

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE
PRESIÓN CONSTANTE PARA LA PASTEURIZADORA QUITO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL

LENIN GONZALO FALCONÍ ESTRADA

enteatenea@gmail.com

DIRECTORA: ING. ANA VERÓNICA RODAS BENALCÁZAR

ana.rodas@epn.edu.ec

Quito, Marzo 2013

DECLARACIÓN

Yo, Lenin Gonzalo Falconí Estrada, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mí autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Lenin Gonzalo Falconí Estrada

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Lenin Gonzalo Falconí Estrada, bajo mi supervisión.

Ing. Ana Rodas

DIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Mercedes y Gonzalo, quienes siempre han sido una guía. A Silvana por toda su paciencia. A los Maestros y al Universo por brindarme la oportunidad de observarlo.

“El estudio del universo es un viaje para auto descubrirnos” Carl Sagan

DEDICATORIA

Para Papá, Mamá, Silvana y Nadia.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	ii
CERTIFICACIÓN	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA.....	v
CONTENIDO.....	vi
RESUMEN	ix
PRESENTACIÓN	x
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Términos hidráulicos	2
1.2.1 CAUDAL:	2
1.2.2 PRESIÓN:	4
1.2.3 ALTURA (PUMPING HEAD).....	6
1.2.4 CAVITACIÓN.....	8
1.2.5 NPSH (ALTURA DE ASPIRACION POSITIVA NETA)	9
1.3 Sistemas de bombeo.....	12
1.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO	13
1.3.2 CURVAS DEL SISTEMA	13
1.3.3 ESTRUCTURA DE LAS BOMBAS	14
1.3.4 PUNTO DE OPERACIÓN DE LA BOMBA	21
1.4 Métodos de ajuste del rendimiento de las bombas	23
1.4.1 CONTROL POR ESTRANGULAMIENTO	23

1.4.2	CAMBIO DE DIÁMETRO DEL IMPULSOR	24
1.4.3	CONTROL DE VELOCIDAD (VFD)	25
1.4.4	EFICIENCIA ENERGÉTICA	30
1.4.5	VENTAJAS DEL CONTROL DE VELOCIDAD POR VFD	32
1.5	Configuraciones de bombeo:	32
1.5.1	CONFIGURACION SERIE:.....	32
1.5.2	CONFIGURACION EN PARALELO:	34
1.6	Control de presión constante	37
1.7	Proyecto sistema de control de presión constante para la pasteurizadora quito	38
CAPÍTULO 2 IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE		39
2.1	Requerimientos operativos del sistema.....	39
2.2	ARQUITECTURA DE LA SOLUCIÓN	40
2.2.1	ANALISIS DE LA INSTALACION MECÁNICA	41
2.3	Características y selección de equipos	42
2.3.1	BOMBAS CENTRÍFUGAS:.....	42
2.3.2	VARIADORES DE FRECUENCIA:	47
2.3.3	SISTEMA DE CONTROL	72
2.3.4	TRANSMISOR DE PRESIÓN.....	78
2.3.5	EQUIPOS ADICIONALES	81
2.3.6	TABLERO ELÉCTRICO DE CONTROL	83
2.3.7	ESQUEMA DE CONEXIONES DEL TABLERO DE CONTROL ...	85
CAPÍTULO 3 .DESARROLLO DEL SOFTWARE DE CONTROL		93
3.1	Programación de los variadores Micromaster 440	94
3.1.1	ESTRUCTURA DE PROGRAMACIÓN	96
3.1.2	SOFTWARE DE INGENIERÍA STARTER	102
3.1.3	PROGRAMA DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.....	109

3.2	Programacion del PLC	123
3.2.1	LOGOSOFT	124
3.2.2	CONFIGURACIÓN DEL PLC	128
3.2.3	PROGRAMA Y DIAGRAMA DE FLUJO	131
3.2.4	CONFIGURACIÓN PANEL DE TEXTO.....	134
CAPÍTULO 4	Pruebas y resultados	141
4.1	Pruebas Generales eléctricas	141
4.2	Pruebas lógicas o de programa	145
4.3	Respuesta dinámica.....	148
CAPÍTULO 5	Conclusiones y Recomendaciones	152
5.1	Conclusiones.....	152
5.2	Recomendaciones.....	155
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.....	157
ANEXOS	.....	159
ANEXO A	.....	160
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS BOMBAS.....		160
ANEXO B	.....	169
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL plc ILOGO.....		169
ANEXO C	.....	176
CARACTERÍSTICAS DE LOS VARIADORES		176
ANEXO D	.....	181
CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN.....		181

RESUMEN

La Pasteurizadora Quito requiere incrementar su capacidad de producción, para lo cual instalará una máquina nueva de ultra pasteurización (UHT), junto con una máquina homogenizadora de Leche. Para el funcionamiento adecuado de dichas máquinas es indispensable disponer constantemente de agua.

Para cumplir con dicho objetivo se diseña un tablero de control de presión constante integrado por dos variadores Siemens Micromaster 440 y un PLC Logo. Los variadores realizan la regulación de la velocidad de las bombas para mantener la presión de abastecimiento constante. Ésta variable es medida a través de un transmisor de presión instalado, en el punto de salida del líquido.

El PLC está encargado de coordinar el funcionamiento de los variadores de tal manera que exista una bomba líder y otra auxiliar. En los momentos de gran demanda de líquido, la bomba auxiliar debe integrarse inmediatamente al sistema para mantener la presión constante. Adicionalmente el PLC recibe señales que vigilan el funcionamiento adecuado de las bombas.

PRESENTACIÓN

El proyecto de titulación “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN CONSTANTE PARA LA PASTEURIZADORA QUITO” tiene por objeto diseñar un tablero de control de variadores de frecuencia que permita mantener la presión de agua constante para el consumo de las máquinas Homogenizadora y de Ultra Pasteurización instaladas en la planta.

Se describe a continuación los capítulos que forman parte del proyecto:

CAPÍTULO 1: Fundamentos Teóricos. Se describen los principales conceptos hidráulicos que dominan la dinámica de las bombas centrífugas, con el objetivo principal de orientar la programación del sistema a una operación adecuada de las bombas instaladas.

CAPÍTULO 2: Implementación del Hardware. Se describe la arquitectura de la solución implementada así como las principales características técnicas de los diferentes componentes de hardware instalados.

CAPÍTULO 3: Desarrollo del software. Consta de la descripción del programa escrito para los variadores y para el PLC, así como la configuración de dichos equipos.

CAPÍTULO 4: Pruebas y resultados. Se exponen las diferentes pruebas a las que fue sometido el sistema de control para garantizar el correcto funcionamiento de acuerdo con el objetivo planteado para el proyecto.

CAPÍTULO 5: Conclusiones y recomendaciones. En función a la experiencia desarrollada en las distintas etapas del desarrollo del proyecto, se plantean las principales conclusiones y recomendaciones respecto al sistema implementado y sus componentes.

Finalmente está la referencia bibliográfica utilizada así como los Anexos en los que se dispone de información complementaria al proyecto.

CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Las nuevas tecnologías desarrolladas en el área de variadores de frecuencia (VFD) con la utilización de semiconductores IGBT han permitido modificar las soluciones tradicionales en la regulación de caudal y presión en los sistemas de bombeo, reduciendo los costos de operación, mantenimiento y permitiendo en muchos casos incrementar el rendimiento del sistema, su disponibilidad y ciclo de vida.

Tradicionalmente, los sistemas utilizados para la regulación de caudal consistían en sistemas de control de válvulas; dichos sistemas incrementan la resistencia al flujo de líquido para controlar el caudal del mismo. Este incremento en la fricción mecánica del sistema se convierte en un incremento del gasto de energía.

Por su parte, los VFDs permiten disminuir el caudal por medio de la regulación de la velocidad del motor eléctrico de la bomba, disminuyendo la presión del sistema, y en consecuencia las pérdidas por fricción en el mismo. Este comportamiento se refleja directamente en el consumo energético.

Las bombas son el elemento principal del sistema, permitiendo la conversión de la energía mecánica en energía cinética. Su comportamiento se modela a través de las denominadas leyes de afinidad, que definen relaciones matemáticas entre las variables: presión, caudal, velocidad y potencia.

Las mejoras en los sistemas microprocesados que integran los actuales VFDs han permitido disponer de reguladores PID digitales integrados en sus sistemas. Cada vez se incrementan más las versatilidades a nivel de software de los VFDs, lo que permite al programador desarrollar mejores aplicaciones para los usuarios.

Una aplicación directa de la tecnología PID son los sistemas de presión constante, en donde se implementa un sistema de control de lazo cerrado de presión, con el objeto de regular la velocidad de la bomba para mantenerla constante independientemente del caudal.

Sin embargo, el funcionamiento correcto de un sistema de bombeo recae en la correcta selección y dimensionamiento de los sistemas mecánicos y electrónicos que actúan sobre ellos, así como de sus respectivas protecciones. La utilización de bombas inadecuadas y el desconocimiento de las curvas de operación de las mismas junto con la curva de sistema, puede implicar que la solución VFD no obtenga los resultados esperados. De igual manera la falta de instalación de seguridades mecánicas y eléctricas al sistema pueden hacer que el sistema no sea fiable.

1.2 TÉRMINOS HIDRÁULICOS

1.2.1 CAUDAL:

Es la cantidad de líquido que pasa a través de una bomba en un período de tiempo determinado.

Volumen del caudal o flujo volumétrico (Q):

Es el volumen de líquido que puede mover una bomba por unidad de tiempo, independientemente de la densidad del líquido. Se mide en $[m^3/h]$ y se lee directamente de la curva de la bomba. En aplicaciones de suministro de líquido, como en el caso de riego o agua potable, es el parámetro más importante de diseño, ya que se requiere que la bomba suministre un cierto volumen de agua.

$$Q = \frac{dV}{dt}$$

Ec. 1.1.

Masa del caudal o flujo másico (Q_m):

Se define como la masa que mueve una bomba por unidad de tiempo y se mide en [kg/s].

$$Q_m = \frac{dm}{dt} \quad \text{Ec. 1.2.}$$

Donde m es la masa. En función de la densidad ρ , esta ecuación puede escribirse de la siguiente manera.

$$Q_m = \rho \frac{dV}{dt} \quad \text{Ec. 1.3}$$

$$Q_m = \rho Q$$

Debe notarse que la densidad de un fluido cambia en función de la temperatura y la presión. Por tanto, la cantidad de masa que puede mover una bomba también será afectada por dichas variables. En la Figura 1.1 se puede ver la variación de la densidad del agua en función de la presión (bar) y la temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

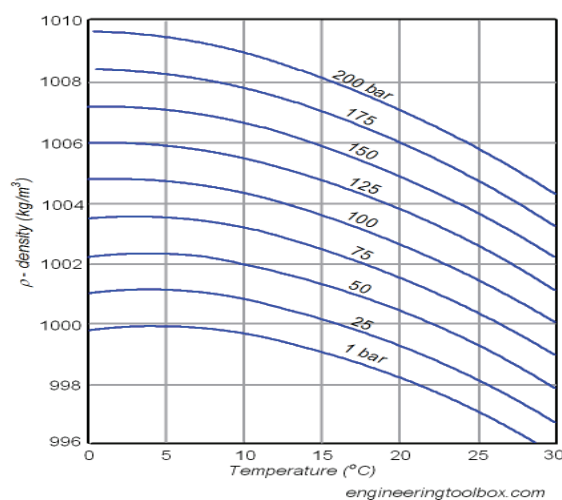


Figura 1.1 Densidad de agua como función de la presión y la temperatura

1.2.2 PRESIÓN:

Se define como la fuerza por unidad de área y se mide en varias unidades tales como: atmósfera, bares, psi, pascales, milímetros de mercurio, como muestra la Tabla 1.1. Los factores de conversión entre las distintas unidades de medida se indican en la Tabla 1.2.

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Unidad	Abreviación	Equivalencia a 1 atm	Usos
Pascal	Pa	101,3 kPa	SI; 1 Pa = 1 N/m ²
Atmosferas	atm	1 atm	general
milímetros de mercurio	mm Hg	760 mm Hg	Presión barométrica y gases
pulgadas de mercurio	in	29,92 in	Presión barométrica US.
libras por pulgada cuadrada	psi	14,7 psi	Ingeniería e Industria

Tabla 1.1. Unidades de Presión¹.

TABLA DE EQUIVALENCIAS ENTRE UNIDADES DE PRESION						
	Pa	bar	atm*	at**	mH ₂ O	mmHg
1 Pa = 1 N/m²	1	10 ⁻⁵	9.87 · 10 ⁻⁴	1.02 · 10 ⁻⁵	1.02 · 10 ⁻⁴	750 · 10 ⁻³
1 bar	10 ⁵	1	0.987	1.02	10.2	750
1 atm	1.013 · 10 ⁵	1.013	1	1.033	10.33	760
1 at = 1 kp/cm³	0.981 · 10 ⁵	0.981	0.968	1	10	736
1 m H₂O	0.981 · 10 ³	0.0981	0.0968	0.1	1	73.6

* Atmósferas Física ** Atmósfera Teórica

Tabla 1.2. Conversión de unidades de Presión².

¹ Physics for scientists and Engineers. Capítulo 15, página 453.

² Manual de Bombeo de la Industria. Grundfos. Página 87.

En la dinámica de fluidos se distingue entre: presión estática y presión dinámica.

Presión total:

Es la suma de la presión estática y la presión dinámica.

$$P_{tot} = P_{sta} + P_{dyn} \quad \text{Ec. 1.5}$$

Presión estática (p_{sta}):

Es la presión de un líquido sin movimiento. Se obtiene midiéndola con un manómetro colocado perpendicular al caudal.

Presión dinámica (p_{dyn}):

Es la presión debida al movimiento del fluido. Se define como:

$$P_{dyn} = \frac{1}{2} \rho g v^2 \quad \text{Ec. 1.6}$$

Donde, ρ es la densidad, g es la aceleración de la gravedad y v es la velocidad del líquido.

