo, al tratar de igualar los tiempos de trabajo.

Con el indicador de sistema listo encendido y con los selectores de la siguiente manera:

- Seleccionado el modo automático del sistema, en el selector 0/Automático.
- Puesto los selectores de las bombas en posición Automático.

El equipo empezará a operar según la siguiente lógica (valores para el ejemplo):

- 1- Si la presión del sistema es menor de 20psi, la bomba 1 se encenderá y empezará a trabajar a muy baja velocidad durante 30seg, en un proceso que se llama llenado de tubería. Pasados los 30seg la bomba 1 aumentará su velocidad hasta tratar de alcanzar la presión predefinida, llegando en 10seg a su máxima velocidad. De inmediato empezará a modular la velocidad para mantener la presión deseada. De no conseguirlo, el PLC ordenará que la bomba 2 arranque y si todavía se mantiene la baja presión, también mandará arrancar la bomba 3. En este caso las bombas 2 y 3 funcionarán al 100% de su velocidad y arrancarán con arranque directo, y la bomba 1 bajará su velocidad modulando hasta obtener que se la presión del sistema se mantenga constante; entonces el PLC mandará a apagar a la bomba 3 primero y luego a la bomba 2. Si la presión del sistema se mantiene en el valor prefijado y la velocidad es

constante bajo los 22Hz, el PLC mandará a apagar la bomba 1 con una rampa de desaceleración en 10seg.

- 2- Por lo general, durante la mayor parte del día solo una bomba trabajará, con el variador de velocidad para mantener la presión en el valor fijado. En momentos de consumo alto, es cuando se dará paso a 1 o a las 2 bombas adicionales. Por esta razón es que se utiliza un solo variador.
- 3- En las hora de consumo mínimo, el equipo tiene programado una secuencia llamada dormir, de tal manera que cuando la presión se mantenga constante, estando el motor trabajando a una baja velocidad (menos de 44Hz) por un tiempo mayor a 30seg, el PLC manda a “dormir” al equipo, este es un estado de vigilancia y del cual se sale en cuanto la presión tenga una disminución de 5psi.
- 4- El PLC también identifica cuando estén ocurriendo sucesos como una tubería rota en el sistema (flujo anormalmente alto y constante), y, si la válvula del sistema esté cerrada, o sea no haya flujo. Mediante condiciones de presión y velocidad del equipo, el PLC manda a apagar las bombas, con alarma, evitando daños mayores.
- 5- Es importante anotar que los tiempos y los rangos de presión y velocidad son susceptibles de ser modificadas, no así la lógica de operación que se ejecuta por medio del PLC.
- 6- Si alguna bomba debiera quedar fuera de servicio, por daño o mantenimiento, al colocar el selector de la bomba en 0, el PLC ignorará a esta bomba y de tocarle operar según la secuencia, la saltará y cumplirá

la orden con la siguiente bomba, sin afectar el cumplimiento del automatismo.

## CAPÍTULO 2

### 2 RESULTADOS OBTENIDOS

La implementación de sistemas de bombeo de este tipo en instalaciones que tienen un consumo de agua variable, como hoteles, centros comerciales, condominios, etc., mejora significativamente la eficiencia en el funcionamiento de las mismas.

La premisa en que se basa este diseño es que el consumo en estas instalaciones se maneja por rangos:

- Un rango de bajo consumo, en el cual una sola bomba es capaz de mantener la presión, esta bomba trabaja con el variador modulando la

velocidad del motor para mantener la presión constante. En este rango se maneja más del 60% del tiempo de trabajo del equipo;

- Un rango de consumo alto, en el cual se necesita que al menos dos bombas trabajen, una de ellas trabaja con el variador y la segunda entra con arranque directo. Entonces el variador modula la velocidad de la primera bomba hasta compensar la caída de presión en la red. El tiempo en que el sistema trabaja en este rango puede ser el 30% del tiempo de trabajo total del equipo;
- Y eventualmente un rango de picos de consumo, que podría demandar la operación de las tres bombas, dos con arranque directo y una opera con el variador, modulando su velocidad hasta compensar el pico de demanda. El tiempo de trabajo del equipo bajo este rango es muy pequeño, no más del 5%, en sistemas con diseño hidráulico adecuado.

