

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Sección de Electricidad y Electrónica



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DEMOSTRATIVO DE
CONTROL POR VARIADORES DE VELOCIDAD PARA SISTEMAS DE
PRESIÓN CONSTANTE MULTIBOMBAS

Tesis para optar por el título de Ingeniero Electrónico:

Presentado por:

Yoshi Augusto Paredes Arévalo

Asesor: Ing. Rafael Román Cortina Mendoza

**Lima – Perú
2014**

RESUMEN

En el panorama actual, las aplicaciones relacionadas al bombeo de agua tienen una alta demanda de energía en el rubro industrial y doméstico ya que representan el 22% del consumo total en el mundo. Los sistemas de presión constante, son los más utilizados en las estaciones de bombeo, ya que permiten un control automático y regulado de la presión en tiempo real. Sin embargo, es normal encontrar bombas sobredimensionadas funcionando mediante métodos externos de control de flujo. Los más convencionales son: estrangulamiento, By-pass y control On-Off. Adicionalmente, estas bombas son arrancadas en directo ocasionando inconvenientes en el sistema y tuberías: deterioro de las tuberías por el golpe de presión en el arranque, factor de potencia bajo (necesidad de incluir banco de condensadores), deterioro del motor, baja eficiencia de consumo de energía.

Para evitar estos inconvenientes, se plantea utilizar la tecnología de control por variadores de velocidad y demostrar su desempeño en aplicaciones de presión constante con bombas múltiples, como lo son: el ingreso de bombas de manera secuencial y alternancia de bomba principal para equiparar el tiempo de funcionamiento entre todas. Se implementará un módulo demostrativo con dos modos de control del sistema multibombas: control de motor por bomba principal controlada y auxiliares en directo; y control del motor principal y auxiliares por variadores de velocidad enlazados por comunicación serial.

Para cumplir el objetivo se requirió el diseño de un circuito de fuerza y de control, partiendo de los diagramas recomendados el fabricante, para luego pasar a la selección de los equipos a utilizar, luego al seguimiento de la fabricación y cableado; por último se configuró el variador, creando una nueva macro de aplicación que combina los 2 modos de control multibombas.

En la fase de pruebas se obtuvo un funcionamiento óptimo del controlador PID, permitiendo una regulación en tiempo real manteniéndonos en el nivel de referencia de presión todo el tiempo; respondió de forma esperada antes los fallos simulados y obedeció los comandos de comunicación serial del variador maestro. Adicionalmente el módulo está disponible para entrenamientos técnicos y en la configuración de variadores de velocidad ABB.

DEDICATORIA

“Si un ser humano desea algo con todas sus fuerzas, el universo entero conspira para hacerlo realidad” - El Alquimista, Paulo Coelho.

El presente trabajo va dedicado a mi familia por apoyarme y alentarme incesantemente en todos estos años de estudio.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar al Ing. Rafael Cortina quien fue apoyo incondicional en la elaboración del presente documento, a la Pontificia Universidad Católica del Perú por brindarme los conocimientos vastos para desempeñarme correctamente en el mundo profesional y a la empresa ABB por facilitarme información técnica detallada y permitir que este proyecto sea una realidad.



ÍNDICE

	Pág
INTRODUCCIÓN	01
 CAPÍTULO 1: SISTEMAS DE PRESIÓN CONSTANTE MULTIBOMBAS	 02
1.1 Entorno general: estadísticas sobre sistemas de bombeo	02
1.2 Sistemas de bombeo	03
1.3 Sistemas multibombas	06
1.4 La celeridad, tiempo de cierre de válvula y cálculo de la sobrepresión producida por el golpe de ariete	08
1.4.1 La celeridad.....	08
1.4.2 Tiempo de cierre de válvula.....	08
1.4.3 Cálculo de la sobrepresión producida por el golpe de ariete.....	09
1.5 Sistemas de regulación de presión y flujo convencionales	09
1.5.1 Estrangulamiento	09
1.5.2 By-pass o recirculación de fluidos	10
1.5.3 Control On-Off.....	10
1.6 Problemática	11
 CAPÍTULO 2: VARIADORES DE VELOCIDAD Y SU APLICACIÓN A LOS SISTEMAS DE PRESIÓN CONSTANTE	 14
2.1 Variadores de velocidad: conceptos generales	14
2.2 Tecnologías de variadores aplicadas a sistemas de presión constante	16
2.2.1 Sistema con bomba principal controlada y auxiliares en arranque directo	17
2.2.2 Sistema con bomba principal y auxiliares controladas	18
2.3 Estado del arte: tecnologías disponibles en el mercado peruano	19
2.3.1 Santerno.....	19
2.3.2 Danfoss	24
2.3.3 ABB	27
2.4 Modelo Teórico	32
2.5 Síntesis del asunto de estudio.....	34

CAPÍTULO 3: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DEMOSTRATIVO POR VARIADORES DE VELOCIDAD	35
3.1 Objetivo General	35
3.1.1 Objetivos Específicos.....	35
3.2 Requerimientos del sistema	35
3.3 Selección de la tecnología a utilizar	37
3.4 Descripción del sistema	39
3.4.1 Software	39
3.5 Diseño de circuitos.....	41
3.5.1 Diseño del circuito de fuerza	41
3.5.2 Diseño del circuito de control	43
3.5.3 Selección de los elementos del tablero.....	47
3.6 Implementación del tablero y configuración del equipo.....	49
3.7 Planteamiento de pruebas.....	51
3.7.1 Pruebas ante variación de presión.....	51
3.7.2 Pruebas ante fallos simulados.....	52
CAPÍTULO 4: PRUEBAS, SIMULACIONES, CORRECCIONES Y RESULTADOS	54
4.1. Resultados de pruebas planteadas	54
4.1.1 Variación de presión	56
4.1.2 Fallos simulados	57
4.3 Análisis de Resultados.....	62
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES.....	66
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	70

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los motores eléctricos representan la principal tecnología para producir movimiento en las aplicaciones del sector industrial, que van desde la transmisión de fluidos mediante el accionamiento de bombas, hasta el accionamiento de máquinas como: fajas transportadoras, compresores, ventiladores, etc, utilizadas en procesos de manufactura. Estas aplicaciones demandan un alto consumo de energía eléctrica, por lo que se estima que en este sector se consume más del 50% de la electricidad en el mundo y de ésta el 65% es utilizada para accionar los motores eléctricos. [1].

Los sistemas de bombeo de agua son las aplicaciones más comunes de los motores eléctricos, encontrándolas en supermercados, tiendas, edificaciones y plantas industriales. Éstos tienen como fin en la regulación de presión o caudal del agua mediante distintos métodos, como estrangulación mediante válvulas, bypass, etc. En cifras concretas, las bombas representan el 22% del consumo de energía eléctrica total en el mundo [1].

Los accionamientos de motores eléctricos por variadores de son la solución tecnológica más conveniente si se busca eficiencia energética, ahorro de costos en mantenimiento, ahorros en energía y un control preciso de la velocidad del motor. Por ello aplicados a los sistemas de bombeo, ayudan a reducir significativamente los inconvenientes encontrados si se utilizan otros tipos de regulación y de accionamiento; tales como la reducción de los golpes de presión en tuberías, incremento del tiempo de vida de motor y de la bomba, reducción en mantenimiento de bombas y tuberías, entre otros. Adicionalmente, el uso de múltiples bombas de respaldo ha obligado a la industria a adoptar estos accionamientos, para su control en paralelo o en serie y poder cumplir con la demanda de agua requerida para el proceso.

A continuación se describirá el diseño e implementación de un módulo demostrativo de accionamiento de motores por variadores de velocidad, con el fin de demostrar el control inteligente de bombas en serie, la flexibilidad que ofrece el sistema y el costo-beneficio ante un sistema de bombeo convencional; adoptando 2 tipos de funciones: el control de tres motores con un variador y el de tres variadores con tres bombas, las cuales entraran de acuerdo a demanda del sistema mediante la información de un sensor de presión.

CAPÍTULO 1

SISTEMAS DE PRESIÓN CONSTANTE MULTIBOMBAS

1.1 Entorno general: estadísticas sobre sistemas de bombeo

Como ya se mencionó, los sistemas de bombeo en la industria representan el 22% del consumo total de energía en el mundo, este consumo energético se diversifica de acuerdo al sector específico de industria que se maneja. En el Perú, de acuerdo al Ministerio de Energía y Minas, se tienen las siguientes estadísticas de consumo energético:

En la agroindustria se tiene un 16% del consumo en bombas según estudio de CENERGIA [2]:

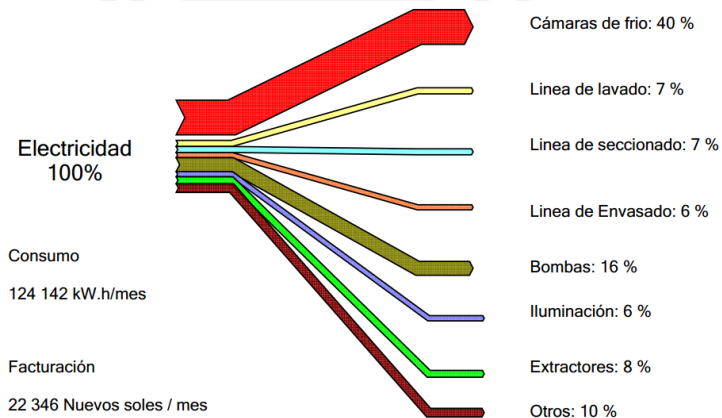


Figura N° 1. Consumo de Energía Eléctrica por Equipos [2]

En edificios públicos se tiene un 7% de consumo en bombas según estudio de CENERGIA [3]:

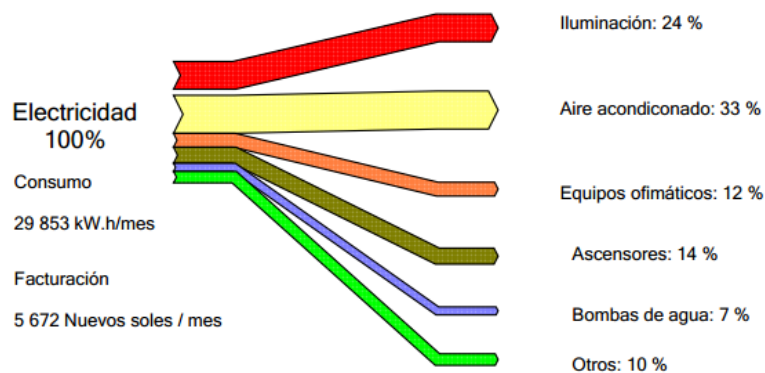


Figura N° 2. Consumo de Energía Eléctrica por Equipos [3]

En el sector comercial un 6% de consumo en bombas según estudio de CENERGIA [4]:

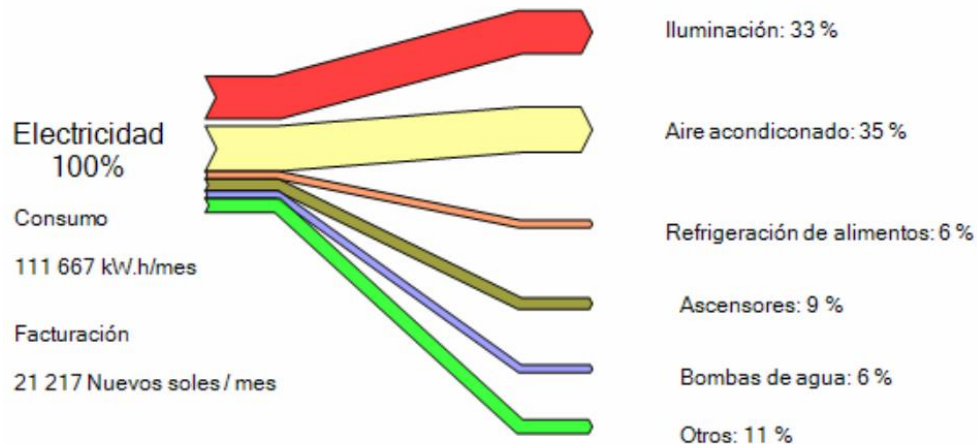


Figura N° 3. Consumo de Energía Eléctrica por Equipos [4]

De acuerdo a éstas estadísticas, existe un potencial ahorro en energía y en facturación, ya que en la mayoría de casos se utilizan regulaciones convencionales como la estrangulación por válvulas y arranques directos.

El arranque directo ocasiona inconvenientes no deseados en las tuberías, tal como el golpe de presión para vencer la inercia y lograr mover el volumen de agua deseado, comúnmente llamado “golpe de ariete”. La estrangulación por válvulas y bypass para el control del flujo cumplen tal cual su función dado el sobredimensionamiento de las bombas, sin embargo se utilizan en algunos casos sólo el 40% o 50% del caudal nominal; entonces el consumo energético de la bomba es del 100% y se desaprovecha todo el potencial, utilizando un porcentaje menor al nominal.

1.2 Sistemas de bombeo

Un sistema de bombeo consta de un arreglo de tuberías y una bomba centrífuga que desplaza una cantidad dada de agua en el tiempo, con el fin de cumplir la demanda de presión o caudal que requiere un proceso en específico, el cual puede tratarse de un cuarto de bombas para abastecer un edificio, un sistema de lavado de botellas, etc.

Para comprender mejor un sistema de bombeo, es necesario definir dos tipos de presiones encontradas en dicho sistema. Como se puede apreciar en la figura 4, la presión estática es la fuerza que ejerce un fluido perpendicularmente a la unidad de

superficie, es decir la presión que ejerce la columna de agua encontrada entre diferentes niveles de altura; por otro lado, la presión dinámica es la presión debida a la velocidad del fluido. El valor de la presión dinámica depende en concreto de la velocidad elevada al cuadrado. [5]:

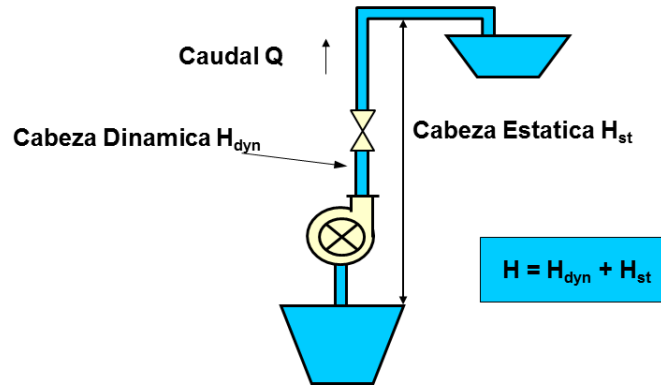


Figura N° 4. Presión estática y dinámica [Fuente: ABB]

Por lo tanto al seleccionar una bomba, ésta debe poder cumplir con el requerimiento de presión absoluta de la bomba, la presión absoluta se define como la suma de la presión dinámica y estática sin tener en cuenta la presión atmosférica, ya que el sistema de tuberías es considerado hermético.

En la siguiente figura se muestra las curvas presión vs caudal tanto del sistema como de la bomba. La curva de la bomba muestra el nivel de presión que puede otorgar de acuerdo al caudal necesario, girando a una velocidad constante.

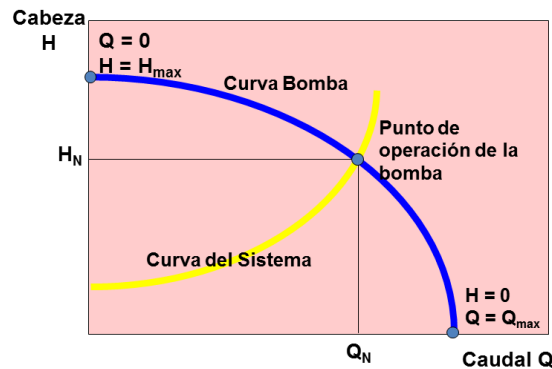


Figura N° 5. Curva del sistema vs curva de la bomba [Fuente: ABB]

La curva de un sistema de bombeo es una gráfica que muestra la altura de bombeo requerida en función del caudal a una velocidad de giro constante. La altura de bombeo requerida por el sistema es igual a la elevación que la bomba le debe proporcionar al fluido más la pérdida total de carga en todo el sistema.

El punto de intersección de ambas curvas es considerado el punto de operación de una bomba centrífuga.

Adicionalmente la ecuación de potencia de la bomba se define de la siguiente manera:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot d}{t} = \frac{mg \cdot d}{t} \times \frac{V}{V} = \frac{mg}{V} \times \frac{V}{t} \times d \Rightarrow P = p \times Q \times H$$

Donde: P = potencia, W: trabajo, t= tiempo, F= fuerza, V=volumen, d = distancia

m= masa, g= aceleración de la gravedad

p= peso específico, Q = caudal, H = Cabeza de presión

Entonces tenemos que la potencia de la bomba es proporcional al caudal y a la cabeza de presión.

Según las leyes de afinidad, la velocidad es proporcional al caudal y proporcional cúbicamente a la potencia.

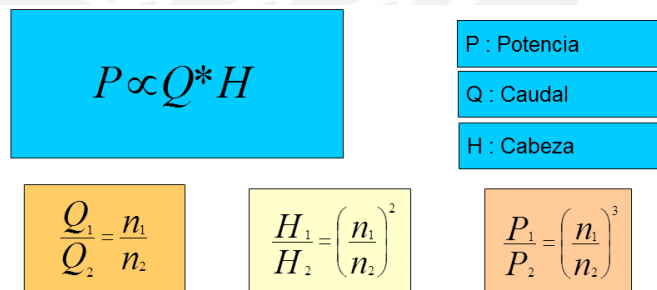


Figura N° 6. Leyes de afinidad [Fuente: ABB]

Esto quiere decir que mientras más rápido gira la bomba, la potencia utilizada se incrementará de manera cúbica.

1.3 Sistemas multi-bombas

Se refiere al control de más de una bomba utilizando para eso dispositivos maestros, que desarrollan una lógica de control de arranques de bombas adicionales. De este modo este sistema es capaz de brindar un alto rango de presión dependiendo de la demanda del sistema. Es hecho también un control de rotación entre las bombas, lo que posibilita así, un uso por igual de las mismas [6].

Los sistemas multibomba, poseen una bomba principal y varias secundarias, las cuales se encienden una tras otra de acuerdo a demanda de presión, comúnmente llamado “bombas en cascada” [7].

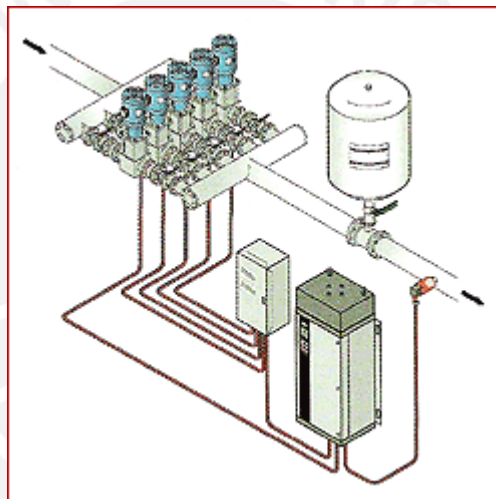


Figura N° 7. Control en cascada estándar [7]

Del mismo modo se necesita que el tiempo de funcionamiento de éstas sea equilibrado, para que así el desgaste sea equitativo; por lo que es necesario que cada cierto tiempo cada bomba auxiliar pase a ser la bomba principal. A este proceso se le llama “alternancia de bombas” [8].

Para estos sistemas se optan por utilizar equipos como PLCs y variadores de velocidad en combinación, aunque aún en el Perú es común encontrar estos sistemas regulados sólo por válvulas de estrangulamiento, lo cual indica que existe un potencial ahorro de energía en estas aplicaciones.