Debe observarse que generalmente se mide la presión con un dispositivo llamado manómetro. Este dispositivo no mide la presión absoluta sino la presión por encima de la presión atmosférica (1 atm). A la diferencia de presión entre el sistema y la atmósfera se conoce como presión manométrica.

Presión de sistema:

Es la presión presente en un punto del sistema cuando las bombas no están funcionando. Si el sistema es cerrado, la presión de sistema en [m] debe ser

mayor a la altura del sistema. De esta manera se garantizará que el sistema se llene de líquido.

1.2.3 ALTURA (PUMPING HEAD)

Se define como la altura a la que puede una bomba elevar un líquido. Se mide en metros [m] y está dada por:

$$H = \frac{P}{\rho g} \quad \text{Ec. 1.7.}$$

Si bien esta definición es bastante sencilla conviene aclarar su interpretación en términos físicos y de ingeniería.

Una bomba es esencialmente una máquina de velocidad cuyo objetivo es convertir la energía mecánica de un impulsor rotativo (impeller), en energía de presión (head). La transferencia de esta energía al líquido, permite que éste realice trabajo; el mismo que puede ser: mover el líquido a través de las tuberías, elevarlo desde una fuente más baja hasta un reservorio o incrementar la presión de un sistema. A esta *cantidad de energía por unidad de peso*³ transmitida al líquido se conoce como *altura* o *pump head*.

Físicamente se deduce este concepto a partir de la ecuación de balance de energía mecánica.

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta h + F = \frac{W_s}{m} \quad \text{Ec. 1.8.}$$

Donde, ΔP es la diferencia de presión entre 2 puntos, Δv^2 la diferencia de velocidad, Δh la de altura, F , la fricción del sistema y $\frac{W_s}{m}$, es el trabajo ejercido sobre el sistema. Si la fricción y el trabajo W_s se consideran nulos, se deduce la ecuación de Bernoulli.

³ Se refiere a la fuerza debida al campo gravitacional terrestre, no a la masa o cantidad de materia transportada. De ahí que la altura o head no dependa de la densidad de líquido sino de la velocidad del impulsor.

Para escribir la Ec. 1.8 en función del peso se divide por la aceleración de la gravedad y se tiene la ecuación de balance de energía mecánica por unidad de peso:

$$\frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + \Delta h + \frac{F}{g} = \frac{W_s}{mg} \quad \text{Ec. 1.9}$$

Haciendo un breve análisis de las unidades de medida involucradas en la ecuación anterior, se puede observar que todos los términos son cargas de altura.

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{kg \ m^3 \ s^2}{ms^2 \ kg \ m}$$

$$\frac{\Delta v^2}{2g} = \frac{m^2 \ s^2}{s^2 \ m^2}$$

El beneficio de expresar esta ecuación de la manera antes escrita es que permite intuitivamente comprender la cantidad de energía (por unidad de peso) involucrada en un sistema, e interpretar de manera sencilla las curvas características de las bombas.

Por ejemplo, si una bomba genera una presión de 1.013×10^5 Pa y se expresa esta cantidad en términos de altura, se puede deducir que la energía requerida por unidad de peso es la misma que la de una columna de 10.3 m de líquido.

Nótese también que si $1 \text{ bar} = 1.013 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$. entonces, aproximadamente, por cada bar de presión se puede obtener 10 metros de columna de líquido.

De las expresiones antes citadas se deducen las siguientes equivalencias, generalmente utilizadas para convertir psi, bar en altura:

Equivalencias Presión – Altura:

Se apuntan las ecuaciones que permiten convertir PSI a Pies y BAR en metros, en las ecuaciones Ec. 1.10 y Ec. 1.11 respectivamente. SG^4 se refiere a la gravedad específica de la sustancia.

Conversión de PSI a Pies:

$$H = \frac{2.31 * P}{SG} \quad \text{Ec. 1.10}$$

Conversión de Bar a Metros:

$$H = \frac{10.197 * P}{SG} \quad \text{Ec. 1.11}$$

1.2.4 CAVITACIÓN

La cavitación aparece cuando la presión de aspiración es menor o igual a la presión de vapor del líquido bombeado. Cuando esto sucede se producen burbujas de vapor que implotan al aumentar la presión. Los efectos generados por la cavitación generalmente son:

1. Erosión de las superficies de los impulsores y su posible destrucción debido a las ondas de choque producidas cuando las burbujas implotan.
2. Incremento del nivel de ruido y las vibraciones de la bomba, que acortan el tiempo de vida de cojinetes, cierres y soldaduras.
3. Reducción del rendimiento de la bomba, que en casos extremos puede provocar la pérdida total de la misma.

⁴ También denominada densidad relativa, es la relación por cociente entre la densidad de un líquido y la densidad del agua a una temperatura específica. Generalmente se utiliza el valor de la densidad del agua a 4°C, que corresponde a 1000 kg/m³.

En la Figura 1.2 se puede observar la formación de las burbujas. Cuando estas circulan a través de los impulsores experimentan un cambio de presión que las obliga a implotar.

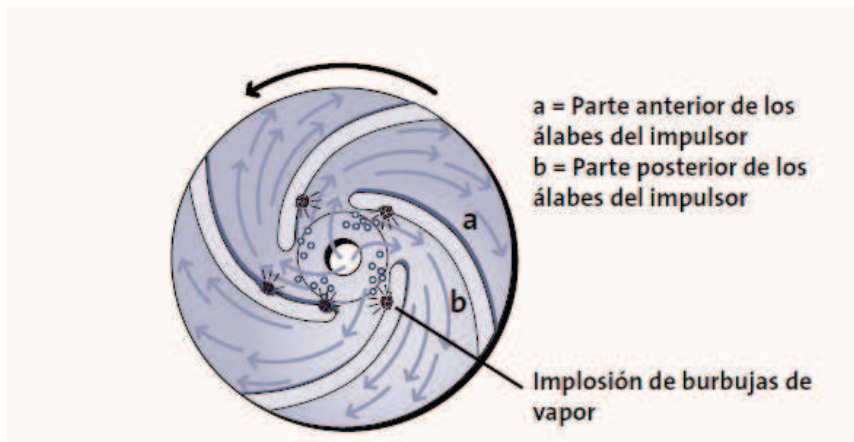


Figura 1.2. Formación de burbujas en la cavitación.

En la Figura 1.3 se puede observar la reducción característica en el rendimiento debido a la cavitación:



Figura 1.3. Respuesta QH en cavitación

1.2.5 NPSH (ALTURA DE ASPIRACION POSITIVA NETA)

Se denomina NPSH a la diferencia de presión entre la presión de entrada y el nivel inferior de presión dentro de la bomba. El NPSH es una expresión de la pérdida de presión que se da en el interior de la primera parte de la carcasa de

la bomba e indica hasta qué grado la bomba no es capaz de crear un vacío absoluto. Sin embargo, si el NPSH es muy bajo, menor a la presión de evaporación del líquido, se producirá la cavitación.