Un sistema de bombeo con múltiples bombas accionadas por un solo variador presenta las siguientes ventajas en relación a un sistema de bombeo convencional:

- Ahorro significativo en los costos de energía eléctrica;
- Mayor vida útil del conjunto de bombeo;
- Facilita el mantenimiento del equipo sin interrupciones de operación;
- Mantiene la presión del sistema constante;
- Proporciona el caudal necesario conforme la demanda del sistema varía;

- Permite diagnosis de fallas del sistema;
- Ecuilibración del tiempo de operación de las bombas, permitiendo así, un desgaste por igual de las mismas.
- Menor costo al usar un solo variador de velocidad, en lugar de un variador por cada bomba.

Este diseño no solo mejora la relación costo-beneficio de la instalación inicial, sino que se mejora también la gestión de mantenimiento en el mediano y largo plazo, así como la gestión administrativa al haber un menor consumo eléctrico sin perjudicar la calidad del servicio de provisión de agua a los usuarios.

## **2.1 Aplicaciones del diseño**

En la actualidad hay varios equipos ya operativos, preferentemente se han implementado con dos variadores, teniendo dos equipos en uno, ya que los variadores trabajan cada uno con el sistema completo y se alternan en su operación, dando como resultado un sistema redundante, de tal manera que al fallar un variador, automáticamente entra a trabajar el segundo variador con la misma lógica de funcionamiento que el primero.

Esta aplicación puede ser utilizada sobre todo en instalaciones como hoteles, condominios, hospitales, entre otras, ya que garantiza el funcionamiento del

equipo y la provisión de agua a presión constante, por la redundancia de sus componentes.

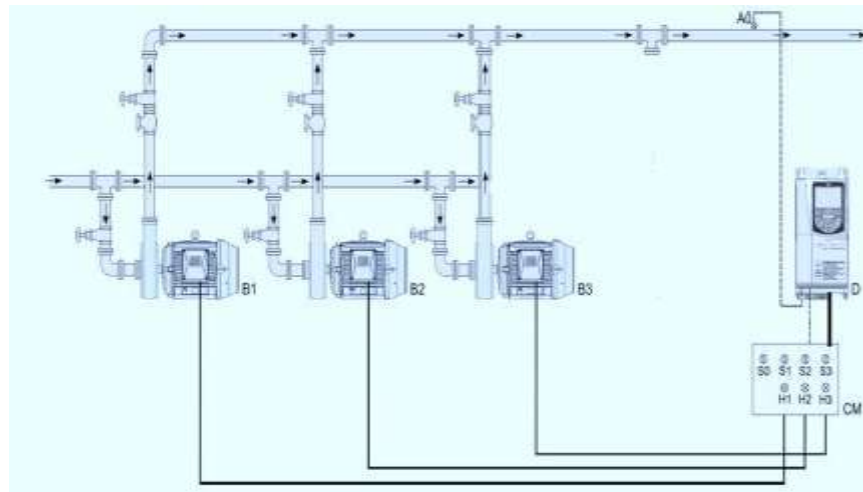


**Figura 2.1: Tablero de control para 3 bombas de 20HP con dos variadores, vista interior.**



**Figura 2.2: Equipo de presión constante por velocidad variable**





**Figura 2.3: Esquema multibomba**

## 2.2 Seguridades del equipo

El equipo como tal está totalmente protegido por una serie de seguridades que verifican que las condiciones eléctricas para la operación del sistema sean adecuadas a los parámetros de diseño. Todas estas seguridades están operativas tanto en modo manual como en modo automático, a excepción de las seguridades del variador que solo operan en modo automático y son propias del variador.