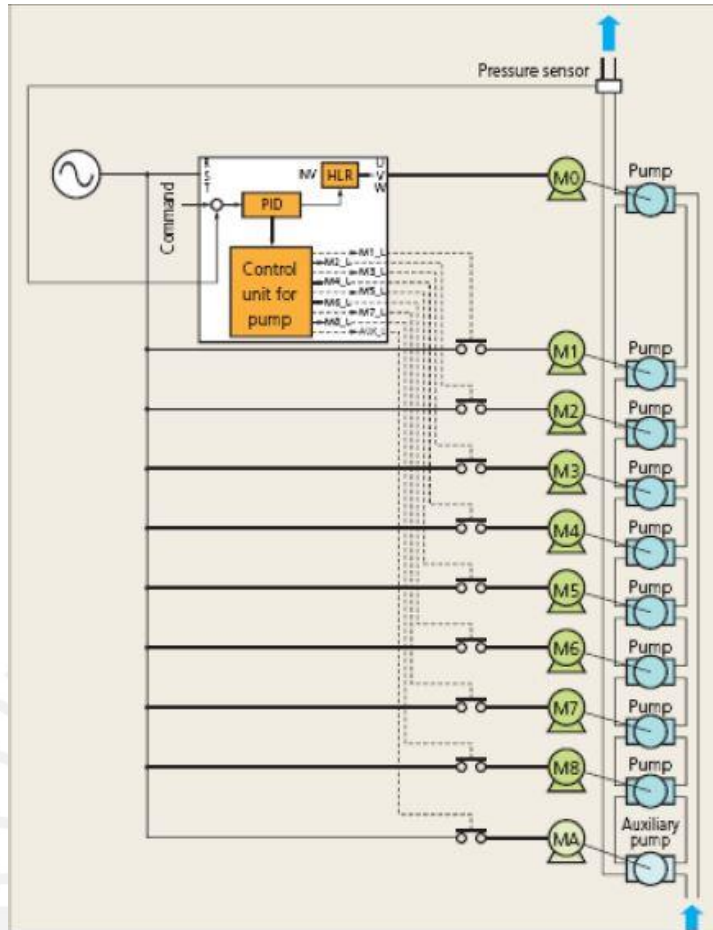


Figura N° 8. Control en cascada [Fuente: <http://soluciones-side.blogspot.com/2013/04/los-nuevos-aqua-y-hvac-prestaciones-y.html>]

En este tipo de arreglo, es necesario contar con un sensor de presión, que son dispositivos basados en la deformación de un elemento elástico debido a la presión que es sujeto, cuyos desplazamientos son detectados por un transductor que los transforma en señales análogas eléctricas [9]. Los rangos de medida son muy amplios, desde unas milésimas de bar hasta los miles de bar.



Figura N° 9. Sensor de presión. [Fuente: Sensing .es]

1.4 La celeridad, tiempo de cierre de válvula y cálculo de la sobrepresión producida por el golpe de ariete

1.4.1 La celeridad

Es la velocidad de propagación de la onda de presión a través del agua contenida en la tubería. Se define de acuerdo a la siguiente ecuación práctica formulada por Allievi [24]:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K \cdot \frac{D}{e}}}$$

Donde

a: celeridad D: diámetro interior de la tubería e: espesor de la tubería

K: Coeficiente función del módulo de elasticidad (ϵ) del material constitutivo de la tubería, que representa principalmente el efecto de la inercia del grupo motobomba, cuyo valor es:

$$K = \frac{10^{10}}{\epsilon}$$

1.4.2 Tiempo de cierre de válvula

Se define el tiempo (T) como el intervalo entre el inicio y el término de la maniobra, sea cierre o apertura, total o parcial, ya que durante este tiempo se produce la modificación del régimen de movimiento del fluido, es decir el tiempo mínimo que se debe cumplir para evitar tener un golpe de ariete [24].

Mendiluce propone la siguiente expresión:

$$T = C + \frac{K \cdot L \cdot v}{g \cdot H_m}$$

Donde

T: tiempo de cierre de válvula (s) L: Longitud de conducción (m)

v: velocidad de régimen de agua (m/s) g: aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

H_m: Altura manométrica total

C y K: coeficientes empíricos de acuerdo a los siguientes criterios:

$$\frac{H_m}{L} < 0.20 \rightarrow C = 1$$

$$\frac{H_m}{L} \geq 0.40 \rightarrow C = 0$$

$$\frac{H_m}{L} \approx 0.30 \rightarrow C = 0.60$$

L	K
L < 500	2
L ≈ 500	1.75
500 < L < 1500	1.5
L ≈ 1500	1.25
L > 1500	1

Entonces se tiene que si $T < \frac{2 \cdot L}{a}$ estaríamos experimentando un cierre rápido, por lo que se produciría un golpe de ariete.

1.4.3 Cálculo de la sobrepresión producida por el golpe de ariete

Se considera la siguiente ecuación dada por Michaud, en la cual se calcula la variación de presión debido a un cierre lento de una válvula [24].

$$\Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot T}$$

Donde

L: longitud total de conducción v: velocidad de régimen de agua (m/s)

g: aceleración de la gravedad (9.81m/s²)

T:

tiempo de cierre

1.5 Sistemas de regulación de presión y flujo convencionales

1.5.1 Estrangulamiento

En presencia de máquinas sobredimensionadas o durante la operación de equipos de bombeo que operan a flujo variable, nos vemos en la necesidad de reducir el flujo de trabajo de la máquina, mediante válvulas que cierran progresivamente el paso del agua por la tubería, hasta alcanzar el flujo deseado [10].

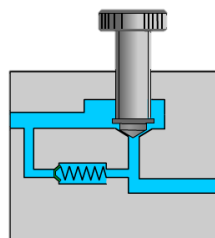


Figura N° 10. Estrangulamiento. [Fuente: demo.imh]

1.5.2 By pass o recirculación de fluidos

En presencia de sistemas sobredimensionados u operando procesos de capacidad variable otra solución dada es la colocación de una tubería con un sistema de válvulas que conecte la tubería de descarga con la de succión, o entre la región de descarga y el tanque de succión del sistema. El objetivo de dicha instalación es reducir el flujo que va al proceso derivando una parte del flujo a la succión [10].

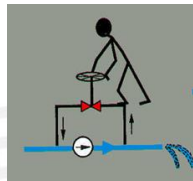


Figura N° 11. By-pass [Fuente: ABB]

1.5.3 Control On –off

Este es el método de regulación de caudal más sencillo, ya que sólo consiste en el apagado o encendido del motor de la bomba de acuerdo a la cantidad de caudal que se requiera, por ejemplo, una bomba que lleva agua a un tanque elevado mediante un control por nivel [10].

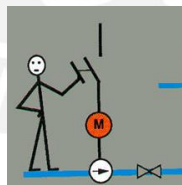


Figura N° 12. Control ON-OFFs [Fuente: ABB]

1.6 Problemática

El primer problema es el consumo excesivo de energía debido a las regulaciones de flujo convencionales, un ejemplo sería el control por estrangulamiento:

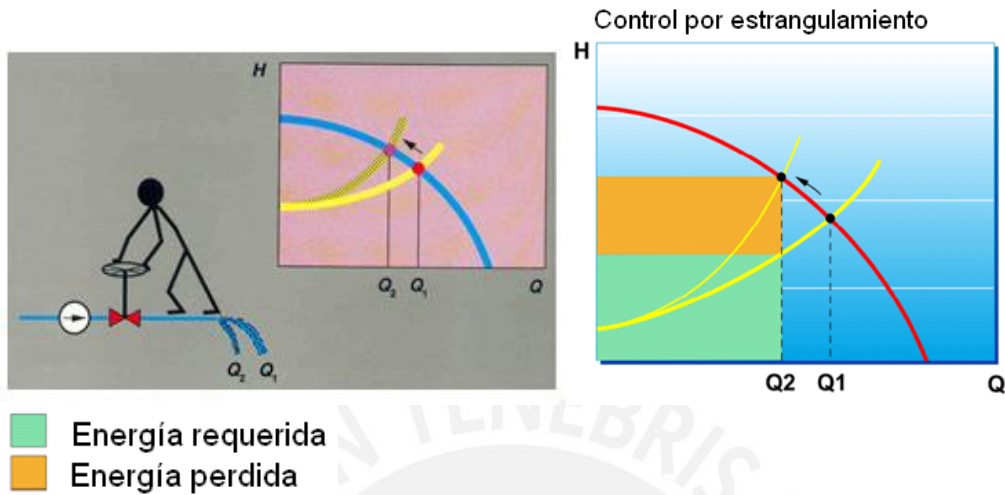


Figura N° 13. Energía usada por estrangulamiento [Fuente: ABB]

Al reducir el caudal mediante el estrangulamiento, lo que hacemos es modificar la curva del sistema de bombeo para adecuarnos a un nuevo punto de operación de la bomba, ya que ésta se encuentra girando a velocidad constante. Se puede visualizar la energía perdida al trabajar en el punto de caudal Q_2 comparada con un sistema que regule directamente la velocidad de la bomba.

En la figura siguiente podemos apreciar que la curva de la bomba desciende gradualmente, ajustándose a la curva del sistema, esto quiere decir que estamos realizando un control directo de la velocidad y por lo tanto del flujo entregado, produciéndose un ahorro energético.

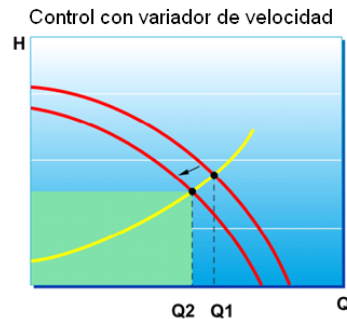


Figura N° 14. Uso de energía por variador de velocidad [Fuente: ABB]

Los sistemas convencionales con control por estrangulamiento, on-off, recirculación o by pass, requieren mayor energía para generar el flujo deseado ya que la bomba gira

al 100% de su velocidad, usando el 100% de su potencia, si observamos la figura siguiente, es posible notar una disminución del uso de energía, si reducimos la velocidad de trabajo para adecuar el flujo necesario.

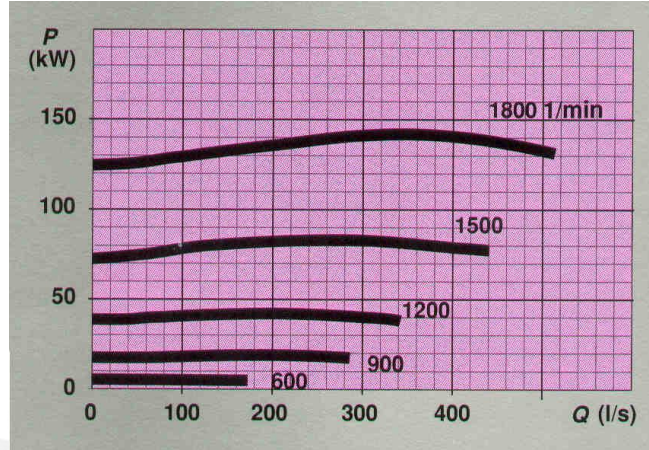


Figura N° 15. Curva Potencia de la bomba en función a la velocidad [Fuente: ABB]

Un ejemplo palpable es la siguiente gráfica, si necesitamos sólo el 80% el flujo total de la bomba, tendríamos un ahorro del 50% de la energía.

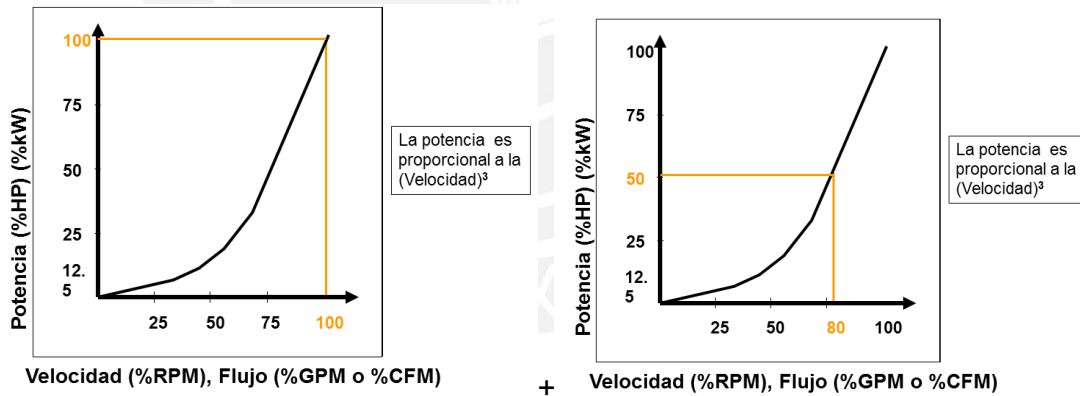


Figura N° 16. Curva Potencia vs velocidad [Fuente: ABB]

El factor de potencia del sistema es bajo, aunque es posible corregir esto con bancos de condensadores, la solución se va volviendo cada vez más cara; además es importante mencionar que los sistemas de protección ante fallas en la bomba, desequilibran el sistema incluso llegándolo a detener de forma intempestiva, generando malestar y pérdidas económicas.

Además de la baja eficiencia en energía, se tienen inconvenientes por el arranque directo de las bombas, ya que esto origina un fenómeno llamado “golpe de ariete”, el cual el golpe de presión que sufre la tubería [11]. Este golpe puede ocasionar rupturas o fugas en las tuberías.

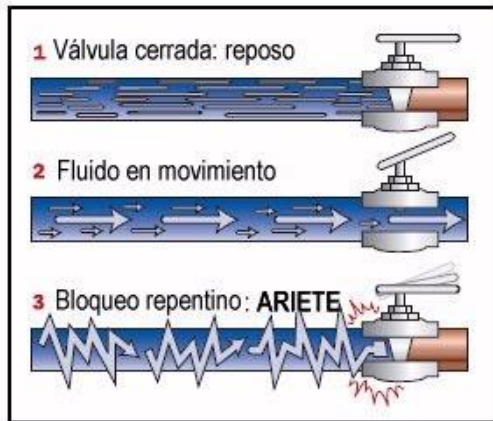


Figura N° 17. Golpe de ariete [Fuente: ABB]

Tomando en cuenta dichos factores mencionados y considerando que existen múltiples marcas ofreciendo soluciones en ingeniería para estos problemas, es necesario difundir e implementar ambas maneras de control, ya sea por control de las bombas auxiliares por arranque directo o variador de velocidad, debido a la posibilidad de mejora en cuanto a fallos y la redundancia de multi-maestro que nos brinda la comunicación serial. Para esto es necesaria una selección eficiente y exhaustiva que nos generen beneficios y cada vez mejorar la calidad de vida de los usuarios.

CAPÍTULO 2:

VARIADORES DE VELOCIDAD Y SU APLICACIÓN A LOS SISTEMAS DE PRESIÓN CONSTANTE

2.1 Variadores de velocidad: conceptos generales

Es un dispositivo electrónico encargado del control total de la velocidad de un motor eléctrico trifásico tipo jaula de ardilla. Permite también tener un torque elevado en el arranque sin necesidad de una corriente elevada [12]. Cuenta con interfaces adicionales de E/S así como comunicación serial y algoritmos de control internos.

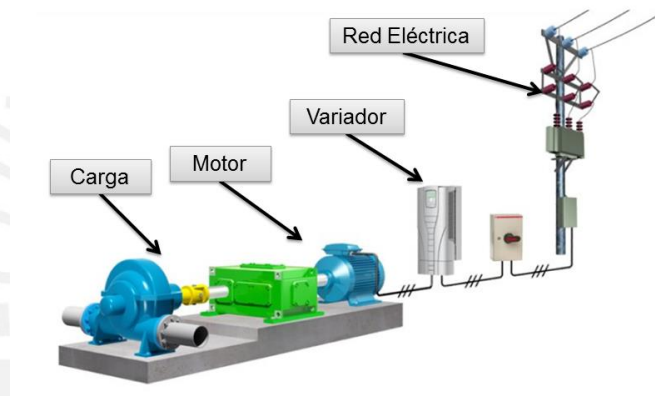


Figura N° 18. Estructura de conexión variador de velocidad [Fuente: ABB]

Su construcción consta de 3 etapas fundamentales [12]:

Etapas de rectificación: esta etapa la conforman elementos como diodos o tiristores y se encargan de volver una onda alterna (AC) en continua (DC).

Etapas de Bus DC: en esta etapa se encuentran los filtros y capacitores que reducen el rizado de la rectificación para tener una tensión DC lo más limpia posible.

Etapas de inversora: Es aquí donde se ejerce el control de la velocidad, ya que con ayuda de IGBTs que actúan como interruptores, generan una onda cuadrada modulada por ancho de pulso (PWM), esta modulación permite construir una onda cuasi-alterna controlada tanto en frecuencia como en amplitud, lo cual nos permite tener un arranque con alto torque y baja corriente.

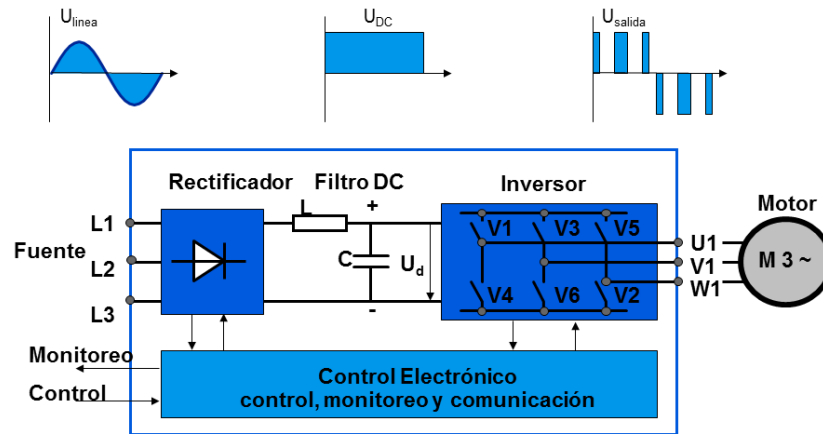


Figura N° 19. Esquema interno del variador de velocidad [Fuente: ABB]

El control escalar que ejerce el variador al motor permite graduar de manera proporcional el voltaje y la frecuencia entregada al motor [12], es decir, si tenemos una tensión nominal de 440V y una frecuencia nominal de 60Hz, al bajar la velocidad a la mitad, se entregarán al motor 220V y 30Hz de frecuencia.

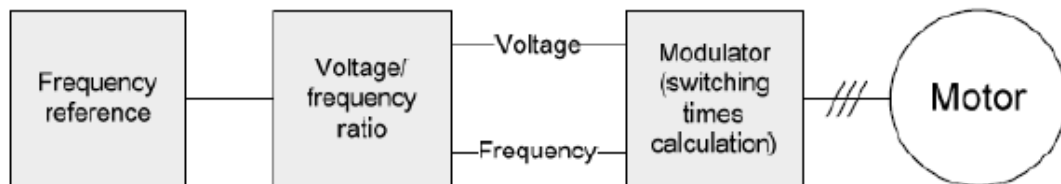


Figura N° 20. Control escalar [Fuente: ABB]

Según el circuito equivalente de un motor jaula de ardilla:

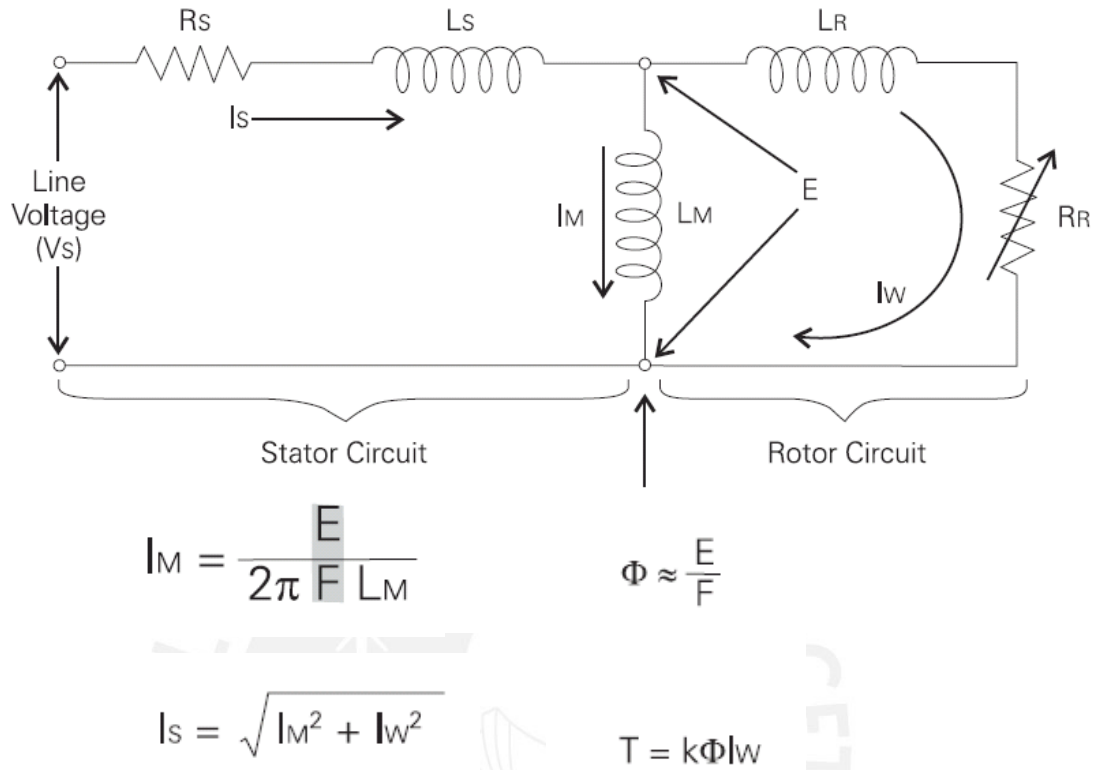


Figura N° 21. Circuito equivalente del motor eléctrico asíncrono [Fuente: ABB]

Tenemos que la corriente magnetizante I_m depende directamente de la tensión E y la frecuencia F . El torque a la salida del motor es proporcional al flujo magnético proporcionado por la corriente magnetizante. Por lo tanto si mantenemos la relación Tensión y frecuencia constante, es posible mantener un torque regulado en todo el rango de velocidades.