En la Figura 1.4, se puede ver cómo varía la presión en el interior de la bomba desde la entrada en el lado de aspiración hasta la descarga. En la primera etapa de la bomba, la presión disminuye, para luego elevarse a un valor mayor a la presión de admisión en el lado de descarga.

1. Presión de aspiración
2. Línea de presión
3. Presión atmosférica
4. Entrada de la bomba
5. Presión de evaporación
6. Descarga de la bomba
7. Vacío
8. NPSH
9. NPSHR

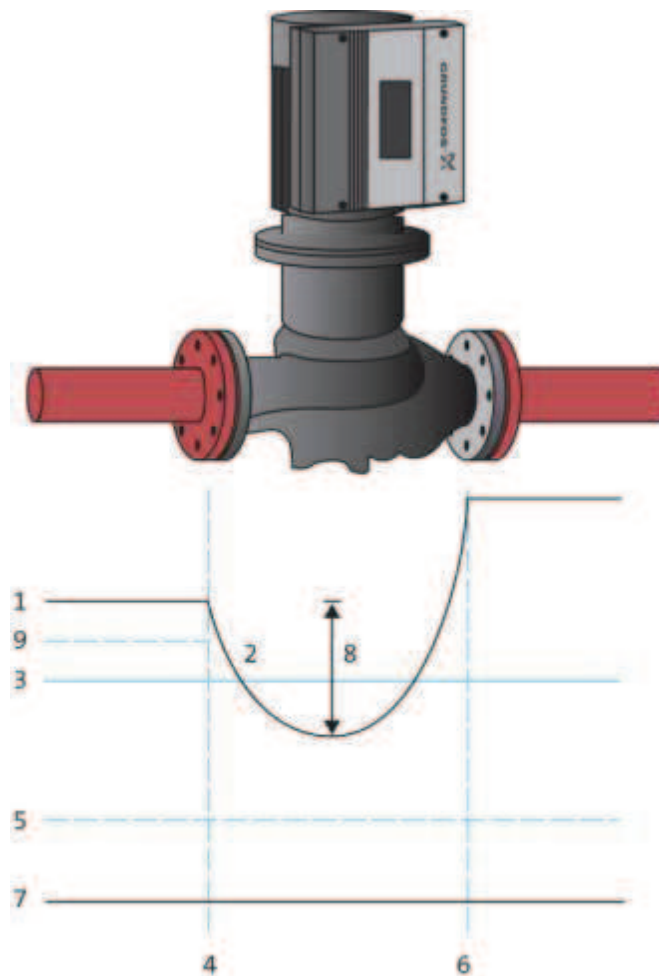


Figura 1.4. Curva de presión en el interior de la bomba

NPSHA (altura de aspiración positiva disponible):

Es la cantidad de presión en la entrada de la bomba que excede la presión de vaporización. El NPSHA depende de la altura, la temperatura y la presión del líquido.

Los efectos antes indicados de la cavitación se dan a valores diferentes de NPSHA. Por esta razón, debe existir un margen por el cual NPSHA debe ser mayor que el NPSHR. Debe tomarse en cuenta que al incrementar el flujo a través de la bomba, también aumentarán las pérdidas por fricción; esto causará que el valor de NPSHA disminuya.

NPSHR (altura de aspiración positiva neta requerida):

Es el valor de NPSH requerido para evitar que la bomba entre en cavitación. El valor de NPSHR se incrementa proporcionalmente con el flujo y proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad. Sin embargo, el NPSHR no tiende a cero cuando la velocidad es cero. Este hecho debe tomarse en consideración al usar VFDs.

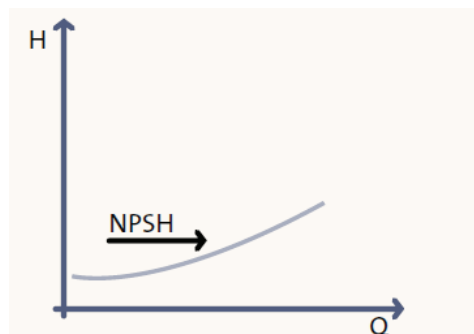


Figura 1.5. Curva NPSH

Los estándares industriales definen el comienzo de la cavitación como el valor de NPSHR para el cual la presión diferencial se reduce en un 3% comparado a la presión obtenida sin cavitación. En este punto empieza una cavitación incipiente, pero que con una operación prolongada podrá causar daños.

1.3 SISTEMAS DE BOMBEO

Definición: Un sistema de bombeo es el conjunto de tuberías, válvulas, bombas y demás equipo por el cual un líquido fluye y cuyo objetivo principal es *su transporte*, ya sea para llevar un líquido desde una fuente hasta su destino (p.ej. llenado de un reservorio), o para circularlo a través de un sistema (p.ej. transferencia de calor) . El corazón de este sistema es la bomba, que se encarga de transformar la energía mecánica en energía cinética imprimiendo movimiento al fluido.

La presión generada por la bomba, que permite al líquido fluir a un determinado caudal, debe ser capaz de superar las pérdidas del sistema inherentes al mismo. Generalmente, dichas pérdidas son de 2 tipos: estáticas y de fricción. En la Figura 1.6, se grafica la carga estática. Ésta consiste en la diferencia en altura entre la fuente de abastecimiento y el reservorio de destino. Por su parte las pérdidas de fricción, también conocidas como pérdidas dinámicas, en cambio obedecen al comportamiento físico del líquido a ser bombeado, tales como: viscosidad, gravedad específica, vapor de presurización, y a características mecánicas de la instalación como: rugosidad, longitud, y tamaño del conducto; así como a dispositivos externos como válvulas y conectores. Este tipo de pérdida se caracteriza por ser proporcional al cuadrado del caudal. Un sistema cerrado de circulación sin superficies abiertas a la atmosfera, es un sistema con pérdidas dinámicas únicamente.

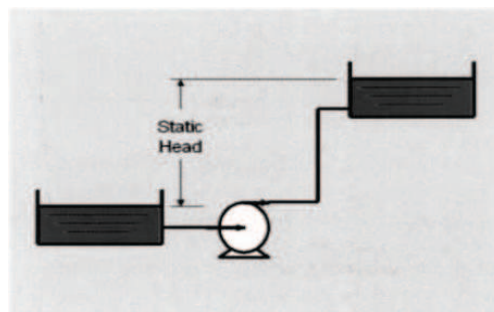


Figura 1.6. Carga estática⁵

⁵ EUROPUMP and Hydraulic Institute, "Variable Speed Pumping: A guide to successful applications", Elsevier Advanced Technology 2004, Oxford, UK... Figure 2.1. Static Head

1.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO

Mecánicamente, estos sistemas se clasifican en función del recorrido del líquido o del tipo de trabajo realizado.

En función del recorrido realizado por el líquido se pueden clasificar en:

1. **Sistemas sin retorno:** son aquellos en que el todo el líquido es descargado del sistema. Un ejemplo de este sistema consiste en elevar agua desde un pozo hasta un reservorio que distribuye el agua entre los consumidores por gravedad.
2. **Sistemas con retorno total:** son sistemas en que el líquido es continuamente recirculado. Ejemplo de estos sistemas pueden ser intercambiadores de calor, chillers.
3. **Sistemas con retorno parcial:** son sistemas en que existe tanto retorno del líquido como su descarga en algún subproceso.