SEGURIDAD	MODO EN QUE OPERA	ACCION QUE EJERCE	COMENTARIO
SISTEMA HABILITADO	MANUAL AUTOMATICO	Apaga todo el sistema	Indica niveles anormales de voltaje
FALLA TERMICA	MANUAL AUTOMATICO	Apaga solo bomba que presenta falla	Detecta sobrecarga del motor
SUPERVISOR DE VOLTAJE	MANUAL AUTOMATICO	Apaga todo el sistema	Detecta pérdida de fase, sobre y bajo voltaje
ALARMAS Y ADVERTENCIAS DEL VARIADOR	AUTOMATICO	Apaga todo el sistema	Alarmas según lista descrita

**Tabla 2.1: Seguridades básicas del equipo**

FALLA / ALARMA	DESCRIPCIÓN	CAUSAS PROBABLES
A750: Modo Dormir Activo	Señala que el sistema está en modo dormir.	Frecuencia del motor menor que 44Hz y el tiempo de espera ha sido transcurrido.
A752: Llenado Tubería	Señala que el control de llenado de tubería está en ejecución.	Una nueva habilitación del sistema.
A754: Modo Cambiar Bomba	Señala que el sistema está efectuando el cambio de la bomba accionada por el variador.	Tiempo de operación de la bomba accionada por variador ha excedido el valor fijado para cambiar la bomba del.
A760: Presión Mínima	Señala que la presión de salida del sistema esta baja.	Presión de salida está menor que 20psi y el tiempo de espera ha transcurrido.
F761: Presión Mínima	Señala que la presión de salida continuó baja durante un tiempo para detección del rompimiento de la tubería	Alarma A760 activo, todas las bombas del sistema trabajando y el tiempo de espera ha transcurrido.
F763: Presión Máxima	Señala que la presión de salida del sistema está alta.	Presión de salida está mayor que la fijada, sólo la bomba accionada por el variador está trabajando y el tiempo de espera ha transcurrido.
A770: Bomba 1 Deshabilitada	Señala que la bomba 1 fue deshabilitada estando trabajando.	Falla térmica del motor.
A772: Bomba 2 Deshabilitada	Señala que la bomba 2 fue deshabilitada estando trabajando.	Falla térmica del motor.
A774: Bomba 3 Deshabilitada	Señaliza que la bomba 3 fue deshabilitada estando trabajando.	Falla térmica del motor.

**Tabla 2.2: Alarmas típicas en un variador de velocidad**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **Conclusiones**

1. La implementación de este esquema de control para los equipos de bombeo es conveniente en instalaciones en que el consumo de agua sea variable. Esto se define en el diseño hidráulico.
2. El número de bombas depende de la aplicación en particular, así como su capacidad hidráulica y eléctrica.
3. El control garantiza un funcionamiento eficiente y confiable del sistema de bombeo.
4. El control implementado mejora significativamente los costos de instalación, operación y mantenimiento de los equipos, haciendo más eficiente la gestión de administración y mantenimiento en el mediano y largo plazo.

## Recomendaciones

1. En la actualidad, en todos los proyectos de construcción se esmeran en encontrar soluciones creativas a problemas de eficiencia que mejoren la relación costo-beneficio tanto en la instalación como en el funcionamiento de los sistemas de bombeo. Este diseño es una respuesta confiable a este requerimiento, que beneficia tanto al constructor como al propietario de las instalaciones.
2. Existen algunas variaciones que se pueden implementar al diseño básico, las cuales dependerán de la aplicación en particular, para lo que se deben considerar varios aspectos y escenarios de operación.
3. El diseño eléctrico y de control es un complemento al diseño hidráulico, que es el que define las capacidades del equipo. El control eléctrico básicamente optimiza la operación de las bombas, pero no corrige deficiencias en el diseño hidráulico. Por lo que es menester partir de un buen diseño hidráulico si se quiere un funcionamiento óptimo del sistema de bombeo en el mediano y largo plazo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kuo, Benjamín C., SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO, Prentice Hall 7ma. Ed., 1996
- [2] Schneider Electric, CONTROL INDUSTRIAL Y AUTOMATIZACION, [www.schneider-electric](http://www.schneider-electric), 2012/2013
- [3] WEG, CFW11 - System Drive, [www.weg.com](http://www.weg.com), Rev. 08, 2014
- [4] Roca, Alfredo, CONTROL AUTOMATICO DE PROCESOS INDUSTRIALES, Ediciones Díaz de Santos, 2010