2.2 Tecnologías de variadores aplicadas a sistemas de presión constante.

Un sistema de presión constante mutibombas debe cumplir con el funcionamiento de bombas en cascada y la alternancia, para ello se utiliza arreglos con variadores de velocidad y PLCs en muchos casos. Dentro de este ámbito, dependiendo de la potencia y cantidad de bombas, se definirán dos tipos de dos arreglos de control: sistema con bomba principal controlada y auxiliares en arranque directo y sistema con bomba principales y auxiliares controladas.

2.2.1 Sistema con bomba principal controlada y auxiliares en directo

Se basa en controlar sólo una bomba principal mediante un variador de velocidad para así poder tener un arranque suave, y mediante un transmisor de presión y el controlador PID incorporado del equipo, se puede regular de forma autónoma la presión del sistema. Como se muestra en la figura (a modo de ejemplo), para este sistema es necesario utilizar un arreglo de equipos elaborando un circuito de fuerza y de control. Normalmente se utiliza un juego de contactores de fuerza y una lógica de control de relés (ya sea incorporado en el variador o mediante un PLC), que permiten que las bombas auxiliares arranque en directo y ayudar a la bomba principal dependiendo de la medida de presión del sensor. El sistema mantiene estable la presión con el controlador PID, de acuerdo a la referencia dada por el usuario.

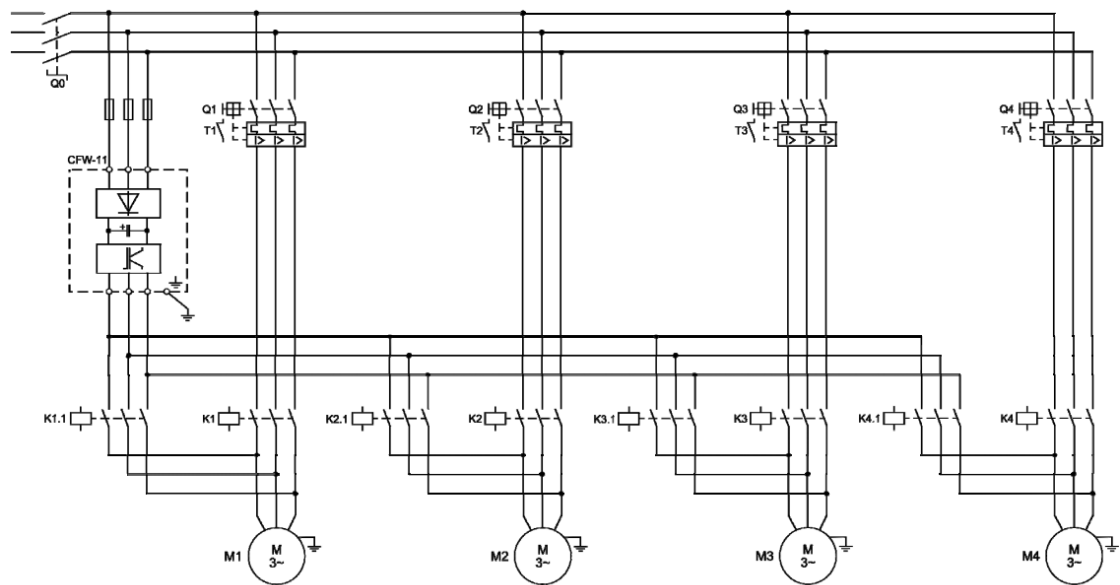


Figura N° 22. Circuito de fuerza para el control de un sistema en cascada con alternancia de bombas

[Fuente: WEG]

Estos sistemas son utilizados para bombas de baja potencia, ya que el hecho de que las bombas auxiliares entren en directo, pueden ocasionar el clásico golpe de ariete y dañar progresivamente las tuberías. Teniendo bombas de baja potencia, este fenómeno se minimiza y permite que la funcionalidad de este arreglo sea factible para los usuarios. Otra condición para usar este arreglo es el número de bombas a controlar, ya que se tienen números limitados de relés incorporados en los variadores de velocidad y/o PLCs que pueden arrancarlas en directo. Comúnmente se tienen

arreglos de tres bombas (1 principal y 2 auxiliares) y la potencia máxima para este sistema, dada la disponibilidad de marcas es de 30HP; cabe resaltar que los motores que se utilizan con variadores son trifásicos, tipo jaula de ardilla y asíncronos debido a su baja necesidad de mantenimiento continuo.

2.2.2 Sistema con bomba principal y auxiliares controladas

Este sistema consta de un arreglo de múltiples bombas cada una controlada directamente por su respectivo variador de velocidad. Los equipos se comunican mediante un enlace físico y un protocolo industrial, en el cual intercambian información y realizan acciones brindadas por un equipo principal llamado “maestro”; los demás dispositivos que obedecen éstas instrucciones son denominados “esclavos”.

Todos los variadores comparten, por medio de comunicación, el nivel de presión del sistema, el maestro regula la bomba principal y manda a arrancar una bomba adicional enviando la señal de marcha al variador respectivo, si el sistema lo requiere. Este arreglo se implementa cuando se tienen motores de alta potencia, que si arrancasen directamente desde la red, perjudicarían directamente a las tuberías del sistema, ya que el golpe de presión sería enorme.

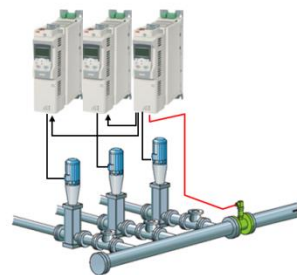


Figura N° 23. Control multibombas [Fuente:ABB]

Aquí también se realiza el proceso de bombas en cascada y la alternancia de bomba principal. El objetivo principal es tener un sistema confiable, redundante, eficiente y a prueba de fallas; con el menor equipamiento posible y poder lograr un ahorro considerable tanto en costos de implementación como en costos por funcionamiento.

Con el avance tecnológico, es posible elaborar la red de comunicación sin necesidad del uso de un PLC externo que comande los variadores con algún programa creado, sino que los equipos ya cuentan con esta característica: la de ser maestro de comunicación.

Este tipo de sistema se implementa de acuerdo a las siguientes necesidades:

- En un sistema viejo y de tuberías débiles donde enormes golpes de presión pueden provocar fugas.
- En una central de bombeo de presión constante, en las cuales se tienen un número elevado de bombas.
- En los sistemas con grandes variaciones en el flujo.
- En lugares donde no hay lugar para tablero pero si para equipos variadores de velocidad que pueden ser montados en pared uno tras otro con grado de protección elevado.

2.3 Estado del arte: tecnologías disponibles en el mercado peruano

A continuación se mostrarán las distintas tecnologías y marcas encontradas en el mercado peruano para la elaboración de este sistema.

2.3.1 Santerno

La marca SANTERNO brinda una solución especializada en bombeo con el modelo SINUS PENTA y un firmware adicional descargable para el variador. Para propósitos multifuncionales puede controlar motores desde 2HP hasta 350HP en 220V y desde 4HP a 1000HP en 440V [13]. Posee 2 entradas análogas de tensión y corriente (configurables), 8 entradas digitales, 3 salidas análogas, 2 salidas digitales y 2 salidas de relé, además cuenta con reactancias de entrada opcionales para el filtrado de armónicos [14].

Posee un panel alfanumérico de 11 leds y 12 teclas, con dos líneas de visualización de magnitudes (elegidas por el usuario) y avisos de estado del variador [15].

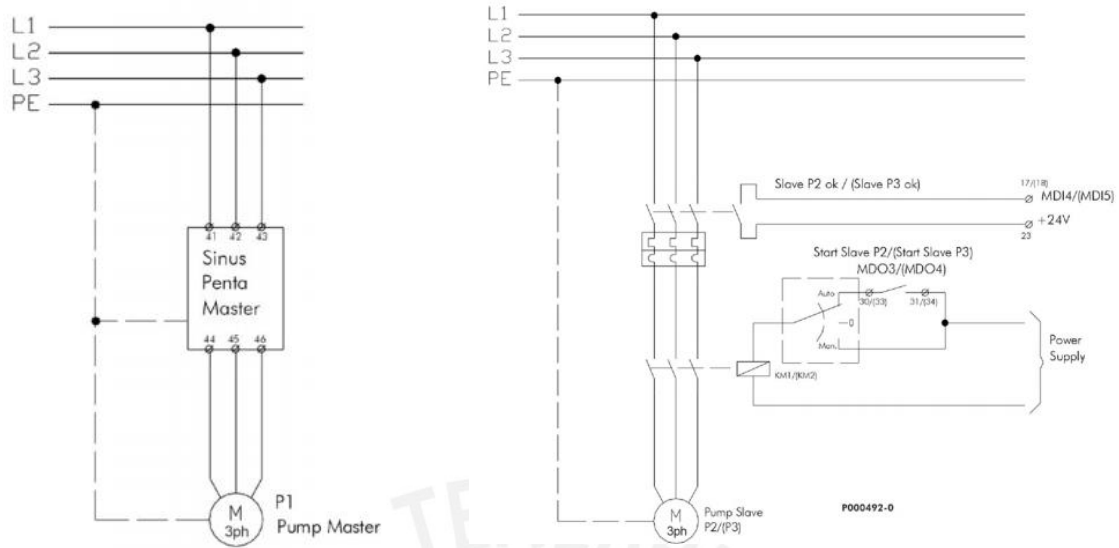


Figura N° 25 circuitos de fuerza para el control de bomba principal y auxiliar respectivamente [17].

Es necesaria la elaboración de un tablero de control y fuerza ya que sus 2 salidas digitales (necesarias para la aplicación) sólo reciben señal de 24VDC, por lo cual es necesario el uso de relés que active los contactores de fuerza y arranque las bombas adicionales, tal como se muestra en la siguiente figura.

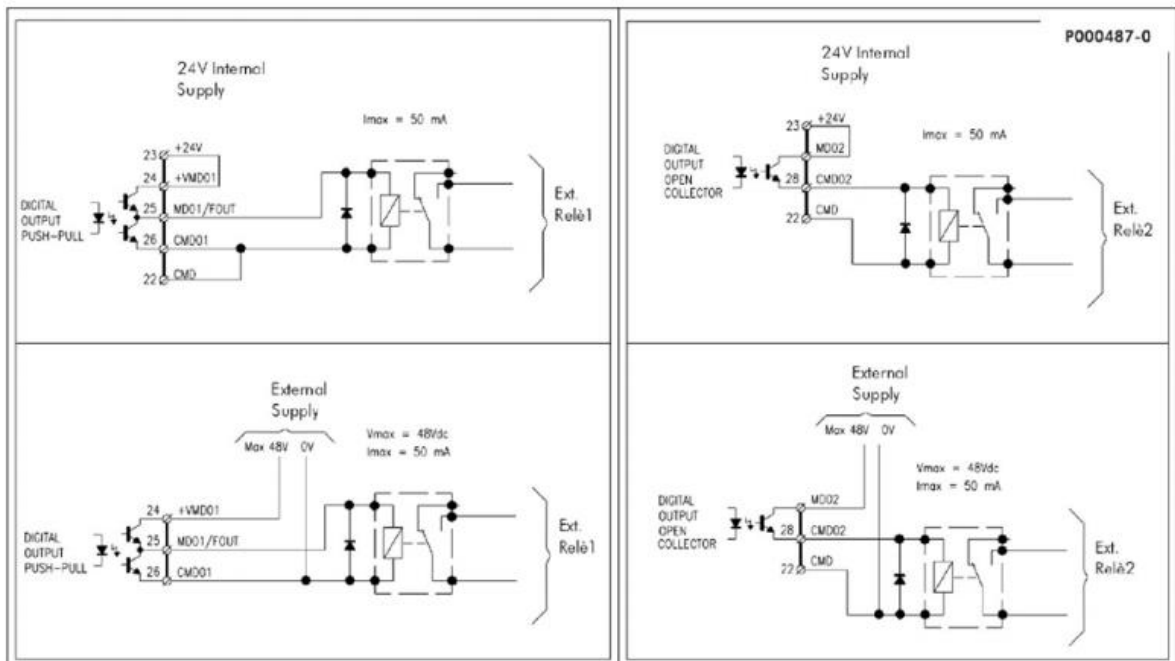


Figura N° 26 circuitos de relé para la activación de los contactores de fuerza [17].

El equipo posee un algoritmo de control inteligente integrado para el control de sus salidas. Al igual que en el sistema anterior, es de vital importancia el uso de un transmisor de presión y el uso del controlador PID incorporado.

El modelo SINUS PENTA realiza el sistema de control multibombas por medio de comunicación con equipos esclavos, a este modo de control lo denominan “bombas esclavas de velocidad variable” [16]. Tiene la posibilidad de contar con múltiples maestros para obtener redundancia, por si existiera pérdida del primer maestro. Es requerida la actualización del variador a un firmware especial (costo adicional) y tiene la posibilidad de controlar hasta 5 bombas en total (un maestro y 4 esclavos). Para descargar el programa en el variador es necesario contar con el software de programación para PC (con un costo adicional) llamado “Remote drive Software”

Para realizar este sistema se debe cumplir con un solo requisito: las potencias nominales de los motores deben ser iguales.

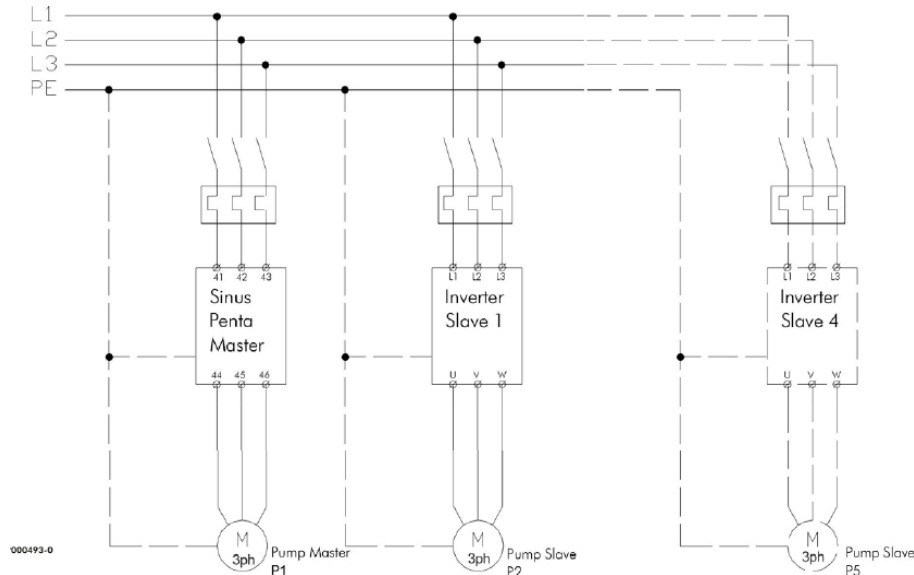


Figura N° 27 control multibombas maestro/esclavo [17].

Como se observa en la figura, cada motor tiene su respectivo variador, los cuales van conectados vía comunicación serial modbus RS485. Existe la posibilidad de contar con un algoritmo multimaestro (2 maestros posibles) para obtener redundancia en el sistema y mayor seguridad ante fallos previstos por pérdida del primer maestro.

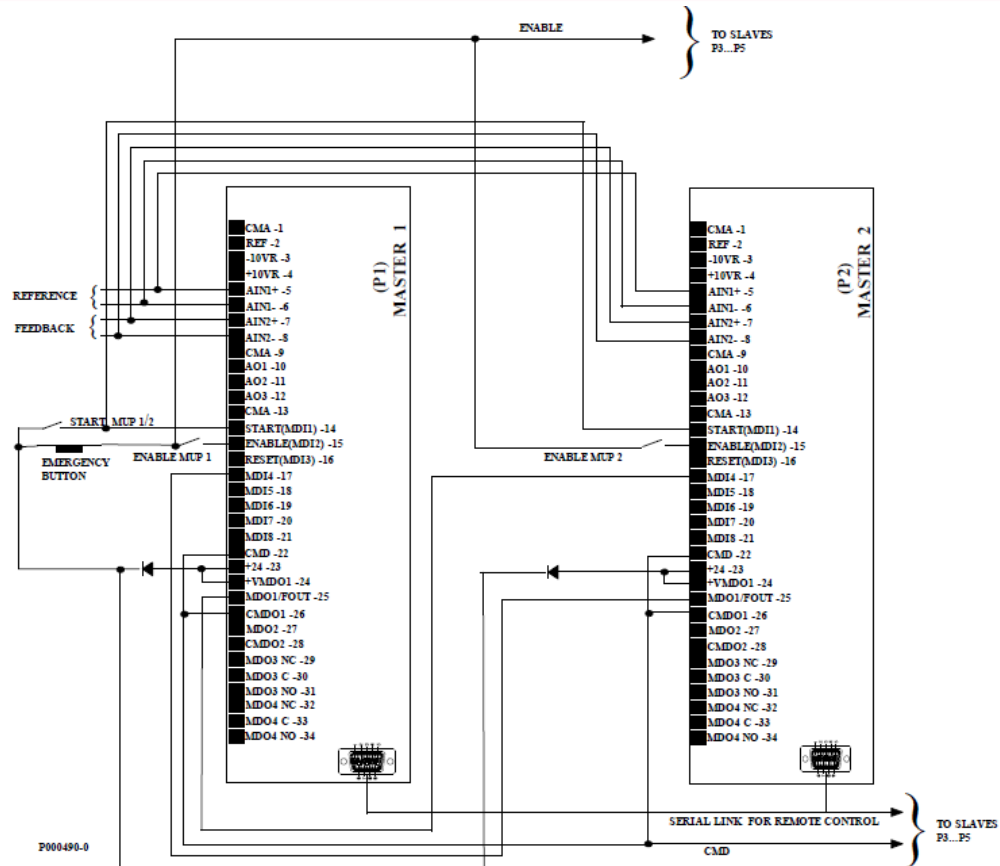


Figura N° 28 conexión mutibombas maestro/esclavo [17].

El funcionamiento de marcha/paro de los variadores es en base a los siguientes criterios [17]:

- 1) Porcentaje de la potencia de trabajo necesaria para la bomba principal (lo que permite un rendimiento óptimo de la planta).
- 2) Error de ajuste máximo permitido.
- 3) Diferencia máxima entre el tiempo de trabajo de cada bomba disponible. (Con esto es posible realizar la alternancia de bombas).

En condiciones normales de funcionamiento, el sistema actuará de acuerdo a demanda de presión (sensor de presión requerido); el maestro actuará como bomba principal y el resto serán bombas auxiliares accionadas por variadores de velocidad. Sin embargo, si se requiere quitar la unidad maestra primaria del circuito para darle mantenimiento, el accionamiento maestro secundario se hará cargo perfectamente de la operación de todo el sistema multi-bomba.

Si es necesario, la unidad maestra secundaria dará instrucciones al sistema para aumentar o disminuir las velocidades de las bombas de esclavas y satisfacer el nivel de caudal necesario, debido a que el maestro principal fue retirado de servicio, para mantener una presión constante a medida que lo requiera el sistema.

En caso de que la unidad maestra primaria volver en línea en el sistema, entonces el maestro secundario continuará controlando toda la operación multi-bomba y el maestro principal actuará como un dispositivo esclavo.

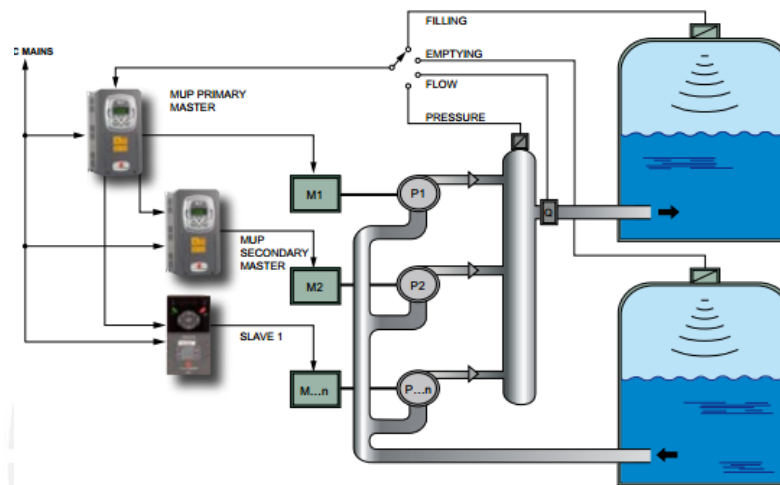


Figura N° 29 diagrama del sistema multibombas maestro/esclavo multimaestro [16].

2.3.2 Danfoss

El variador de velocidad de la serie VLT Aqua drive de la marca DANFOSS incorpora dentro funciones especializadas, cuenta con interfaces de entrada/salida para poder realizar el sistema multibombas. El rango de potencias en este modelo varía desde 0.35HP hasta 60HP en 200V y de 0.5HP a 1350HP en 440V. Posee 2 salidas de relé, 2 entradas/salidas programables, 5 entradas digitales, 2 entradas análogas y 2 salidas análogas [18]. Puede controlar 3 bombas en el modo básico y 6 bombas haciendo uso de la expansión de sus salidas de relé (opcional).