Según el tipo de trabajo realizado los sistemas de bombeo se pueden clasificar en:

1. **De intercambio térmico:** Chillers, Torres de enfriamiento, Agua de enfriamiento de Planta, Mill Roll Cooling, Agua de condensación, etc.
2. **Succión/Entrega:** Agua doméstica, Boiler Feed, toma de río, agua lluvia, Sprinkler Irrigation, Alcantarillado, etc.

1.3.2 CURVAS DEL SISTEMA

La mayoría de sistemas de bombeo tienen una combinación de carga estática y dinámica. Una curva de sistema es la representación gráfica de la altura requerida por el sistema para todos los valores de caudal. Independientemente de la configuración mecánica, función o tipo de control del sistema, el objetivo de esta curva es indicar el requerimiento de presión total ó altura en función del caudal. Los componentes principales del sistema son:

Static head: es la diferencia de altura entre el punto de entrada del sistema y el punto más alto de descarga.

Working Head: es la altura que debe estar disponible para el sistema en una localidad específica para satisfacer los requerimientos de diseño.

Friction head: es la altura requerida por el sistema para vencer la inercia del mismo a fluir a través de las tuberías, válvulas, bridas, uniones, etc.

Altura total del sistema: para un valor de flujo determinado, será la suma de la carga estática, la carga dinámica y la carga de trabajo. En la Figura 1.7 se puede apreciar la Curva total del sistema.

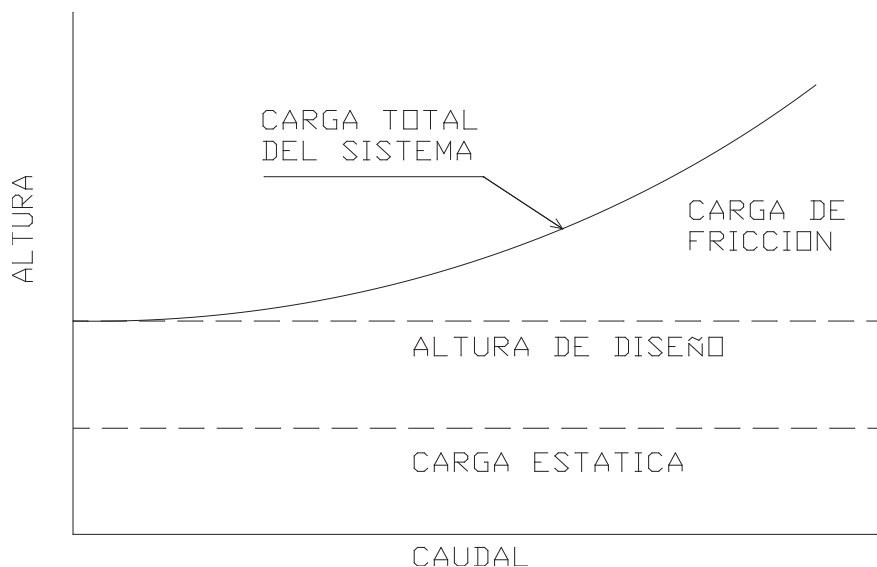


Figura 1.7. Curva total del Sistema

1.3.3 ESTRUCTURA DE LAS BOMBAS

1.3.3.1 Bombas centrífugas:

En 1687, el físico Denis Papin inventó la bomba centrífuga. Su principio de funcionamiento es la ley de conservación de la energía. Según esta ley, la energía no puede crearse ni destruirse, sólo se transforma. De esta manera, la bomba transforma la energía mecánica en energía de presión (head). Parte de esta energía es utilizada en vencer la fricción interna propia de la sustancia

debida a su viscosidad⁶. El resto de la energía restante se almacena en el líquido como una presión elevada, capaz de producir trabajo útil fuera de la bomba. Dicho de otro modo, una bomba centrífuga es una máquina de velocidad diseñada alrededor de su impeller.

La construcción de la bomba centrífuga es razonablemente económica, robusta y simple. La alta velocidad que posee permite que sea conectada directamente a un motor asíncrono, proporcionando un caudal constante de líquido fácil de regular.

En la Figura 1.8 se puede ver la construcción típica de una bomba centrífuga. La entrada de la bomba conduce el líquido directamente al centro del impulsor giratorio y desde allí se lanza hacia la periferia. Este tipo de construcción es adecuado para líquidos puros. En el caso de líquidos impuros (p.ej. para aguas residuales) se dispone de bombas diseñadas con un impulsor especial que evita atascos de objetos dentro de la bomba. Ya que el diseño es abierto, cualquier diferencia de presión existente cuando la bomba se encuentra en reposo, permite que el líquido fluya a través de la bomba.

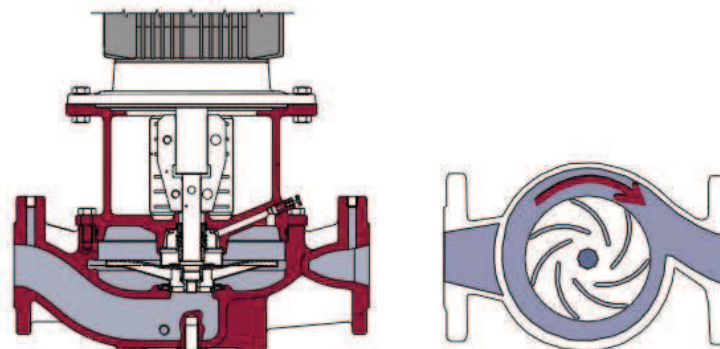


Figura 1.8. Estructura de una bomba centrífuga⁷

⁶ Se define a la viscosidad como la resistencia de un fluido a ponerse en movimiento, debido a la atracción que se produce entre sus moléculas. La viscosidad de un líquido varía directamente con la temperatura.

⁷ GRUNDFOS, "Manual de Bombeo de la Industria", Grundfos 2004. Página 12

1.3.3.2 Tipos de bombas centrífugas:

Generalmente se dispone de 3 tipos de bombas centrífugas a saber:

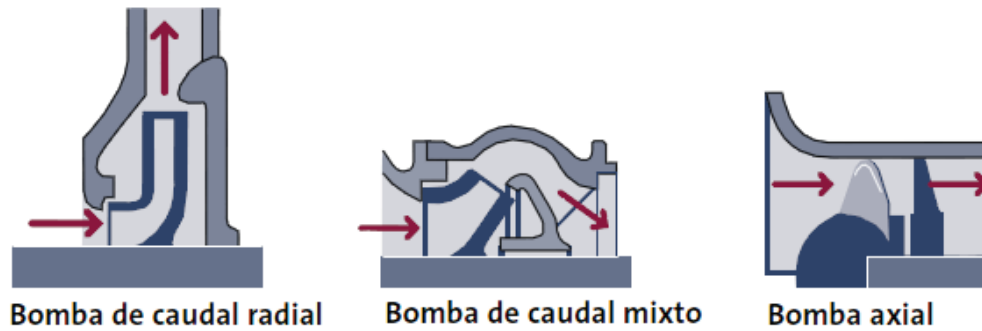


Figura 1.9. Tipo de Bombas centrífugas.

Bombas de caudal radial:

La corriente del líquido se mueve en planos radiales. La energía se transmite esencialmente por la fuerza centrífuga.

Bombas axiales:

La corriente líquida se mueve en superficies cilíndricas alrededor del eje de rotación. La energía es transmitida al líquido por los álabes.

Bombas de caudal mixto:

También conocidas como diagonales, son aquellas que el líquido se mueve radial y axialmente, impulsando el líquido tanto por fuerza centrífuga como por acción de los alabes.

1.3.3.3 Características de las bombas

Las curvas características de las bombas describen el desempeño de las mismas y son proporcionadas por el fabricante. Indican la altura, el consumo, el rendimiento y el NPSH como función del caudal a una velocidad determinada. Pueden presentarse como una curva simple (Figura 1.10), representando un diámetro específico del impulsor o como un juego de curvas para varios diámetros de impulsor en una carcasa (Figura 1.11).

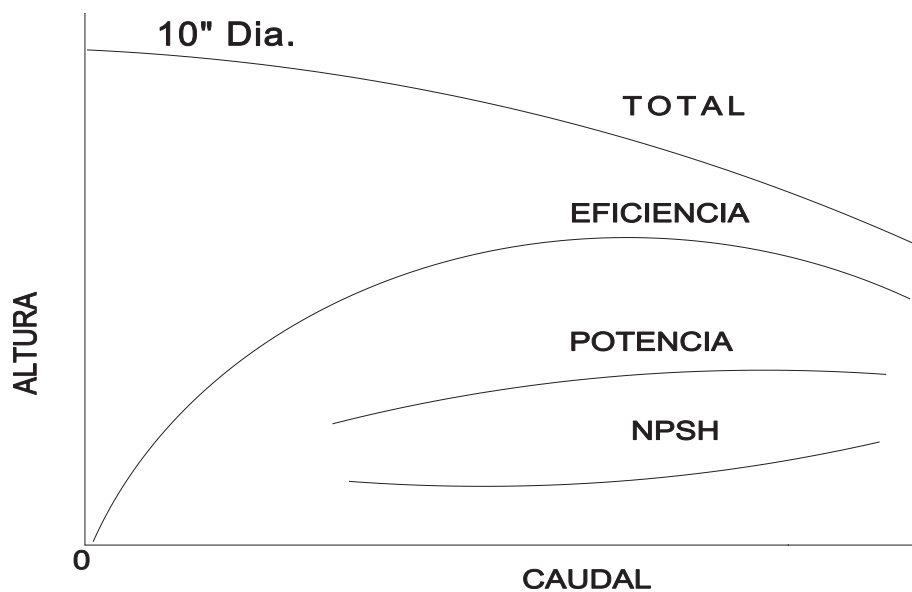


Figura 1.10. Curvas de Rendimiento para bomba centrífuga

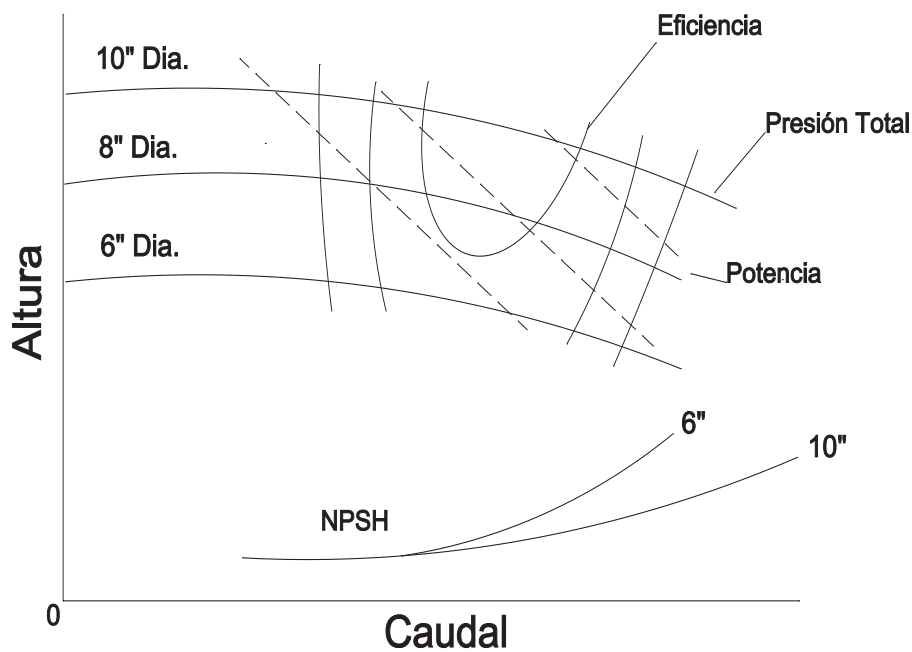


Figura 1.11. Curvas de rendimiento para varios diámetros de impeller

Normalmente estas curvas se refieren a la parte de la bomba. Sin embargo, en las bombas con motor integrado, es posible que las curvas de rendimiento abarquen tanto al motor como la bomba.

1.3.3.3.1 Curva de Altura QH

Indica la altura que la bomba puede conseguir a un caudal dado. Generalmente la altura se mide en metros de la columna de líquido.

En una bomba ideal sin fricción la curva QH es una línea recta cuya pendiente depende del ángulo del impeller. Sin embargo, la curva ideal se ve afectada por la fricción, fugas y agitaciones que ocurren sobre el impeller y la estructura. En la Figura 1.12 se puede apreciar tanto la curva ideal QH así como la curva real y las pérdidas debido a la fricción y la agitación.