El panel operativo consta de 16 botones, 3 leds indicadores de navegación, 3 leds indicadores de operación y una pantalla LCD alfanumérica que muestra hasta 5 magnitudes de operación en tiempo real [18].

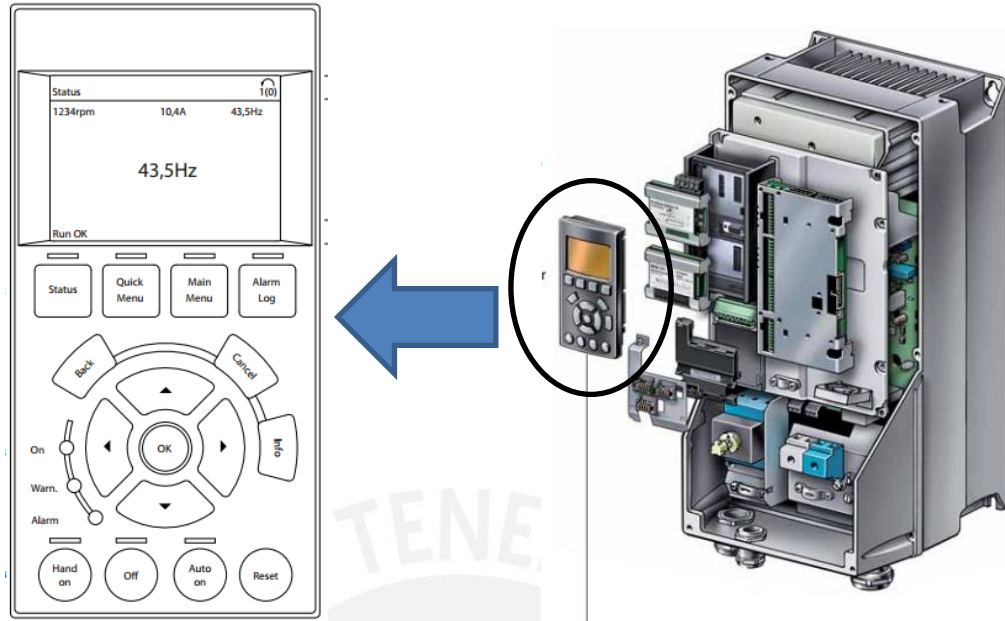


Figura N° 30 variador y panel gráfico del VTL AQUA Drive [Fuente: Danfoss].

Dentro de sus funciones especializadas para bombeo tenemos lo siguiente [18]:

- Controlador de bombas en cascada, posee un algoritmo interno que le permite controlar las salidas de relé para arrancar las bombas auxiliares.
- Detección arranque seco.
- Alternancia de bombas
- Protección de válvula check
- Detección de baja carga
- Llenado de tubería
- Protección de cavitación
- Modo dormir y despertar
- Control maestro/esclavo multibomba

Para realizar el control multibombas, se tiene el siguiente diagrama eléctrico:

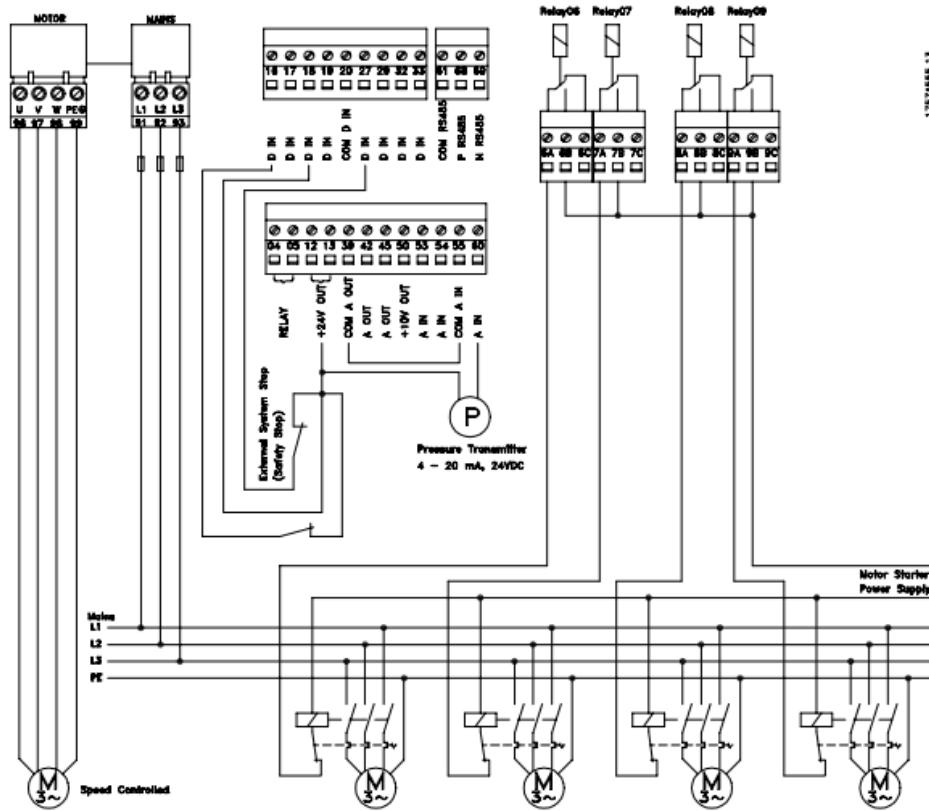


Figura N° 31 Circuito de control de bombas VLT AQUA DRIVE [Fuente: Danfoss].

En él se observa que la salida del variador va dirigida directamente a la bomba principal y las salidas de relé conectan las bombas auxiliares de acuerdo a demanda de presión. Se visualiza además la presencia de un transmisor de presión, el cual le brinda la información del sistema en tiempo real y realizar el algoritmo PID. Se requiere elaborar un tablero de mando y el diseño de un y circuito de fuerza y control para la implementación de este sistema.

Adicionalmente nos brinda una solución multibombas en el variador VLT Aqua Drive. Como se mencionó anteriormente, este variador es capaz de controlar bombas en cascada y alternancia mediante comunicación serial entre sus equipos. No necesita de PLC y es capaz de controlar hasta 8 bombas en paralelo mediante la aplicación de maestro esclavo [19]. Adicionalmente es necesario el uso de un sensor de presión conectado a la bomba principal, que le dé la información real del sistema y usando el controlador PID interno, es capaz de regular directamente el flujo de agua de las bombas para la presión requerida. Se requiere que todas las bombas sean de la misma potencia y velocidad nominal [20].

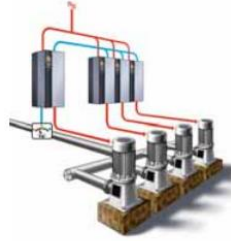


Figura N° 32 diagrama del sistema mutibombas maestro/esclavo [19].

El variador maestro, ofrece redundancia y mejora la eficiencia del sistema comandando cada bomba a su velocidad óptima de funcionamiento.

Es necesaria la adquisición del software MUSEC para poder realizar la configuración de los variadores por comunicación serial.

2.3.3 ABB

La empresa ABB brinda una solución integral para aplicaciones de bombeo en general, tanto para el control de bombas de agua potable, aguas residuales, relave, etc. La serie es apta para el control de motores eléctricos trifásicos de 0.5HP a 30HP en 220V y de 1.5HP a 700HP en 440V. Posee 2 entradas análogas de voltaje o corriente (programables), 2 salidas análogas de 0 a 20mA (programable de 4 a 20mA), 6 entradas digitales, 2 entradas/salidas programables, 2 salidas de relé 250V AC/30VDC, además de tener como opción la extensión de sus interfaces de entrada/salida [21]. Es posible controlar 4 motores en su forma estándar y hasta 8 motores con su extensión de salidas de relé.

Cuenta con un panel de control intuitivo de 8 botones de función, pantalla LCD alfanumérica, con 3 líneas para mostrar magnitudes del proceso en tiempo real y etiquetas de estado en la parte superior, además cuenta con reloj en tiempo real integrado en el panel [21].

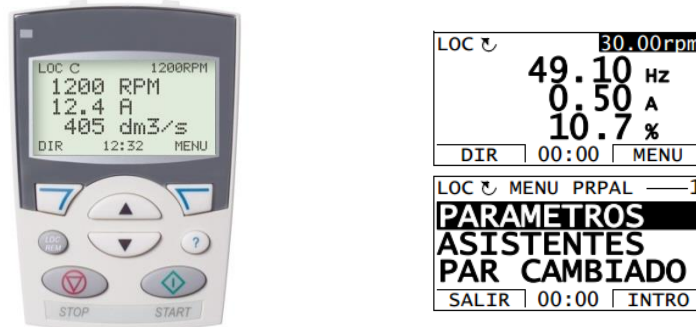


Figura N° 33 panel de control del ACQ810 [22].

Una de las características especiales del firmware del variador es que posee las llamadas “macros de aplicación”, que son configuraciones de aplicación pre-programadas desde fábrica que permiten reducir el tiempo de puesta en servicio del equipo:

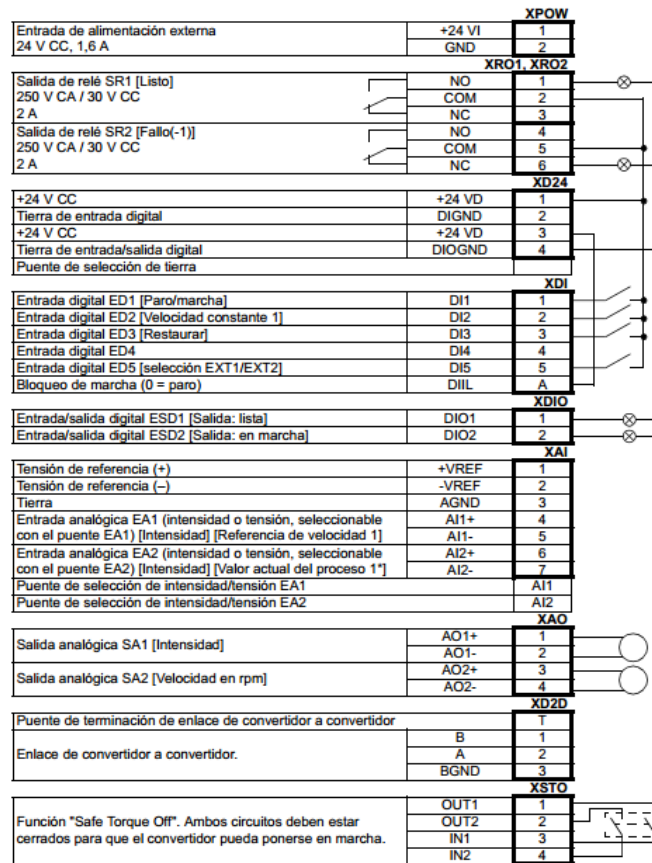


Figura N° 34 macro de aplicación control estándar ACQ810 [22].

Las macros son netamente flexibles ya que las configuraciones son generales y modificables, la ventaja de ellas es que seleccionando cada macro, la pantalla se auto-configura para mostrar sólo los parámetros competentes a la aplicación dada (es

posible mostrar también la lista completa de parámetros) y reducir el tiempo de configuración de manera considerable.

Las principales características para el sistema multibombas se mencionan a continuación [23]:

- Macros de aplicación: Control Tradicional (regulación de bomba principal y arranque de bombas auxiliares en directo), Control multibomba (control por comunicación serial entre variadores de velocidad controlando su respectiva bomba)
- Enlace serial Drive to Drive integrado (protocolo especial de ABB usando el medio físico RS485), para realizar aplicaciones de maestro esclavo entre equipos.
- Función limpieza de bombas, realiza una serie de arranques y paradas de manera intempestiva por cortos periodos de tiempo para limpiar las aletas de las bombas centrífuga.
- Función dormir y despertar.
- Cálculo aproximado del caudal sin necesidad de caudalímetro (precisión de entre 3 a 6 % de acuerdo del modo de funcionamiento).
- Función refuerzo de presión (boost), esta función permite inyectar un porcentaje de presión adicional al sistema para que el tiempo de descanso de la bomba sea mayor. Ésta función reemplazaría el uso de los tanques hidroneumáticos, necesarios para mantener la presión del sistema el mayor tiempo posible.
- Función llenado suave de tubería, para evitar golpes de presión por el PID.
- Función de protección de bomba.
- Funciones de eficiencia energética, calcula el ahorro energético del sistema en comparación del uso de un sistema de estrangulamiento. Muestra el ahorro en kWh, reducción de emisiones de CO₂ y en moneda local.

Para realizar el sistema de control multibombas, se necesita la realimentación del nivel de presión del sistema mediante un sensor de 4 a 20 mA conectado a una de sus entradas análogas. El algoritmo de control interno se encarga de comandar las salidas de relé de acuerdo al controlador PID incorporado, realizando el arranque directo de las bombas auxiliares.

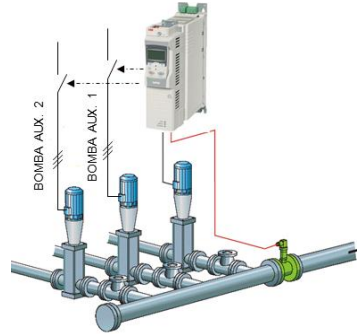


Figura N° 35 control tradicional de bombas ACQ810 [23].

Se requiere de la elaboración de un tablero eléctrico con sus respectivos circuitos de fuerza y control, además de incluir los dispositivos de protección necesarios para sobrecarga y cortocircuito. En la figura se muestra el uso de guardamotores y fusibles para cumplir ambas protecciones respectivamente.

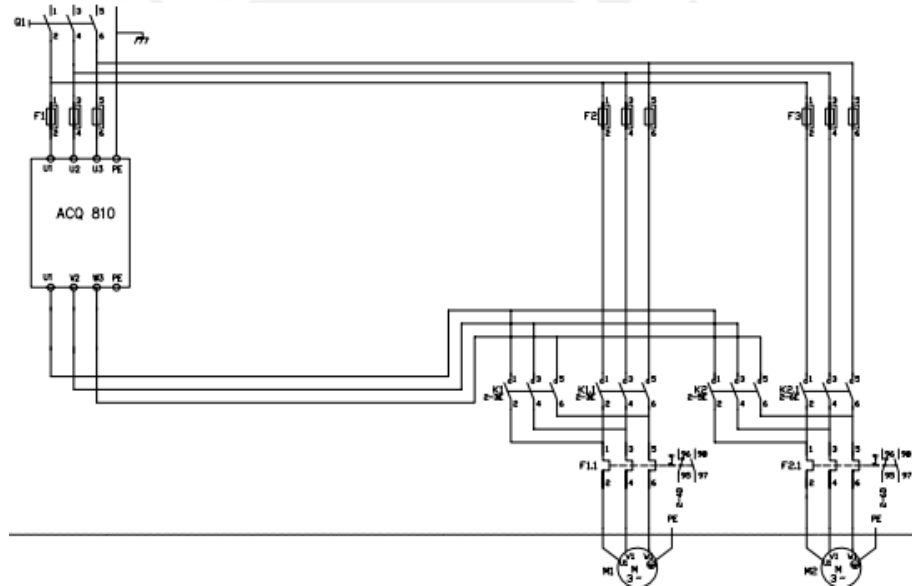


Figura N° 36 control tradicional de bombas ACQ810 [22].

Adicionalmente, el variador de velocidad ACQ810 de ABB ofrece una solución por comunicación serial en la cual se tienen las bombas controladas cada una por su propio dispositivo. Es posible controlar hasta 8 bombas en paralelo.

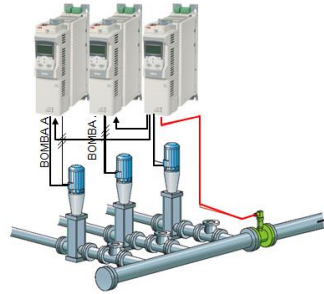


Figura N° 37 diagrama del sistema mutibombas maestro/esclavo [23].

Como ya se mencionó, siempre es requerida la presencia de un sensor de presión que pueda realimentar con la información de presión real.

La comunicación entre equipos se realiza mediante el protocolo serial D2D (drive-to-drive) propio de ABB integrado en el variador, utiliza la interfase Modbus RTU propia del equipo y necesita de cables apantallados de 2 hilos.

Las señales tanto digitales como análogas son compartidas entre los drives desde el maestro por comunicación.

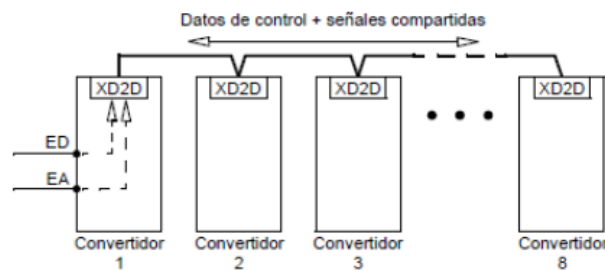


Figura N° 38 diagrama de interconexión entre variadores por comunicación [23].

Anteriormente se mencionó que el equipo cuenta con macros especializadas para cada aplicación; dentro de la macro multibombas, se pueden elegir entre 3 tipos de control por comunicación:

- Velocidad del maestro (master speed)
- Velocidad constante (constant speed)
- Copia del maestro (master copy)

Además de estas funcionalidades, es posible priorizar la bomba a encender y cambiar de variador maestro cada fracción de tiempo programado. Es posible contar con la habilitación de múltiples maestros para dar redundancia al sistema, en caso que la bomba principal se dañe.

2.4 Modelo teórico

Se desea diseñar e implementar ambos tipos de control de bombas (control por un solo variador y control con múltiples variadores por comunicación) sistemas en un solo módulo, el cual nos permitirá evaluar el desempeño y simular el funcionamiento de un sistema de presión constante, así como poder usar este equipo como modelo didáctico para aprender a configurar y programar variadores de velocidad.

En primer lugar, es necesaria la evaluación entre las diversas tecnologías disponibles en el mercado peruano; se tomarán en cuenta criterios de costos, dispositivos requeridos, funcionalidades, interfaz y facilidad de programación.

Se diseñarán en conjunto los circuitos de fuerza y control, seleccionando cada dispositivo necesario tanto, de protección y conmutación; elaborando un diagrama en el programa AutoCAD.

Posteriormente se supervisará la construcción y cableado del tablero, verificando cada punto del circuito con el fin de evitar errores.

El modelo de fuerza teórico se muestra en la siguiente figura:

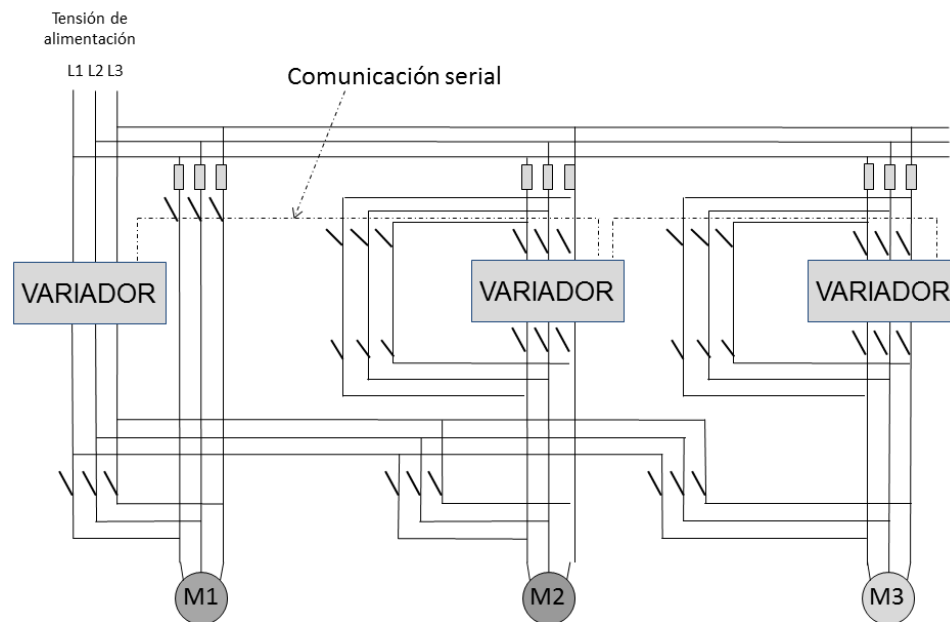
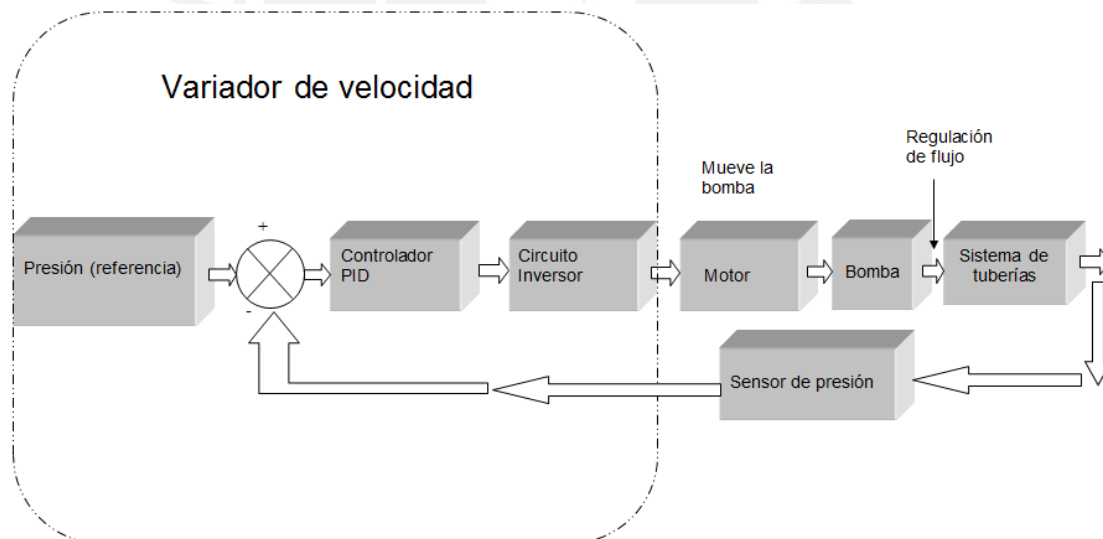


Figura N° 39 modelo teórico del circuito de fuerza [Elaboración propia]

Como se puede observar, este modelo cumple con los 2 métodos de control explicados anteriormente. El variador del motor 1 realizará el arranque en cascada y la alternancia con bombas auxiliares conectadas en directo, mientras que los otros variadores estarán desconectados de este modo por medio de un selector perteneciente a la etapa de control (By-pass observado a la izquierda de cada equipo). Luego en el modo de funcionamiento por comunicación serial, los variadores de velocidad compartirán información sobre la señal de presión del sistema y comando que enviará el maestro (bomba principal), realizando el arranque de las bombas auxiliares de manera suave de acuerdo al algoritmo de control PID interno. Cabe resaltar que el sistema será redundante y contará con múltiples maestros por si la bomba principal se deshabilita, para así no comprometer el funcionamiento del proceso.

Una vez implementado el tablero, se realizará la programación del equipo por medio de sus parámetros internos.



El algoritmo de regulación de presión de muestra en el siguiente diagrama:

Figura N° 40 modelo teórico de control [Elaboración propia]

Se utilizará el PID interno de cada variador, los cuales funcionarán en sincronía como si se tratara de uno sólo. Se ingresará el nivel de referencia de presión, el cual se compara con la señal de presión externa brindada por el sensor de presión. Esta diferencia es corregida en tiempo real por el controlador PID interno que dará instrucciones de corrección al circuito inversor del variador, quien dará el nivel de

velocidad necesaria para el control del motor y por ende el flujo necesario para la bomba, con el fin de llegar a la presión deseada.

2.5 Síntesis del asunto de estudio

Como ya se ha podido ver, se tienen diversas marcas que han desarrollado tecnologías para poder cumplir con la aplicación demandada, existen muchas características en común como: controlador PID interno, necesidad de un sensor de presión, requieren de la construcción de un tablero eléctrico, entre otras. Las configuraciones dependen de la potencia y número de bombas, el rango de presión a controlar y parámetros de sintonización diferentes del PID. Todas estas tecnologías se fueron desarrolladas para poder elevar la eficiencia en el consumo de energía que se malgasta debido a regulaciones por estrangulación de flujo. El punto concreto es poder analizar cuál de las tecnologías resulta la más adecuada en usar, basándonos en las funciones especiales y exclusivas que no comparten entre sí.

CAPÍTULO 3:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DEMOSTRATIVO POR VARIADORES DE VELOCIDAD

3.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un módulo demostrativo de control por variadores de velocidad para sistemas de presión constante multibombas

3.1.1 Objetivos Específicos

1. Determinar el fabricante y equipo de acuerdo a los requerimientos de un sistema de presión constante multibombas.
2. Diseñar el circuito de fuerza y control del módulo
3. Desarrollar el programa para la aplicación diseñada
4. Comprobar que el sistema no sufra del golpe súbito de presión (“golpe de ariete”).
5. Implementar un sistema de simulación y visualización de variables.

3.2 Requerimientos del sistema

Para esta aplicación, se cuenta con 3 motores de la marca ABB de 1.5 HP cada uno a 220V trifásicos.

Se implementará un módulo que pueda cumplir los siguientes requerimientos:

- Tensión alimentación de 220V trifásicos, ya que se necesitará arrancar en directo los motores eléctricos trifásicos de las bombas auxiliares.
- Potencia del sistema 4.5HP (suma de los 3 motores).
- Corriente nominal de operación de cada motor 4.63A, de acuerdo al dato de placa.
- Altura de operación hasta 1000msnm.
- Rango de presión del sistema 0 a 10 bar (rango convencional de los sensores de presión en tuberías de agua).
- Presión requerida de 6 bar, punto de referencia para mantener ese valor de presión constante.
- Control de bombas en cascada y alternancia, tanto para arranque directo, como para la aplicación por comunicación serial.

- Sobrecarga ligera de 110%, de acuerdo al tipo de carga, en este caso carga de torque cuadrático.
- Rango de corriente para entrada análoga de 4 a 20mA.
- Datos tomados del edificio del tesista:
 - Se considerará un edificio de 15 pisos con un caudal de 10000 l/h.
 - Con 5m de altura de succión y longitud de tubería de 20 m.
 - 45 metros de impulsión y longitud de tubería de 150 metros.
 - Tubería de hierro fundido con diámetro externo de 88.9mm (3 pulg) y espesor de 3.25mm.
 - Se considerarán las pérdidas como despreciables, para el cálculo, ya que no influyen significativamente.

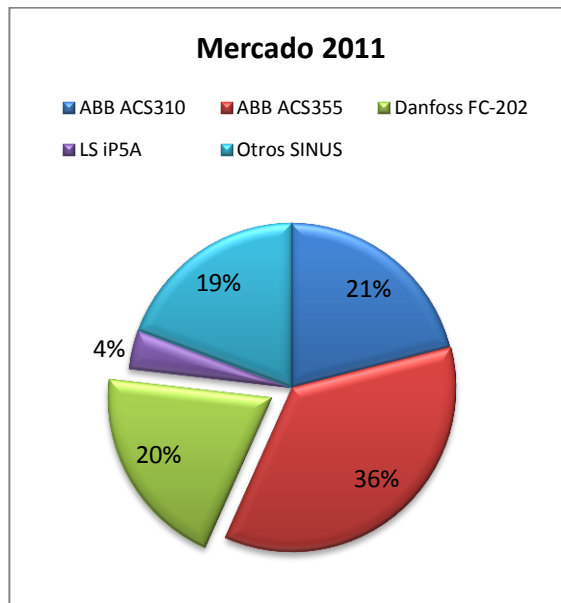


3.3 Selección de la tecnología a utilizar

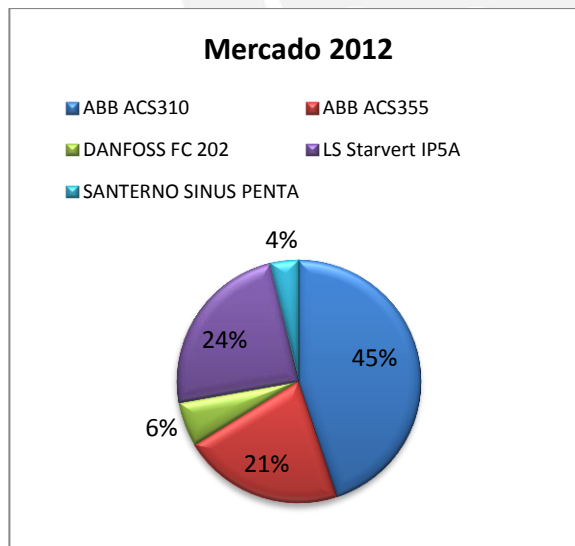
A continuación presentamos una tabla comparativa entre 3 tecnologías por variadores de velocidad existentes en el mercado peruano:

Criterio	ABB	SANTERNO	DANFOSS
N° máx de bombas	8	5	8
Sistema 1 (lógica de relés)	Sí (requiere de relés de expansión)	Sí (requiere de relés de expansión)	Sí (requiere de relés de expansión)
Sistema 2 (comunicación)	Enlace D2D usando medio físico RS485 (software opcional de programación DriveStudio)	Serial Modbus RTU (Requiere de actualización de firmware y adquisición de software adicional RemoteDrive)	Enlace Serial Modbus RTU (requiere de software Musec para programación)
Funciones especializadas de bombeo	<ul style="list-style-type: none"> -Macros de aplicación -Enlace serial Drive to Drive -Función limpieza de bombas -Función dormir y despertar. -Cálculo aproximado del caudal -Función refuerzo de presión -Llenado suave de tubería -Protección de bomba. -Eficiencia energética -Detección de baja carga 	<ul style="list-style-type: none"> -Control maestro esclavo -Tarjeta de extensión de interfaces de entrada/salida (para la 5ta bomba) -Modo Dormir y Despertar 	<ul style="list-style-type: none"> -Controlador de bombas en cascada -Detección arranque seco. -Alternancia de bombas -Protección de válvula check -Detección de baja carga -Llenado de tubería -Modo dormir y despertar
Interface de programación (panel)	Cuenta con un panel de control intuitivo de 8 botones de función, pantalla LCD alfanumérica, con 3 líneas para mostrar magnitudes del proceso en tiempo real y etiquetas de estado en la parte superior, además cuenta con reloj en tiempo real integrado en el panel	Panel alfanumérico de 11 leds y 12 teclas, con dos líneas de visualización de magnitudes (3 elegidas por el usuario) y avisos de estado del variador.	Panel alfanumérico de 16 botones, 3 leds indicadores de navegación, 3 leds indicadores de operación y con 5 magnitudes de operación en tiempo real
Control mutimaestro con redundancia	Sí	Sí	No

Adicionalmente se tienen los siguientes resultados de dos estudios de mercado realizados en el año 2011 y 2012, tomando en cuenta las ventas de variadores de velocidad de modelos dedicados a esta aplicación:



MARCAS	TOTAL EN USD
ABB	199,031
ACS310	73,840
ACS355	125,191
Danfoss	70,575
FC-202	70,575
LS	13,482
iP5A	13,482
SANTERNO	67,914
SINUS	67,914
Total general	351,002



MARCAS	TOTAL EN USD
ABB	227202
ACS310	153,775
ACS355	73,427
DANFOSS	20227
FC 202	20227
LS Starvert	82466
IP5A	82466
SANTERNO	12756
SINUS	
PENTA	12756
Total general	342651

Figura N° 41 Estudios de mercado de los años 2011 y 2012 [Elaboración propia]

En los estudios mostrados, podemos ver la presencia de la marca ABB en el mercado peruano, en comparación con las otras. Los modelos ACS310 y ACS355 son utilizados para la aplicación multibombas.

El modelo nuevo ACQ810 recién entró en circulación en el 2014, por lo que se puede esperar que las ventas y la calidad de esta marca y modelo sigan con el mismo volumen de distribución.

Por lo tanto elegiremos el variador ABB ya que cuenta con control multimaestro, funciones especializadas para bombas, no requiere de software adicional para realizar la aplicación, posee macros de aplicación para una puesta en marcha sencilla y rápida, además de contar con funciones de protección incorporadas para una supervisión en tiempo real de nuestra aplicación. Además cuenta con garantía de un año de funcionamiento y con la posibilidad de extenderla a dos.

3.4 Descripción del sistema

3.4.1 Software

Como se mencionó anteriormente, el variador de velocidad ACQ810 cuenta con algoritmos de control de sus interfaces de entradas/salidas y comunicación serial integrada.

Respecto a la comunicación, se tienen tres distintos modos de control y acción de los variadores auxiliares, los cuales se detallan a continuación:

- Velocidad del maestro (master speed): este tipo de control, de acuerdo a demanda de presión, cada variador se prende en cascada. El primer convertidor (maestro) comienza el funcionamiento hasta llegar al tope máximo de velocidad de la bomba, si se requiere que una bomba auxiliar arranque, el maestro envía la señal de arranque al esclavo y automáticamente el maestro reduce su velocidad hasta un punto mínimo designado. Las velocidades de bomba auxiliar y la bomba principal se encuentran en un punto medio y se sincronizan. Si se requiere una tercera bomba, se repite el ciclo sincronizándose sucesivamente (ver figura 26).

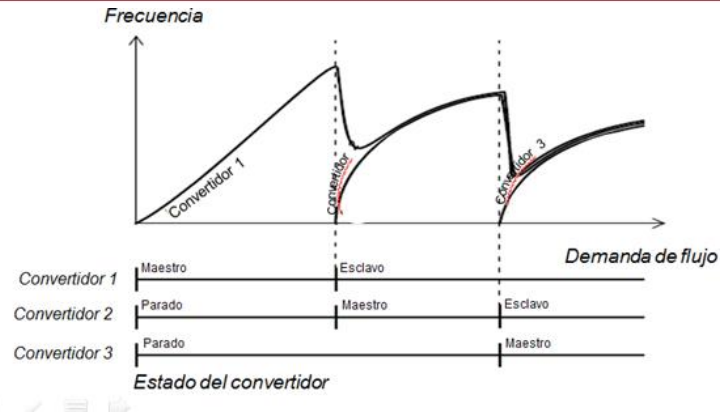


Figura N° 42 control “master speed” [22].

- Velocidad constante (constant speed): este modo se basa en que las bombas van entrando de acuerdo a demanda de presión y se quedan en una velocidad fijada anteriormente en la programación. Siendo el último variador encendido el que regule el flujo del sistema.

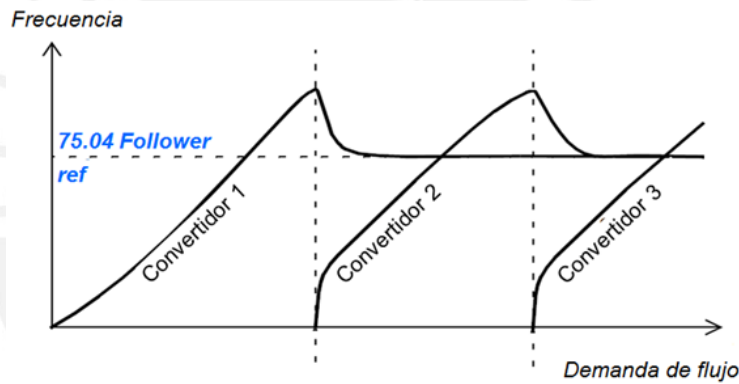


Figura N° 43 control “constant speed” [22].

- Copia del maestro (master copy): basado totalmente en el funcionamiento de manera síncrona de todas las bombas conectadas, que siguen fielmente la velocidad dada por el maestro.

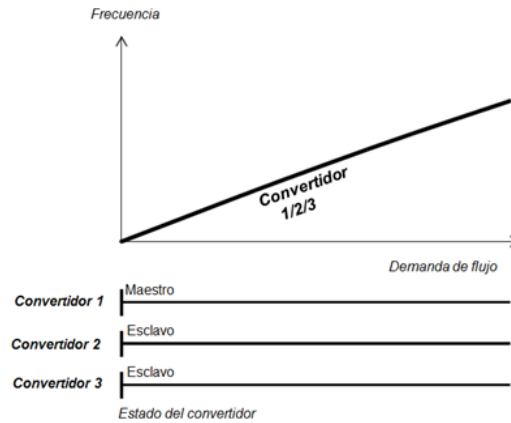


Figura N° 44 control “master copy” [22].

Además de estas funcionalidades, es posible priorizar la bomba a encender y cambiar de variador maestro cada fracción de tiempo programado. Es posible contar con la habilitación de múltiples maestros para dar redundancia al sistema, en caso que la bomba principal se dañe.

3.5 Diseño de circuitos

Para el diseño del circuito de fuerza y control, se tomó en cuenta 2 macros de aplicación integradas en el variador de velocidad, éstas son: la macro tradicional y la macro control multibombas.

3.5.1 Diseño del circuito de fuerza.

A continuación se muestra el circuito de fuerza de la macro “control tradicional”, el cual indica la posibilidad de controlar 2 bombas en simultáneo. Cuenta con un seccionador principal Q1 para la conexión de alimentación a la entrada del variador. La salida del variador se conecta a bornes de los contactores K1 y K2, los cuales son accionados por las salidas de relé para realizar la alternancia de bombas. Es vital resaltar que el variador sólo controla un motor a la vez, el cual es denominado motor principal y el otro es considerado como auxiliar.

Los contactores K1.1 y K2.2 también son controlados por las salidas de relé del variador además de seguir una lógica eléctrica diseñada para esta aplicación.

Si el contacto K1 es cerrado, entonces los contactos K2 y K1.1 permanecen abiertos. En ese momento el variador controla un solo motor, regulado por el controlador PID y si se requiere mayor demanda de flujo que no puede entregarse con un solo motor, entonces el contactor K2.1 es cerrado y se enciende en directo el motor auxiliar para cumplir con la demanda. Cabe señalar que el motor principal sigue siendo regulado por el variador de velocidad.

Al realizar la alternancia de bombas, las funciones de los contactores se invierten. Adicionalmente se muestran fusibles contra fallas por corto circuito (F1, F2 y F3) y guardamotors F1.1 y F1.2 en caso de la deshabilitación de alguna bomba para mantenimiento.

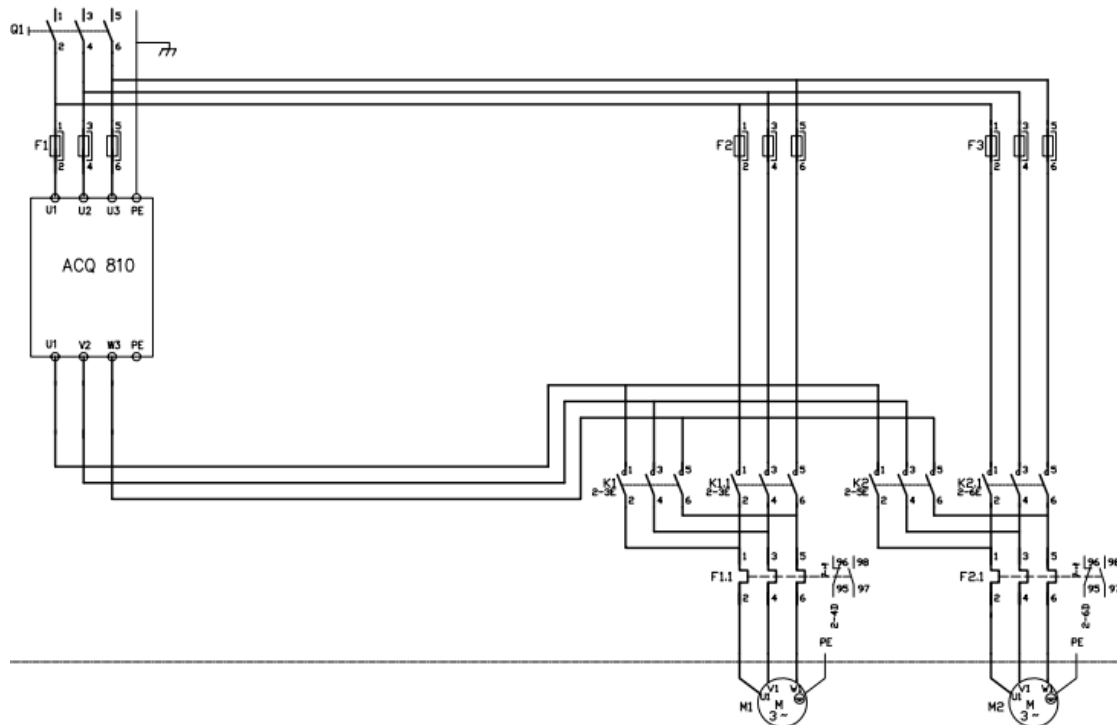


Figura N° 45 Circuito de fuerza macro tradicional con alternancia de bombas [Fuente: ABB].

Para la macro control multibombas, sólo es necesario conectar cada variador con su motor respectivo para que el enlace serial, que con el algoritmo de control programado, realice las funciones de alternancia y encendido de bombas en cascada.

En el diseño total del circuito de fuerza se realizaron modificaciones para acondicionar el control de 3 motores. Se conservan los contactores que realizan la alternancia y el

accionamiento de bombas en cascada por arranque directo, conectados a las salidas de relé del equipo; así como los variadores de velocidad posicionados para controlar sus propios motores.

Se requirió el acondicionamiento de un circuito de by-pass, en los variadores U2 y U3, accionados por un selector externo, el cual intercambia entre los 2 modos de control planteados.