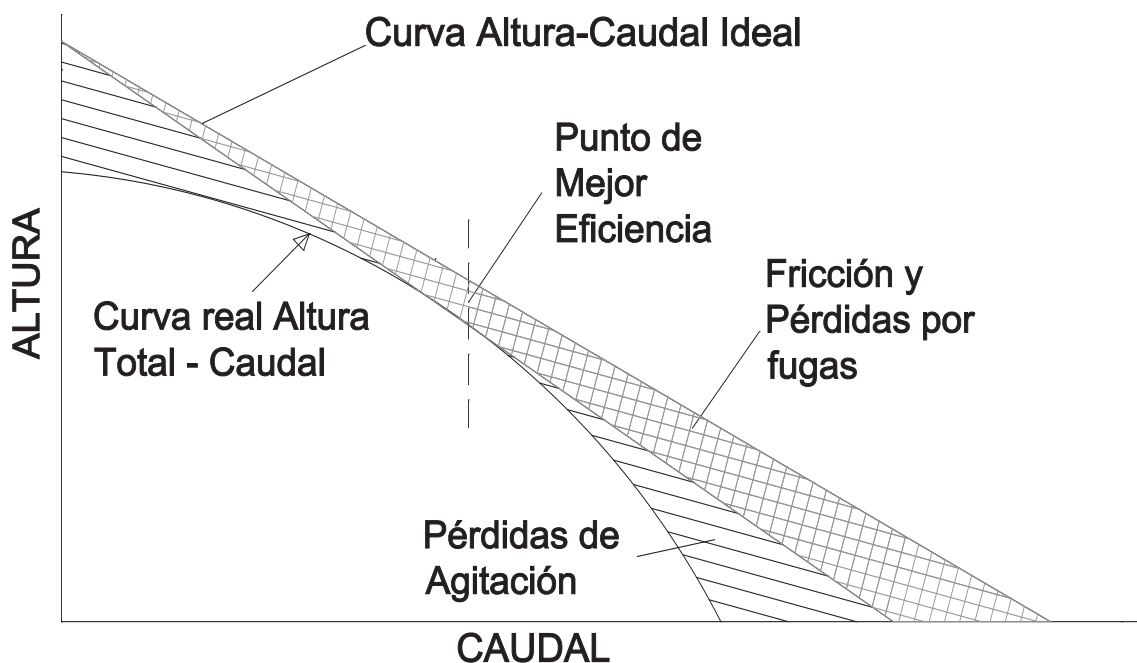


Figura 1.12. Curva teórica QH⁸

⁸ PEERLESS Pump Company, "System Analisis for pumping equipment selection", Peerless Pump Company 2005, Indianapolis, Indiana. Página. 10

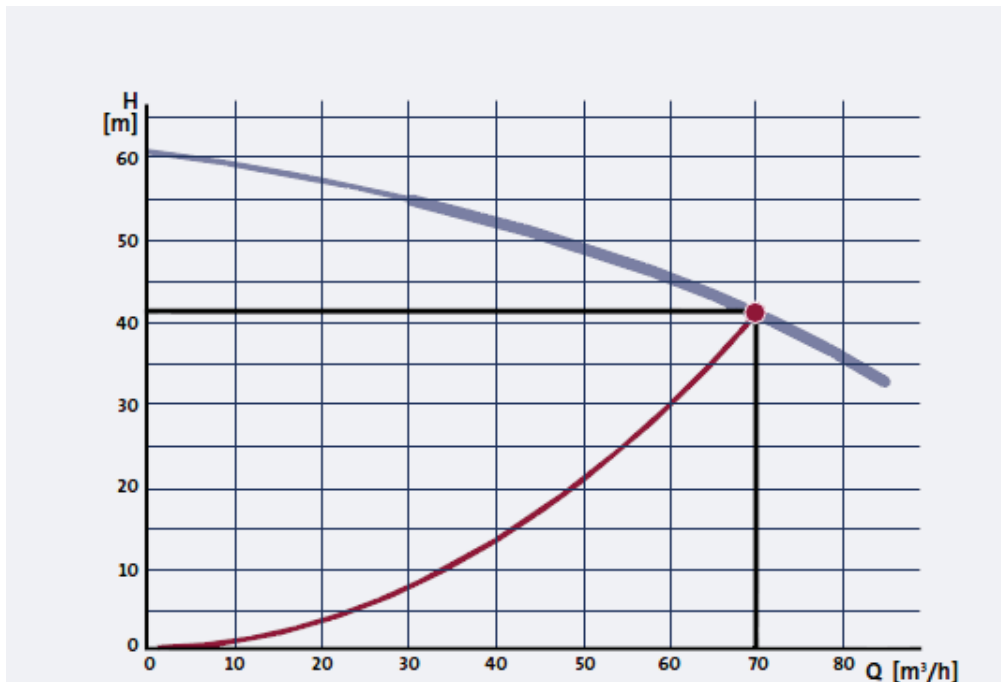


Figura 1.13. Curva Típica QH. Caudales pequeños permiten alcanzar grandes alturas. Caudales grandes permiten menores alturas.

Punto de máxima eficiencia: es el punto en el que la suma de todas las pérdidas se minimizan. Este punto se indica en la Figura 1.12 como Best Efficient Point (BEP).

1.3.3.3.2 Curva de Rendimiento

El rendimiento es la relación entre la potencia proporcionada y la cantidad de potencia utilizada, esto es, la relación entre la potencia que la bomba entrega al agua P_h y la potencia de entrada al eje P_2 .

$$\eta_p = \frac{P_h}{P_2} = \frac{\rho g Q H}{P_2} \quad \text{Ec. 1.12}$$

Donde ρ es la densidad, g la aceleración de la gravedad, Q el caudal y H la altura.

Como se puede observar en la Figura 1.14, el rendimiento depende del punto de servicio de la bomba. De ahí que su selección debe ser tal que se ajuste al requerimiento de caudal y garantice la operación de la bomba en el área de caudal más eficiente.

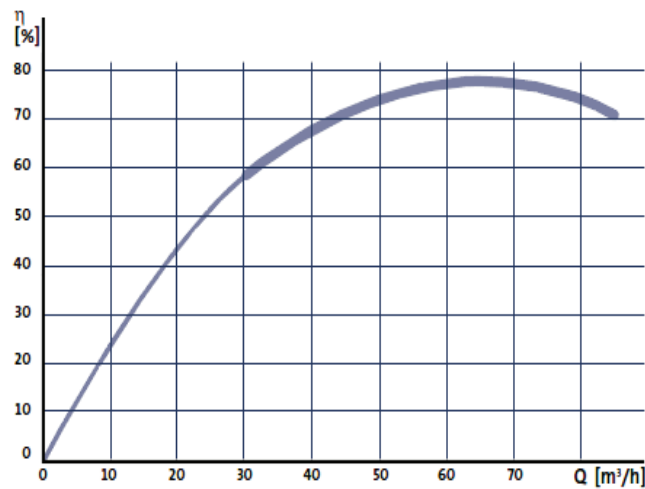


Figura 1.14. Curva de Rendimiento.

Para agua a 20°C, la potencia hidráulica se puede calcular en W como:

$$P_H = 2.72QH \quad \text{Ec. 1.13.}$$

1.3.3.3.3 Curva de Consumo:

Como puede apreciarse en la Figura 1.15, el valor de consumo aumenta cuando el caudal aumenta.

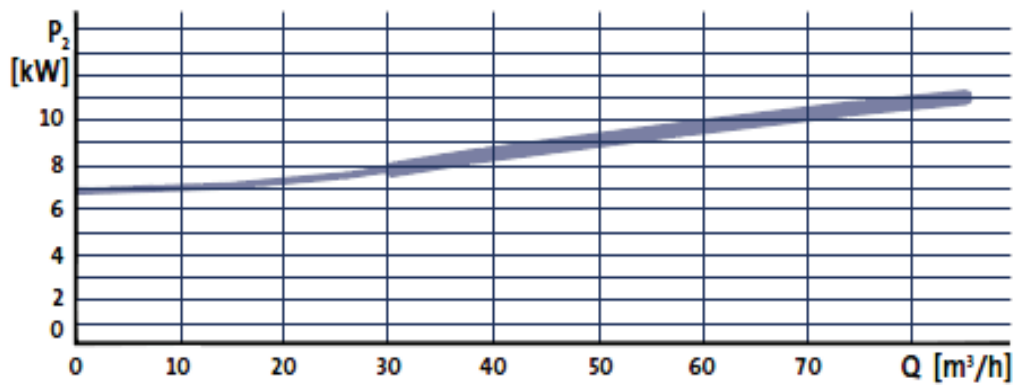


Figura 1.15. Curva típica de Consumo para bomba centrífuga.