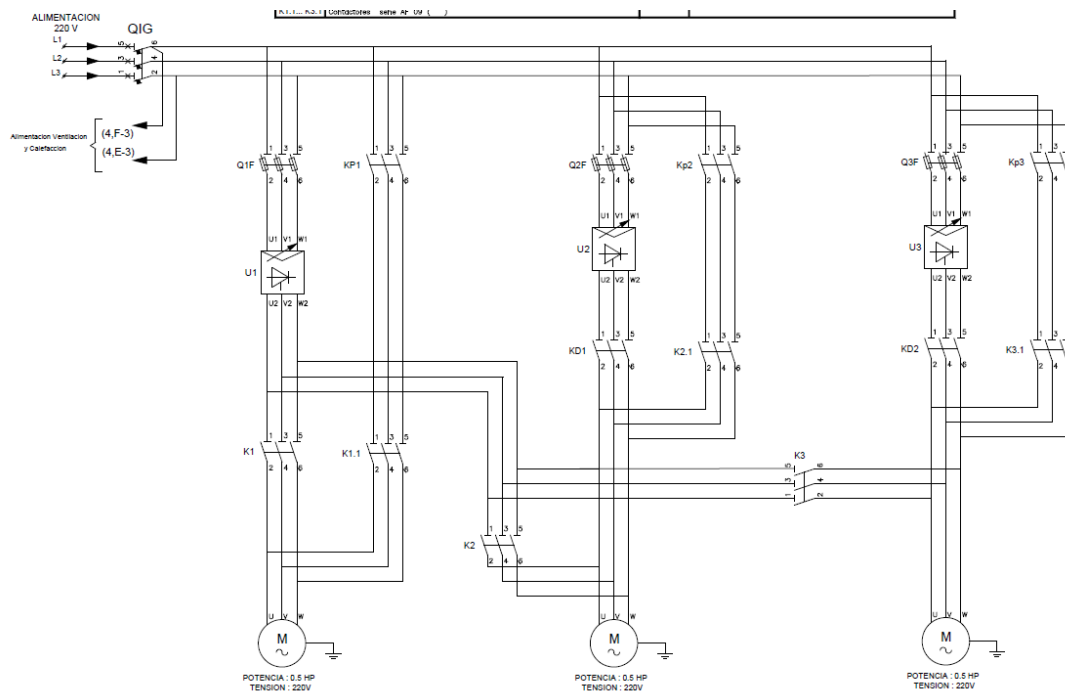


Figura N° 46 Circuito de fuerza del módulo desarrollado [Elaboración propia].

En específico los contactores de cambio de tipo de control son KD1, KD2, Kp2 y Kp3. Si KD1 y KD2 son cerrados (selección de control por comunicación serial entre variadores), entonces Kp2 y Kp3 son abiertos.

El seccionador QIG se acciona manualmente o cuando es activada la parada de emergencia.

3.5.2 Diseño del circuito de control

Para el diseño del circuito de control, se partió del plano de la macro control tradicional.

Se utilizan las entradas de digitales DI2 y DI4 para la habilitación o deshabilitación de bombas del control del variador (interlock), que permite aislar cualquier motor y realizar su mantenimiento.

La entrada digital DI1 se encarga de dar marcha al sistema por medio de un pulsador o selector.

Se conecta el sensor de presión a la entrada analógica AI2, quien nos brindará el valor actual de presión en tiempo real.

Las salidas de relé RO1 y RO2 sirven para realizar la lógica de control de autocambio y el encendido del motor en cascada.

Los selectores S1 y S2 tienen 3 posiciones:

- A(modos automático): sistema controlado netamente por el variador de velocidad para realizar el autocambio y las bombas en cascada
- 0 (modo neutral): Deshabilita el control total del sistema, dejándolo en stand-by.
- H(modos manual): Permite al usuario conectar cualquier bomba requerida directamente a la red.

Así que si seleccionamos el modo automático, las salidas de relé pueden actuar directamente en las bombas.

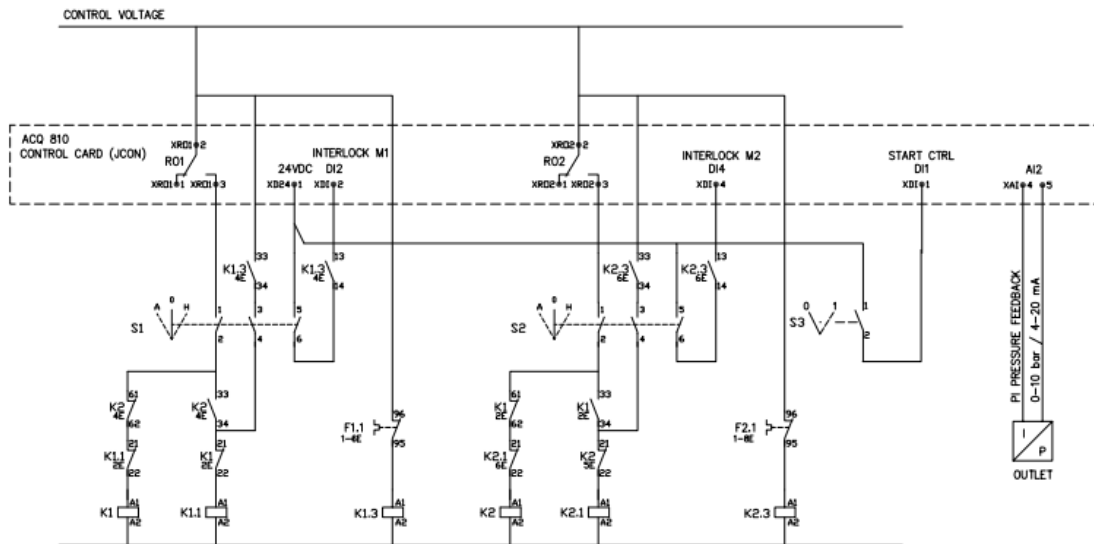


Figura N° 47 Circuito de control Macro tradicional [Fuente: ABB].

Para el diseño actual se considera el uso de la tarjeta de expansión de salidas de relé, la cual nos permite tener las 3 salidas SR1 SR2 y SR3 en total.

Se conserva la estructura del circuito de la macro control tradicional con modificaciones para accionar 3 motores, adicionalmente se agregó el selector S3, el cual selecciona entre dos modos concretos de control:

- Control del motor principal por variador de velocidad y motores auxiliares por arranque directo.
- Control de motor principal y motores auxiliares por variador de velocidad.

Los contactores Kp1, Kp2 y Kp3 accionan el by-pass indicado en el circuito de fuerza para el cambio entre los modos de control.

El pulsador S1 es el de arranque y el S2 de parada.

La salida de relé SK4 se activa si no existe ningún inconveniente en el variador de velocidad, permitiendo su arranque.

En adición se utilizan los pilotos (lámparas) H1, H2 y H3 para indicar si el variador está en marcha, en parada o en fallo.

La salida de relé SR5 se activa si ocurre algún fallo en el funcionamiento del variador, deteniendo toda acción del variador en funcionamiento.



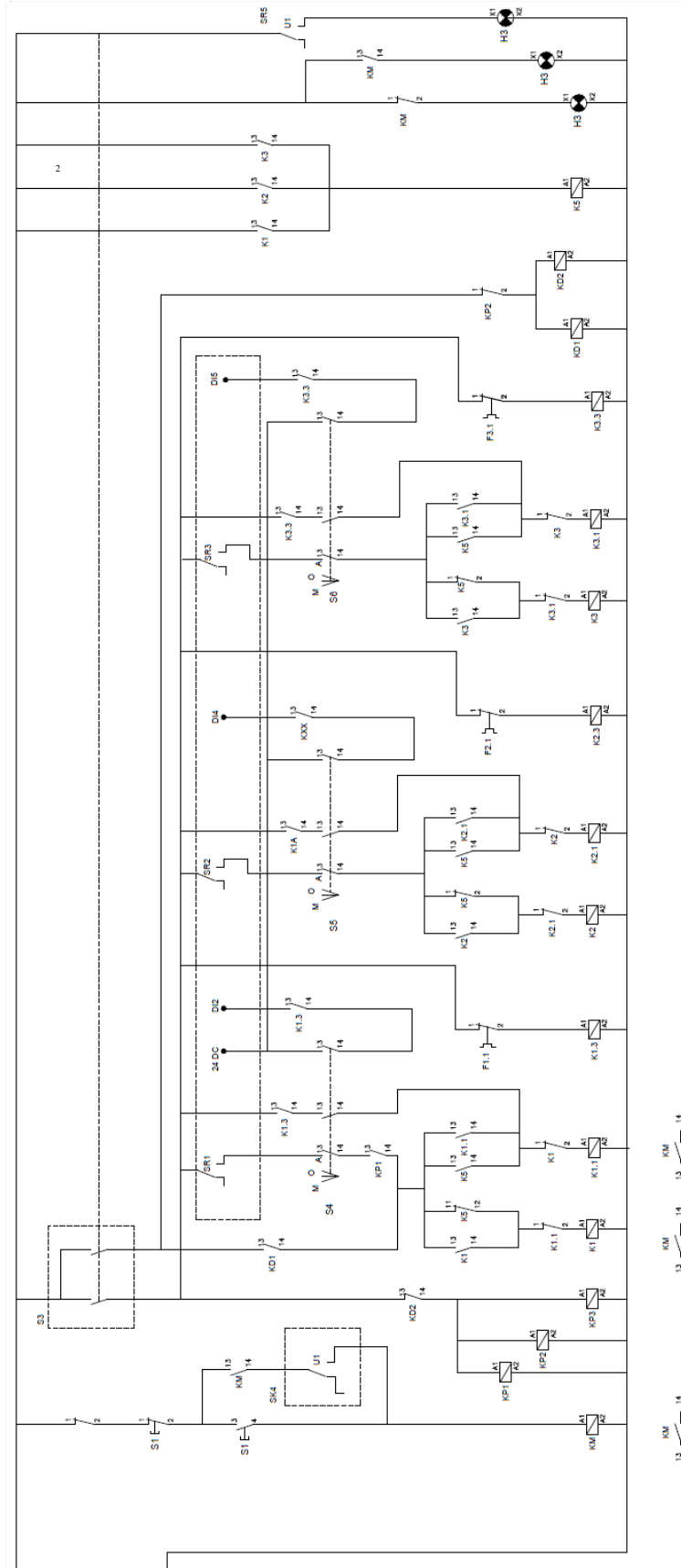


Figura N° 48 Circuito de control del módulo demostrativo [Elaboración propia]

En la siguiente figura, se muestran las conexiones de control directas a las entradas digitales del variador, además de las de comunicación serial integradas en el equipo.

Los pilotos (lámparas) indican el modo de funcionamiento, si nos encontramos en modo de comunicación serial o en modo de arranque de bombas auxiliares en directo.

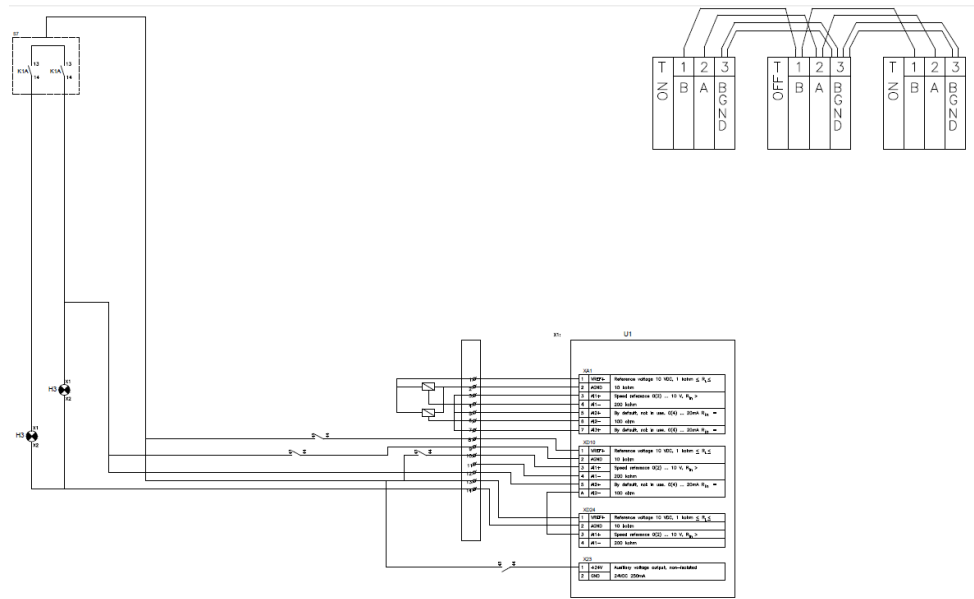


Figura N° 49 Circuito de las E/S digitales del equipo [Elaboración propia].

El protocolo D2D de ABB permite realizar comunicación serial por el medio físico RS485 con cable apantallado. Este tipo de topología de conexión asegura tener redundancia de comunicación entre los variadores.

3.5.3 Selección de los elementos del tablero

Para la selección del variador y los elementos del tablero se requiere información de la corriente de trabajo.

Utilizamos la tabla de selección, teniendo en cuenta la corriente nominal del motor:
4.63A

	Voltage	Icont	Pcont	IN	PN	Frame	Enclosure	Protection	Height	Width	Depth
	V	A	kW	A	kW	size	type	IP	mm	mm	mm
200V Units											
ACQ810-04-02A7-2	200	3	0.37	2.7	0.37	A	Module	IP20	364	94	219
ACQ810-04-03A5-2	200	4.8	0.55	3.5	0.55	A	Module	IP20	364	94	219
ACQ810-04-04A9-2	200	6	0.75	4.9	0.75	A	Module	IP20	364	94	219
ACQ810-04-06A3-2	200	8	1.1	6.3	1.1	A	Module	IP20	364	94	219
ACQ810-04-08A3-2	200	10.5	1.5	8.3	1.5	B	Module	IP20	380	101	297
ACQ810-04-11A0-2	200	14	2.2	11	2.2	B	Module	IP20	380	101	297
ACQ810-04-14A4-2	200	18	3	14.4	3	B	Module	IP20	380	101	297
ACQ810-04-021A-2	200	25	5.5	21	5.5	C	Module	IP20	567	166	298
ACQ810-04-028A-2	200	30	7.5	28	7.5	C	Module	IP20	567	166	298
ACQ810-04-040A-2	200	50	11	40	11	C	Module	IP20	567	166	298
ACQ810-04-053A-2	200	61	15	53	15	D	Module	IP20	567	221	298
ACQ810-04-067A-2	200	78	18.5	67	18.5	D	Module	IP20	567	221	298
ACQ810-04-080A-2	200	94	22	80	22	D	Module	IP20	567	221	298

Figura N° 50 Selección del modelo correcto [Elaboración propia].

El modelo ACQ810-04-04A9-2 que puede brindar una corriente de 4.9A podría parecer suficiente, sin embargo sólo estamos a 0.2A del límite de corriente nominal a entregar, además es necesario considerar una sobrecarga del 110%.

Entonces $4.63 \times 1.1 = 5.093A$, por lo tanto elegimos el variador de 1.1KW que soporta 6.3kW, modelo ACQ810-04-06A3-2.

Una vez seleccionado el variador, es necesario seleccionar los fusibles y el interruptor termo-magnético. Los fusibles ultra-rápidos son seleccionados mediante tablas entregadas por el fabricante.

La corriente total de los 3 variadores utilizada sería $4.63 \times 3 = 13.89$ por lo que para este variador el modelo de fusible 170M2692 de la marca aR Bussman Tamaño DIN000 con su respectivo porta-fusibles modelo XLP000.

Modelo	Fusible aR Bussmann DIN 43620				
	I A	I ² t A ² s	V _{max} V	Tamaño	Modelo
ACQ810-04-06A3-2	16	38	690	DIN000	170M2692

Figura N° 51 Selección del fusible ultrarápido [Elaboración propia].

Para la selección del interruptor principal Tmax, se necesita multiplicar la corriente total de trabajo por el factor de 1.35 por cuestiones de sobrecarga. Entonces $13.89 \times 1.35 = 18.75A$.

El Modelo de interruptor elegido es el Tmax XT1B 160TMD 20-300 3p F F que soporta una corriente de 20A.

3.6 Implementación del tablero y configuración del equipo

Se cotizó a 2 tableristas la implementación del módulo, eligiendo a la empresa INVESUX por ser la alternativa más cómoda económicamente y por tener buenos resultados en los tableros elaborados para ABB realizados anteriormente (se anexa cotización).

El plazo de entrega del tablero dependió del tiempo de programación del equipo realizado por el tesista.

La fabricación y cableado del tablero duró 8 días, posteriormente se añadió un pedestal y ruedas para su fácil transporte.



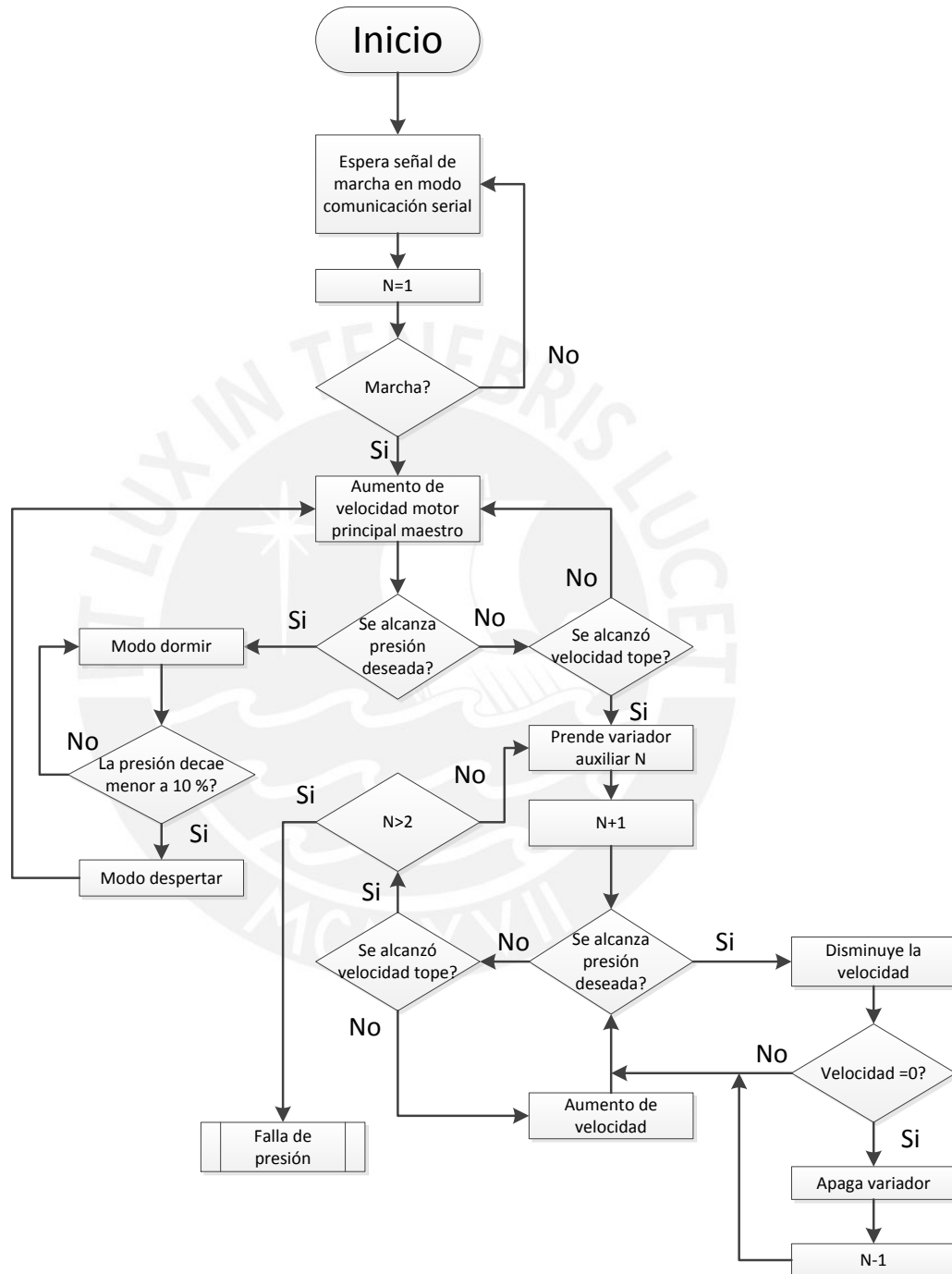
52 Supervisión de fabricación [Elaboración propia].

En las fotos se muestra parte de la implementación y cableado, aún sin rotulado. Se supervisó el cableado, verificando cada punto de conexión usando el modo de continuidad con el multímetro.

Para lograr el correcto funcionamiento del módulo, es necesario crear una nueva lista de parámetros, combinando las macros de aplicación tradicional y multibombas. Se procederá a configurar la macro tradicional de acuerdo a los datos y requerimientos del sistema para guardarlos en memoria en la posición 1, luego se configurará la macro multibombas y se guardará en memoria en la posición 2.

Finalmente se creará una función de cambio de macro por un selector externo conectado a una entrada digital del variador.

La configuración de los parámetros del variador se explica en el anexo 5, sin embargo se muestra el diagrama de flujo el cual contienen la lógica principal de funcionamiento del tablero en modo de comunicación serial:



A continuación se muestra el módulo completamente implementado



Figura N° 53 Módulo implementado [Elaboración propia].

3.7 Planteamiento de pruebas

Se realizarán pruebas de funcionamiento ante demanda de presión y simulación de fallos para comprobar la robustez del módulo y poder replicarlo a cualquier sistema de bombeo multibombas existente.

3.8.1 Pruebas ante variación de presión

En el diseño del equipo se tomó en cuenta la adhesión de un potenciómetro, el cual simulará la acción del sensor de presión. Este dispositivo está dimensionado para entregar un rango de corriente entre 4 y 20mA. Dentro del equipo se escalaron los valores de presión y corriente de tal modo que el funcionamiento del potenciómetro responda al rango de 0 a 10 bar.

Se designará el punto de referencia a 6 bar y se empezará a variar el potenciómetro colocando el nivel de presión por debajo y por encima del punto de referencia. Esto nos permitirá evaluar el funcionamiento del controlador PID interno del variador, actuando de la siguiente manera:

-Si el valor de presión actual está por debajo del punto de referencia, significaría que el sistema demanda más flujo para poder compensar la presión deseada, en ese momento el variador aumentará la velocidad del motor. En caso de que la

demanda no se cumpla con una sola bomba, el sistema ingresará cada motor auxiliar de manera secuencial; esto se cumple en los 2 modos de funcionamiento del módulo.

-Si el valor de presión actual está por encima del nivel de referencia, significaría que el sistema ya tiene presión suficiente y requiere bajar el ingreso del flujo a las tuberías. En ese momento, el variador disminuye la velocidad del motor principal, llegando incluso a detener el motor de ser necesario. Si existen bombas auxiliares en funcionamiento, el sistema las desactiva de forma secuencial, regulando en todo momento el motor principal; esto se cumple en los 2 modos de funcionamiento del módulo.

De no darse este comportamiento, se tendría que revisar la configuración del equipo y los dispositivos de accionamiento de las bombas auxiliares. En última instancia se diagnosticaría que existiera una falla en la tarjeta de control del equipo.

Se eligió el modo de funcionamiento de velocidad constante “constant speed”, para poder realizar las pruebas por comunicación serial, ya que este modo se ajusta al funcionamiento de entrada secuencial de las bombas y se puede mantener de manera independiente el control de velocidad de cada variador por separado.

3.7.2 Pruebas ante fallos simulados

El variador de velocidad presenta varias funciones de protección pre-programadas desde fábrica ante fallos externos. A continuación se presentan los fallos más comunes obtenidos en estos sistemas:

- Fallo de pérdida de fase del motor: Indica que una de las fases de salida hacia el motor se encuentra desconectada o haciendo falso contacto.
- Fallo de sobrecorriente: indica una entrega elevada de corriente hacia el motor, diagnosticando un posible bloqueo del rotor del motor (en específico un daño en las paletas de la bomba).
- Fallo de sobretensión: indica que la tensión enviada hacia el motor es elevada, diagnosticando una posible sobretensión en la entrada de alimentación del variador.

-Fallo de fallo de subtensión del bus DC: indica que es posible tener un desbalance de fases en la entrada de alimentación o pérdida de una de ellas, además podríamos tener un problema de subtensión en la red de alimentación

Sin embargo estos fallos son netamente vinculados a la red de alimentación o un mal funcionamiento de la bomba debido a la aplicación, por lo que no se cuentan con las herramientas para variar la alimentación principal; sin embargo, estas funciones vienen probadas desde fábrica con certificado de pruebas in situ.

Se planteará simular un fallo ante la pérdida del maestro en la etapa de comunicación serial, para observar el comportamiento del sistema. Dentro de la configuración del equipo tendremos la opción de usar un maestro estático o dinámico, dependiendo de la selección, se obtendrán las siguientes reacciones:

- 1) Maestro estático: El variador maestro sólo puede ser el variador con la bomba principal
- 2) Maestro dinámico: El variador maestro puede ser cualquiera de los tres motores del módulo.

CAPÍTULO 4:

PRUEBAS, SIMULACIONES, CORRECCIONES Y RESULTADOS

4.1. Resultados de pruebas planteadas

4.1.1 Variación de presión

Usando los parámetros PID definidos anteriormente, se obtuvo una reacción favorable ante las variaciones del potenciómetro.

Se describirá detalladamente el procedimiento de prueba en cada modo de funcionamiento:

a) Control con motor principal regulado y auxiliares arrancados en directo:

1.- Se energizó el equipo con las señales de marcha deshabilitadas y colocando el selector principal en el modo respectivo y todos los selectores secundarios de las bombas en modo automático.

2.- Se fijó con el potenciómetro a un valor de 0 bar, el cual indica que las tuberías no se encuentren presurizadas.

3.- Se dio señal de marcha al módulo, teniendo un ingreso suave de flujo con el variador conectado al motor principal.

4.- Se subió progresivamente el valor del potenciómetro (sin llegar al punto de referencia), simulando un aumento de presión en el sistema debido a la bomba principal activada.

5.- Debido a que no se llega al punto de referencia, el módulo puso en funcionamiento la primera bomba auxiliar en arranque directo, en ese momento el variador realiza una disminución súbita de velocidad en el motor principal para compensar el golpe de presión ingresado por el arranque directo.

6.-Manteniendo el potenciómetro debajo del punto de referencia, el módulo arranca en directo la segunda bomba auxiliar y el variador principal reacciona de la misma manera que el punto anterior.

7.-Movemos el valor del potenciómetro por encima del punto de referencia, en ese momento el motor principal empieza a disminuir su velocidad por acción del variador.

8.- Debido a que continuamos por encima del punto de referencia, el sistema deshabilita una bomba auxiliar, en ese momento el variador realiza un aumento súbito de velocidad para compensar la presión disminuida por la salida del motor.

9.-Manteniendo el potenciómetro por encima del punto de referencia, el sistema reacciona de manera similar al punto anterior.

10.- Seguimos por encima del punto de referencia y el variador comienza a disminuir la velocidad del motor principal, hasta llegar por debajo del punto límite de baja velocidad designada en la configuración durante el tiempo determinado, en ese momento la función dormir se activa y pone a hibernar el variador llevando al motor a velocidad cero.

11.- Empezamos a disminuir el valor del potenciómetro pasando por debajo del nivel de referencia hasta llegar por debajo del punto límite de descompensación de presión, en ese momento el variador vuelve a accionar el motor principal, comenzando todo el ciclo de nuevo.

b) Control con motor principal y auxiliares regulados por variadores de velocidad conectados por comunicación serial:

1.- Se energizó el equipo con las señales de marcha deshabilitadas y colocando el selector principal en el modo respectivo, ese momento todos los selectores secundarios se deshabilitan y se acciona el by-pass del circuito de fuerza para conectar cada variador con su respectivo motor.

2.- Se fijó con el potenciómetro a un valor de 0 bar, el cual indica que las tuberías no se encuentren presurizadas.

3.- Se dio señal de marcha al módulo, teniendo un ingreso suave de flujo con el variador conectado al motor principal.

4.- Se subió progresivamente el valor del potenciómetro (sin llegar al punto de referencia), simulando un aumento de presión en el sistema debido a la bomba principal activada.

5.- Debido a que no se llega al punto de referencia, el módulo puso en funcionamiento la primera bomba auxiliar regulada por variador, dejando la primera bomba en una velocidad constante definida, permitiendo que la primera bomba auxiliar regule el flujo en esta etapa.

6.- Estando aún por debajo el punto de referencia, el módulo da la señal de marcha al segundo motor auxiliar, dejando al motor anterior en una velocidad constante definida, permitiendo que este segundo motor regule el flujo en esta etapa.

- 7.- Subimos el valor del potenciómetro por encima del punto de referencia, en ese instante, la segunda bomba auxiliar, empieza a disminuir su velocidad. Estando por debajo de la velocidad mínima permitida para el motor, durante el tiempo definido, el variador empieza a ejecutar la función dormir, deshabilitando este motor del sistema.
- 8.- Debido a que continuamos por encima del valor de referencia, el segundo motor con su respectivo variador reacciona de la misma forma que el punto anterior.
- 9.- Sin mover el valor del potenciómetro, el motor principal reacciona de la misma manera.
- 11.- Empezamos a disminuir el valor del potenciómetro pasando por debajo del nivel de referencia hasta llegar por debajo del punto límite de descompensación de presión, en ese momento el variador vuelve a accionar el motor principal, comenzando todo el ciclo de nuevo.

4.1.2 Fallos simulados

Maestro estático:

Para la falla de pérdida maestro, se designó por programación, que todas las bombas auxiliares se fijen a una velocidad constante, para no tener que parar todo el proceso.

Se detallan a continuación los pasos seguidos en la prueba:

- 1.- Se energiza el módulo y se selecciona el modo multibombas por comunicación serial.
- 2.- Se procede a realizar los pasos para encender todas las bombas a la vez, manteniendo el potenciómetro por debajo del punto de referencia, tal como se indicó en la sección b) del punto 4.2.1.
- 3.- Se procede a desenergizar el variador principal maestro, simulando su pérdida por circunstancias externas.
- 4.- Los motores auxiliares en funcionamiento reaccionan ante este evento e inmediatamente se fijan a la velocidad constante predefinida, para así evitar el paro del funcionamiento del proceso.
- 5.- Volvemos a energizar el variador maestro, en ese instante toma control del proceso y realiza la lógica de control de acuerdo a la posición del potenciómetro.

Maestro dinámico:

Para la falla de pérdida maestro, se designó por programación, que el último variador que se energizó sea el nuevo maestro.

Se detallan a continuación los pasos seguidos en la prueba:

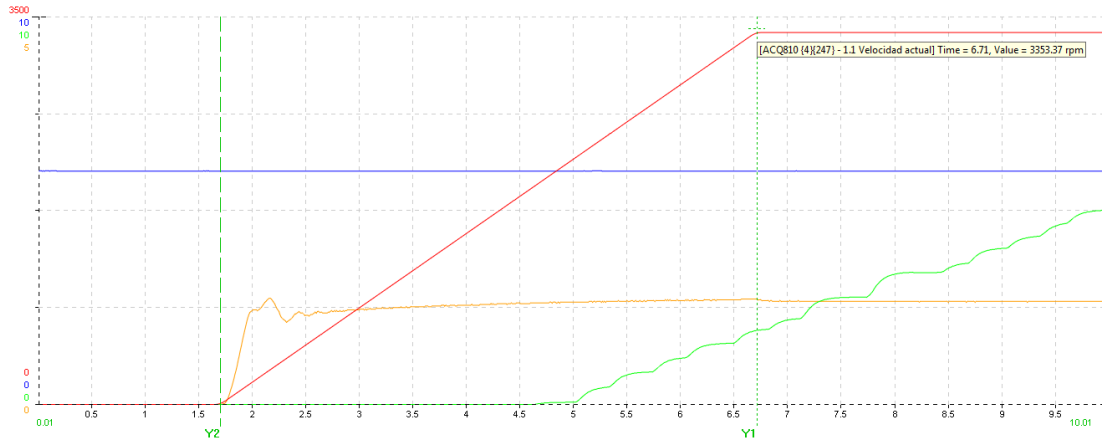
- 1.- Se energiza el módulo y se selecciona el modo multibombas por comunicación serial.
- 2.- Se procede a realizar los pasos para encender todas las bombas a la vez, manteniendo el potenciómetro por debajo del punto de referencia, tal como se indicó en la sección b) del punto 4.2.1.
- 3.- Se procede a desenergizar el variador principal maestro, simulando su pérdida por circunstancias externas.
- 4.- Los motores auxiliares en funcionamiento reaccionan ante este evento e inmediatamente el último variador accionado toma el control del proceso como maestro.
- 5.- Se mueve el valor del potenciómetro por encima del punto de referencia, en ese momento el nuevo variador maestro ordena al variador conectado al motor auxiliar a disminuir su velocidad.
- 6.- Se mueve el valor del potenciómetro por de debajo del punto de referencia, en ese momento el variador auxiliar aumenta la velocidad de su motor.
- 7.- Se reconecta el primer variador deshabilitado, en ese momento se convierte en el segundo variador auxiliar y obedece los comandos del nuevo variador maestro, realizando la lógica de control de manera correcta.

4.2. Registro de gráficas

Se utilizó el software DriveStudio para poder extraer las gráficas del PID interno del módulo.

Se designan los valores a monitorear, los cuales serán: velocidad actual, Punto de referencia (Set point), el valor actual de presión y la corriente entregada al motor.

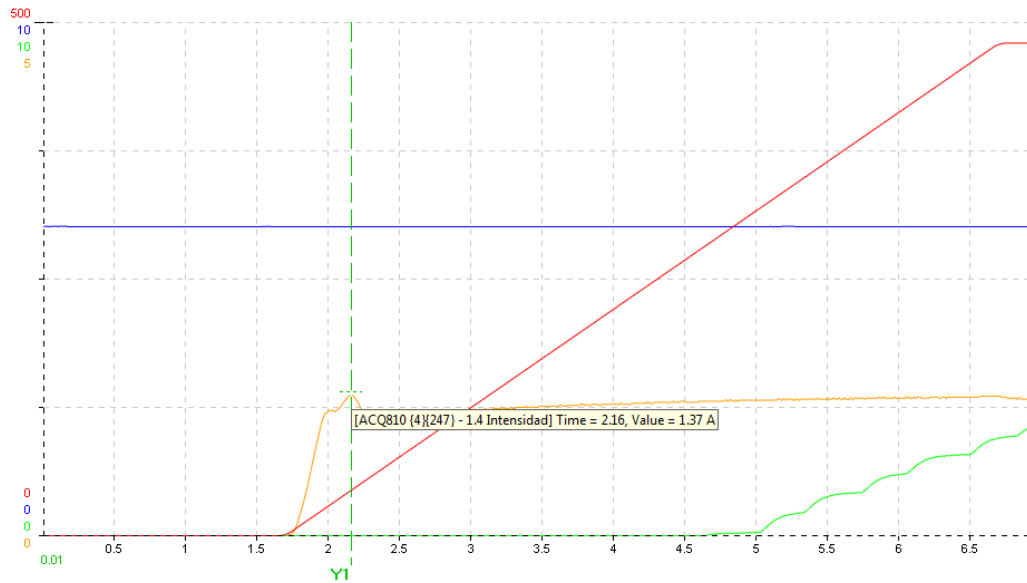
Para comprobar el buen funcionamiento del controlador PID, se registraron las siguientes gráficas:



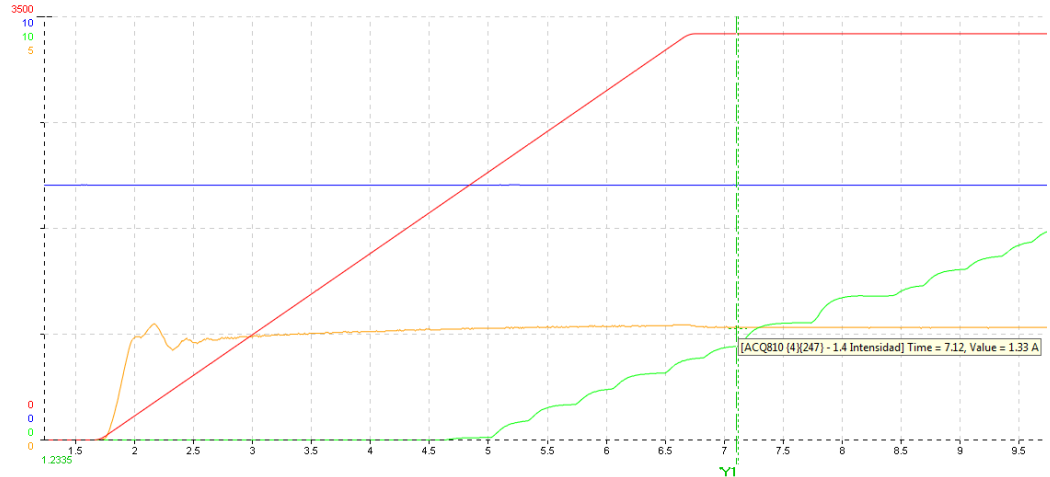
Gráfica N° 1 Arranque de motor principal [elaboración propia]

Draw	Scale	Signal
<input checked="" type="checkbox"/>		1: ACQ810 {4}{247} - 1.1 Velocidad actual
<input checked="" type="checkbox"/>		2: ACQ810 {4}{247} - 4.2 Setpoint
<input checked="" type="checkbox"/>		3: ACQ810 {4}{247} - 4.1 Señal actual
<input checked="" type="checkbox"/>		4: ACQ810 {4}{247} - 1.4 Intensidad

Figura N° 54 Señales a monitorear seleccionadas [Elaboración propia]

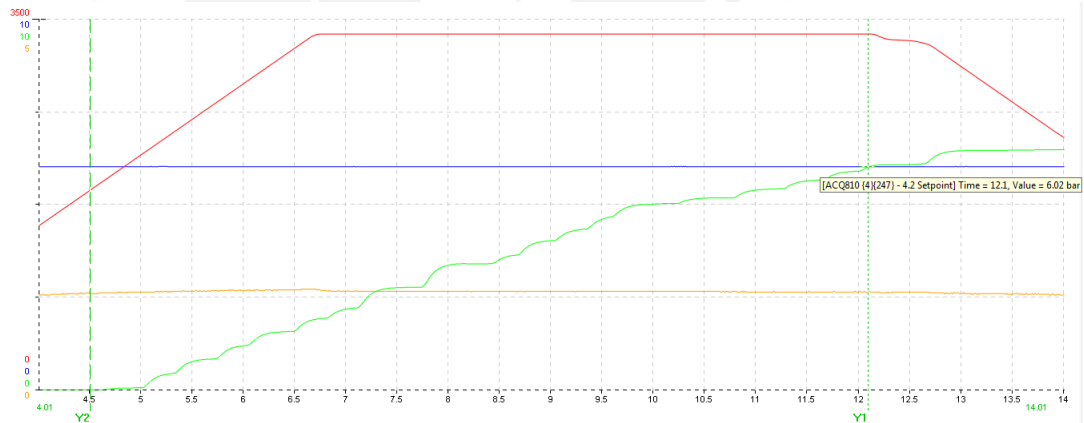


Gráfica N° 2 Corriente pico en el arranque [elaboración propia]



Gráfica N° 3 Corriente de trabajo establecida [elaboración propia]

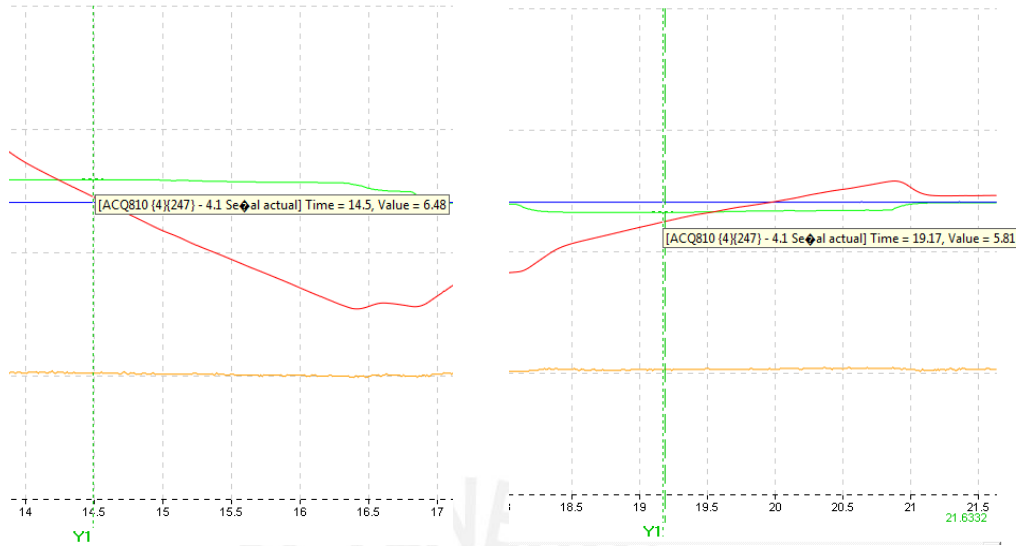
En el arranque, observamos que por la acción del PID, el motor llega a su velocidad máxima en 6.7 segundos y el valor de la señal actual de presión comienza a elevarse. Cabe resaltar que tenemos una corriente de arranque 1.37A y se establece en 1.33A lo cual nos da un incremento del 3% en la corriente de arranque.



Gráfica N° 4 Reacción del PID por debajo del punto de referencia [elaboración propia]

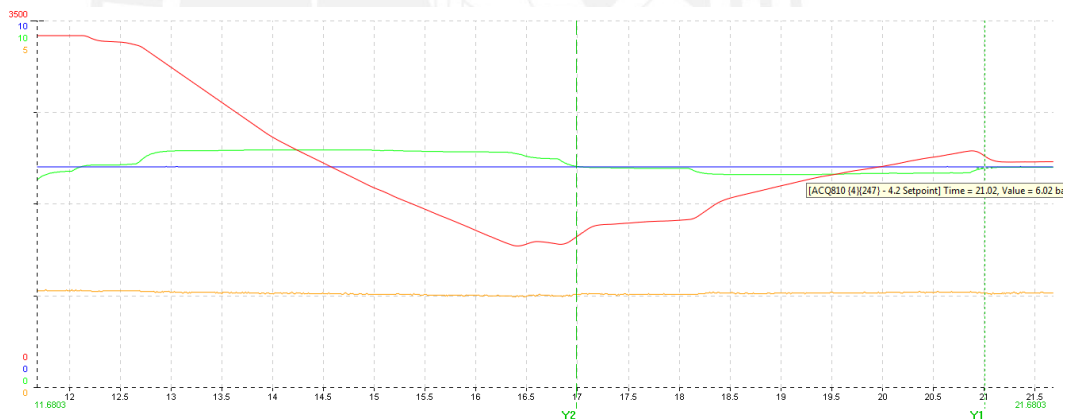
El tiempo que toma el valor actual para llegar al setpoint es de $12.1 - 4.5 = 7.6$ segundos, en ese momento el variador de velocidad reacciona y disminuye la velocidad del motor.

El valor máximo de presión es de 6.48 bar en comparación con el punto de referencia de 6 bar lo cual nos da un incremento de presión del 8% dentro de la tubería. El decremento llega a 5.81 bar representando aproximadamente el 4% respecto al punto de referencia.



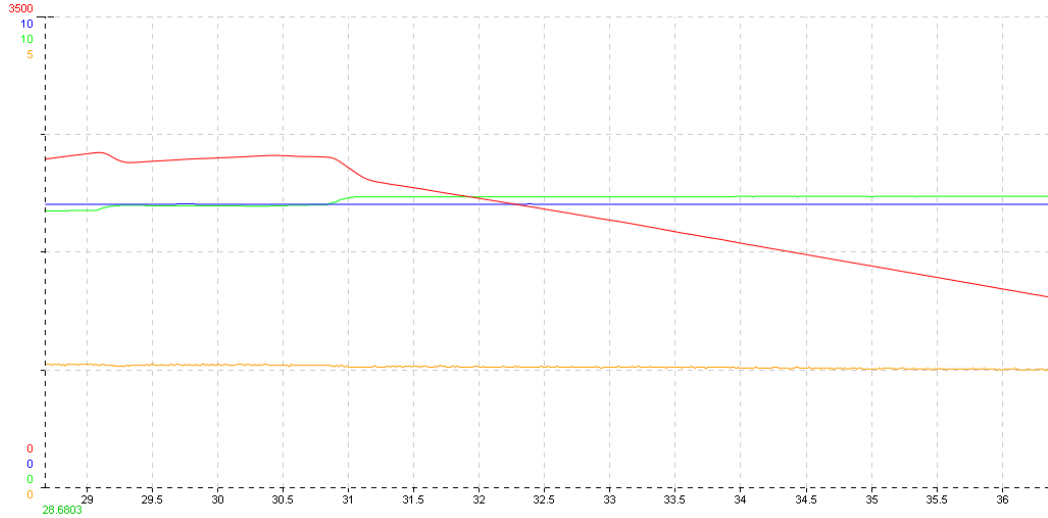
Gráfica N° 5 Reacción del PID por encima del punto de referencia [elaboración propia]

En la siguiente etapa, ya que se ha superado la referencia, el variador disminuye la velocidad del motor y trata de llevar el valor actual hacia el setpoint, esta acción dura $21.02 - 17 = 4.02$ segundos.



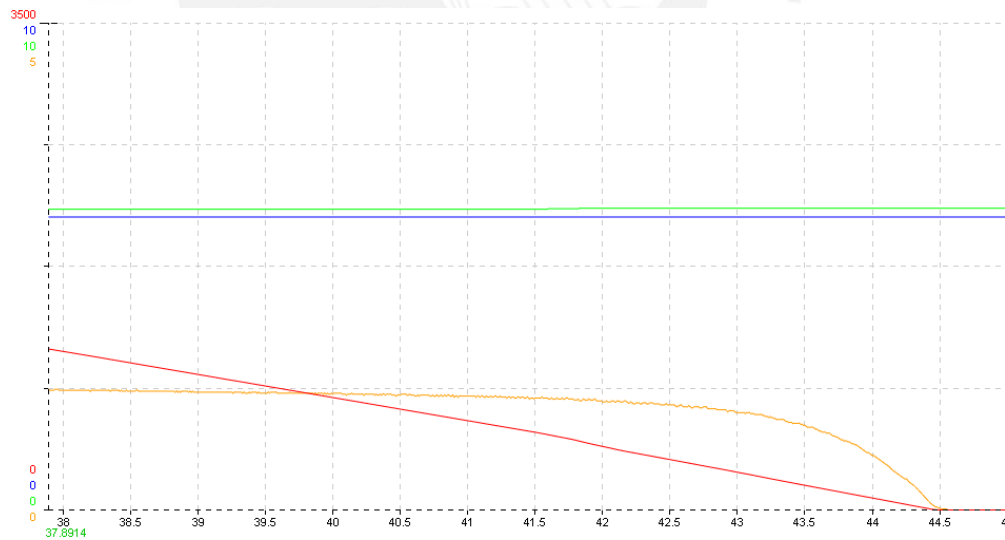
Gráfica N° 6 Reacción del PID por encima y debajo del punto de referencia [elaboración propia]

Como el valor de presión actual sigue por encima del punto de referencia de manera estable, el variador disminuye la velocidad del motor. Esto nos indica que la presión en la tubería es suficiente y que no hay necesidad de bombear más flujo.



Gráfica N° 7 Reacción del PID por encima del punto de referencia [elaboración propia]

Como ya no se necesita la acción del motor, el variador de velocidad activa la función dormir, la cual deshabilita el motor por completo. Se puede visualizar que la corriente disminuye de manera suave y la parada del motor realiza una rampa de velocidad en el tiempo.



Gráfica N° 8 Ejecución de la función dormir [elaboración propia]

De acuerdo a ellas, se puede comprobar que mientras el valor actual de presión esté por debajo del punto de referencia, la velocidad de los motores controlados por variadores empieza a aumentar.

De la misma manera, al momento de aumentar el valor actuar de presión por encima del valor de referencia, la velocidad de los motores controlados por variadores empieza a disminuir.

4.3 Análisis de Resultados

- Los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento fueron exitosos ya que la bomba principal inyectaba flujo al sistema cuando estuvimos por debajo del punto de referencia y viceversa teniendo una desviación de +8%/-4%,
- Se observa según las gráficas y los parámetros PID que se tiene una respuesta dinámica de 7.6 segundos.

De acuerdo a este dato y a los criterios anteriores, debemos corroborar que no existe golpe de presión alguno en la tubería, por lo que en primera instancia debemos calcular la celeridad:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K \cdot \frac{D}{e}}}$$

Para una tubería de 3 pulgadas, el diámetro interior es el resultado del diámetro exterior menos el espesor: $D = 88.9 - 3.25 = 85.65 \text{ mm}$

$e = 3.25 \text{ mm}$ y siendo el coeficiente de elasticidad del hierro (ϵ) igual a $2 \times 10^{10} \text{ Kg/m}^2$

El valor de K es 0.5

Por lo tanto la celeridad **$a = 1240.654108 \text{ m/s}$**

Ahora calcularemos el tiempo de cierre de este sistema:

$$T = C + \frac{K \cdot L \cdot v}{g \cdot H_m}$$

Siendo la longitud de conducción 170m menor a 500m entonces $K = 2$.

Utilizando un calculador online de altura manométrica total, ingresamos los datos de succión e impulsión, sin considerar las pérdidas:

CALCULO DE PERDIDAS Y ALTURA MANOMETRICA

Caudal: l/h. Borrar datos

Aspiración **Impulsión**

Altura geometrica: m. Longitud tubería: m.

Diametro interior tubería: mm. Tipo tubería:

Codos 90°: Curvas 90°:

Valvulas retención: Valvulas compuerta: Valv. de pie:

Velocidad calculada: **0.55** m/s. La velocidad máxima aconsejada es de 1.75 m/s.

CALCULO DE PERDIDAS Y ALTURA MANOMETRICA

Caudal: l/h. Borrar datos

Aspiración **Impulsión**

Altura geometrica: m. Longitud tubería: m.

Diametro interior tubería: mm. Tipo tubería:

Codos 90°: Curvas 90°:

Valvulas retención: Valvulas compuerta:

Velocidad calculada: **0.55** m/s. La velocidad máxima aconsejada es de 2.25 m/s.

Resultados

Perdidas aspiracion:	0.09 m.c.a.	Altura manometrica aspiración:	5.09 m.c.a.
Perdidas impulsión:	0.74 m.c.a.	Altura manometrica impulsión:	45.74 m.c.a.
Perdidas totales:	0.83 m.c.a.	Presión de salida:	<input type="text" value="61.2"/> m.c.a.
		Altura manometrica total:	112.03 m.c.a.

Figura.55 Calculador de altura manométrica [Fuente: http://www.suelco.com/tablas_calculo/alturas_manometricas.swf]

El valor de H_m es 112.03 m.c.a. (metros de columna de agua)

Hallamos el valor de $\frac{H_m}{L} = 0.659$ por lo tanto $\frac{H_m}{L} \geq 0.4$ entonces $C=0$

Utilizamos la velocidad de propagación aconsejada del agua en la parte de impulsión de 2.25m/s.

Por lo tanto tenemos un tiempo de cierre de $T = 0 + \frac{2 \times 170 \times 2.25}{9.81 \times 112.03} = 0.6961 \text{ seg}$

Ahora veremos que $\frac{2L}{a} = \frac{2 \times 170}{1240.654108} = 0.274$ seg

Comparando tenemos que $T > \frac{2L}{a}$, entonces nos encontramos en un cierre lento.

En la práctica tenemos un tiempo de 7,6 segundos, con ello podemos comprobar que este tiempo nos permite trabajar sin golpe de ariete.

- Ahora compararemos el valor de sobre-presión que debería existir debido a un golpe de ariete en el tiempo de cierre lento que tenemos 7.6 seg, con nuestro valor de variación de presión obtenido en la gráfica:

$$L = 170 \text{ m} \quad v = 2.25 \text{ m/s} \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot T}$$

$$\Delta H = \frac{2 \times 170 \times 2.25}{9.81 \times 7.6} = 10.2607 \text{ m. c. a. que es aprox 1 bar}$$

Nuestro valor de de variación máxima de presión es 6,48bar – 5.81 bar= 0.67 bar
Nuestro valor es menor al de los cálculos, lo cual demuestra que estamos por debajo del nivel de variación de presión para producirse un golpe de ariete y dañar la tubería.

- Se observa que la corriente de arranque es cercana a la nominal, teniendo sólo un incremento del 3% que se demuestra que no realiza picos elevados en comparación de un arranque directo.
- Se observa que la velocidad es controlada íntegramente y que utilizamos parte de la potencia nominal del motor.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados y los análisis tenemos las siguientes conclusiones:

1. El variador de velocidad ABB modelo ACQ810 facilitó la implementación mecánica debido a su posibilidad de montaje de lado a lado, ahorrando espacio en el tablero, adicionalmente demostró tener una interface intuitiva ya que fue exhibido en 3 ferias locales, permitiendo a los técnicos, ingenieros e instaladores interactuar con él, recopilando sus impresiones positivas.
2. Se verificó que con las macros de aplicación del equipo se facilitó el diseño, ya que ofrece una guía y punto de partida para el desarrollo de la aplicación multibombas, pudiendo replicarse para un proceso de 3 bombas con 3 variadores y poder lograr crear una macro nueva de usuario, el cual combina 2 tipos de control en un solo módulo; volviendo al variador un equipo flexible.
3. Se concluye que el variador facilita la creación de un nuevo perfil de programación que combina dos macros de aplicación modificadas, debido a la opción de guardar los datos en memoria como una “Macro de Usuario”.
4. El valor de respuesta dinámica del PID obtenida en segundos, está por encima de la mínima permitida y así el sistema no experimenta golpe de ariete, así como el nivel de variación de presión, el cual se encuentra por debajo del máximo soportado por la tubería con un tiempo de 7.6 segundos. Respecto a los arranques directos de las bombas y motores auxiliares, la tubería no experimentaría el golpe de presión al arranque de los motores, debido a la reacción de bajar la velocidad súbitamente del variador principal. Además la corriente de arranque con los variadores de velocidad no sobrepasó el 103% de la corriente nominal. Esto se traduce en mayor vida útil de los motores y del sistema de tuberías.
5. Se concluye que el sistema por comunicación serial aumenta la confiabilidad en el sistema ya que permitió una redundancia en el control, por la presencia de maestros múltiples, además mediante la comunicación serial, fue posible compartir información de las variables de presión tanto de realimentación como el punto de referencia, evitando así realizar cableado adicional para cada interface de E/S de cada variador.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda siempre verificar el estado de la red de alimentación antes de energizar el módulo, con el fin de evitar los fallos de subtensión, sobrecorriente; así como revisar los cables de variador a motor evitando el fallo de pérdida de fase del motor.
2. Es importante contar con una buena puesta a tierra, con un valor de resistencia menor a 5 ohmios por norma peruana para equipos electrónicos.
3. No se debe realizar mantenimiento y/o manipulación en los motores ni bombas mientras el variador se encuentre energizado.
4. Una vez implementada la aplicación, es necesario realizar un ajuste de los parámetros del motor y del PID ya que dependen directamente del comportamiento del sistema en lazo cerrado.
5. El módulo implementado, además de demostrar el sistema multibombas, sirve para el entrenamiento del personal técnico y estudiantes académicos en el uso y programación de variadores de velocidad ABB.
6. La tecnología implementada en el módulo permitirá replicarse en aplicaciones reales desde potencias de 0.5HP hasta potencias de 700HP (rango de potencia más alta del modelo), en distintos valores de tensión de alimentación, dado que la programación es similar en todos los equipos de ese rango de potencias.
7. El módulo fue implementado para ejecutar 2 tipos de control multibombas de acuerdo a las necesidades del usuario, así que sólo es necesario implementar esta solución en el tipo de control requerido.
8. El módulo tiene la posibilidad de conectarse hacia un sistema de monitoreo de señales SCADA, por medio de buses de comunicación industriales estándar. Para ello es necesario conectar un módulo de comunicación externo según el protocolo utilizado.

BIBLIOGRAFÍA

[1] ABB S.A. Cortina, R. (2012). *Drive set N05 eficiencia energética*. [Diapositivas en Power Point].

[2] Ministerio de Energía y Minas, agroindustria (2012). *Guía 16 Eficiencia energética en la Agroindustria*. Lima - Perú. Disponible en:

<<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Guia16%20Agroindustrias.pdf>>

[3] Ministerio de Energía y Minas, agroindustria (2012). *Guía 16 Eficiencia energética en edificios públicos*. Lima - Perú. Disponible en:

<[http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Guia14%20Edificios%20P%C3%83%C2%BAblicos\(1\).pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Guia14%20Edificios%20P%C3%83%C2%BAblicos(1).pdf)>

[4] Ministerio de Energía y Minas, agroindustria (2012). *Guía 16 Eficiencia energética en el sector comercial*. Lima - Perú. Disponible en:

<[http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Guia02%20Comercial\(1\).pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Guia02%20Comercial(1).pdf)>

[5] MOTT, Robert. *Mecánica de Fluidos*. Cuarta Edición, Mc Graw Hill, Año de publicación 1996.

[6] WEG (2008) *Guía de Aplicación Sistema Multibombas Control Fijo*. Fecha de consulta: Marzo 2014. [en línea] disponible en:

<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/7-17044.pdf>>

[7] Abridó, Juan Carlos (2003). *Sistema de control de bombas: Controlador en cascada*. Fecha de consulta: Marzo 2014. [en línea] disponible en:

<<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=106&edi=37>>

[8] Amaro, José A. (2012). *Sistema microcontrolado para funcionamiento alternado e automático de motobombas de recalque*. UniCEUB. Brasilia- Brasil. Fecha de consulta: Abril 2014. [en línea] disponible en:

<<http://www.repositorio.uniceub.br/bitstream/123456789/3175/3/20137281.pdf>>

- [9] Sensores de presión. Fecha de consulta: Abril 2014 [En línea]. Disponible en:
<<http://cristian-sensoresindustriales.blogspot.com/2009/04/sensores-de-presion.html>>
- [10] Universidad autónoma de Occidente. *Ahorro de energía en sistemas de bombas centrífugas*. UPME. Colombia. Fecha de consulta: Abril 2014. [En línea] Disponible en:
<http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/bombas.pdf>
- [11] TLV. *Qué es el golpe de ariete/ariete hidráulico*. [En línea] Disponible en:
<<http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/what-is-waterhammer.html>>
- [12] ABB S.A . Bonifaz, V. (2012) Teoría de variadores de velocidad ABB. [Diapositivas en Power Point].
- [13] Santerno. Sinus Penta 2T/4T. [En línea] Disponible en:
<<http://www.santerno.com/products/industrial-automation/inverters/sinus-penta-2t4t.html>>
- [14] SINUS PENTA (2006). *Manual de Uso - Guía de instalación*. [En línea] Disponible en:
<http://www.santerno.com/fileadmin/user_upload/pdf/manuals/MANUALI%20INDUSTRIAL%20AUTOMATION/SINUS_PENTA_HW/15P0102X1/15P0102F1_SINUS_PENTA_HW_R03_SPA_WEB.pdf>
- [15] SINUS PENTA (2009) *Manual de uso Basic*. [En línea] Disponible en:
<http://www.santerno.com/fileadmin/user_upload/pdf/manuals/MANUALI%20INDUSTRIAL%20AUTOMATION/SINUS_PENTA_BASIC/15V0102X1/ES/R03/15V0102F1_SINUS_PENTA_BASIC_R03_ES.pdf>
- [16] Electrónica Santerno. Sinus Penta *Variable Speed Drives Multipump Applications*. [En línea] Disponible en:
<http://www.nhp.com.au/files/editor_upload/File/Product-Tools/Santerno/ES-MULTIPUMP%2007-128.pdf>

- [17] SINUS PENTA (2011) *Multipump Application*. [En línea] Disponible en:
<http://www.santerno.com/fileadmin/user_upload/pdf/manuals/MANUALI%20INDUSTRIAL%20AUTOMATION/SINUS_PENTA_APPLICATIONS/15Q0102X10_MULTIPUMP/UK/15Q0102B10_SINUS_PENTA_MULTIPUMP_R06_EN.pdf>
- [18] DANFOSS (2010) *Manual de programación DANFOSS VLT AQUA DRIVE*. [En línea] Disponible en:
http://mcliterature.danfoss.com/WebPublish/doc_MG200702.pdf
- [19] DANFOSS (2002). *VLT® Multi-function Cascade Controller*. [En línea] Disponible en:
<http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/C6FD0D70-D915-4B49-A966-23FE1CCB43C8/0/cascade_control_VLT_ENG.pdf>
- [20] DANFOSS (2010) *Master/Slave Application Guide*. [En línea] Disponible en:
<http://mcliterature.danfoss.com/WebPublish/doc_MN20B302.pdf>
- [21] ABB S.A. (2009) *ACQ810, módulos de convertidor para aplicaciones en aguas limpias y aguas residuales*. [En línea] Disponible en:
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/a572a4ae2cc86f8ac1257c6e005094de/\\$file/ACQ810_Drives_For_Water_Wastewater.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/a572a4ae2cc86f8ac1257c6e005094de/$file/ACQ810_Drives_For_Water_Wastewater.pdf)>
- [22] ABB S.A. (2013). *Manual de Firmware Programa estándar de control de bombas para convertidores ACQ810*. [En línea] Disponible en:
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/659380c8311c5b3dc1257b6c0037edc0/\\$file/ES_ACQ810_Std_Pump_Ctrl_Prg_FW_C_A5.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/659380c8311c5b3dc1257b6c0037edc0/$file/ES_ACQ810_Std_Pump_Ctrl_Prg_FW_C_A5.pdf)>
- [23] ABB S.A. Quispe, E. (2013) *ACQ810-04 Principales características*. [Diapositivas en Power Point].
- [24] Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. *Cátedra en Ing. Rural*. [En línea] Disponible en:
https://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema10.PDF

ANEXOS

Anexo 1: Cotización del módulo implementado

Anexo 2: Plano Eléctrico del módulo

Anexo 3: Manual de Firmware del ACQ810

Anexo 4: Parámetros del variador

Anexo 5: Programación detallada del módulo

Anexo 6: Video de control por comunicación serial