1.3.3.3.4 Curva NPSH

El valor de altura de aspiración positiva es la presión absoluta mínima que debe existir en el lado de aspiración de la bomba para evitar la cavitación. El NPSH se mide en [m]. Cuando aumenta el caudal, el NPSH también aumenta.

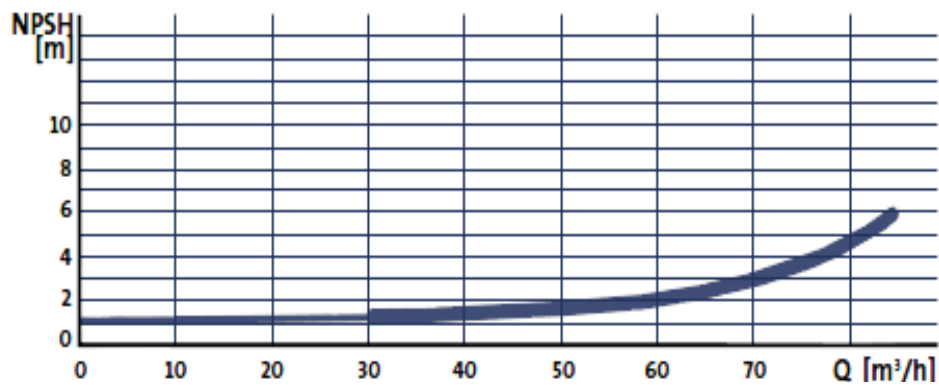


Figura 1.16. NPSH en función del caudal

1.3.4 PUNTO DE OPERACIÓN DE LA BOMBA

La interacción de una bomba instalada en un sistema se puede ilustrar gráficamente mediante la superposición de la curva de respuesta QH de la bomba y la curva del sistema. La intersección de ambas curvas da origen a un punto llamado punto de operación o servicio de la bomba, como se indica en la Figura 1.17.

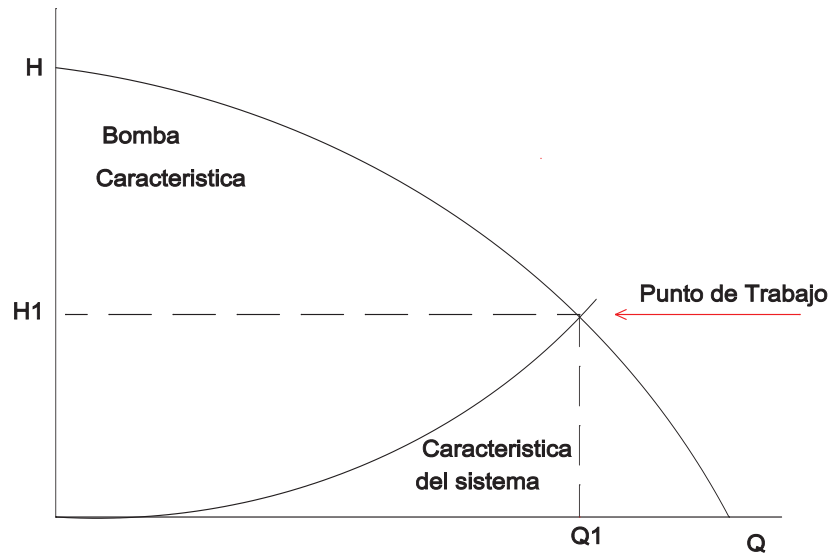


Figura 1.17. Punto de operación de la bomba

En las bombas centrífugas, un incremento en la resistencia del sistema reducirá el flujo. Si el flujo llega a cero, se obtiene la máxima altura. Esta condición es aceptable por un período de tiempo corto sin causar problemas.

Al seleccionar una bomba para una aplicación concreta es importante elegir una en la que el punto de servicio esté en el área de alto rendimiento de la bomba. Caso contrario, el consumo de la bomba será innecesariamente alto.

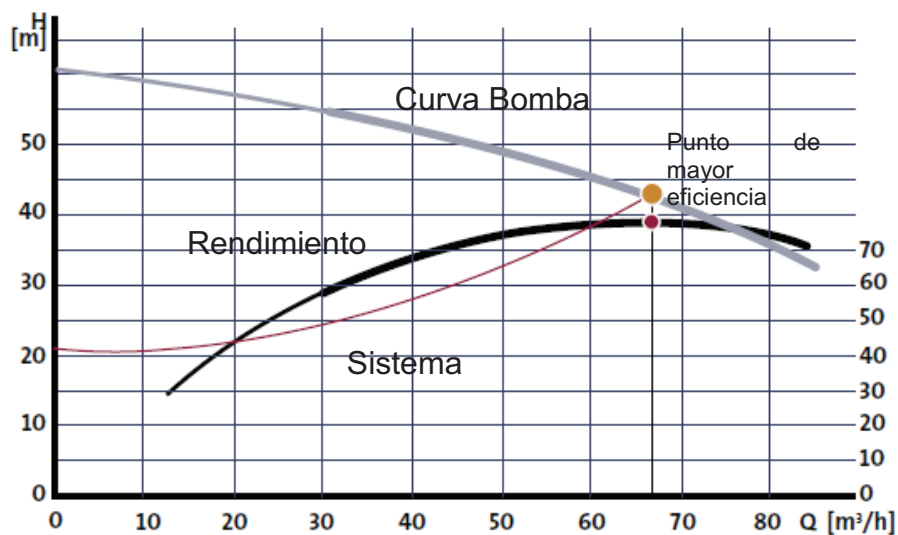


Figura 1.18. Punto de operación vs rendimiento.

En la Figura 1.18 se puede observar que el punto de operación de la bomba se encuentra fuera del área de rendimiento de la bomba. Se debe notar que generalmente los requerimientos de la curva del sistema cambian con el tiempo y por tanto se requiere ajustar el rendimiento de la bomba para que cumpla con los requerimientos cambiantes del sistema.

1.4 MÉTODOS DE AJUSTE DEL RENDIMIENTO DE LAS BOMBAS

En muchas ocasiones es necesario ajustar el rendimiento de la bomba para que satisfaga los requisitos cambiantes del sistema de bombeo. Con este fin, los métodos más comúnmente utilizados son:

- Control por estrangulamiento
- Cambio del diámetro del impulsor
- Control de velocidad

El método más óptimo para una aplicación determinada se puede derivar en función de la evaluación de la inversión inicial junto con los costos de funcionamiento de la bomba. Cada método aporta un comportamiento energético diferente de la bomba.

1.4.1 CONTROL POR ESTRANGULAMIENTO

Consiste en instalar una válvula de mariposa en serie con la bomba. El estrangulamiento permite reducir el caudal por medio del incremento de la resistencia del sistema. Esto hace que la curva del sistema se eleve a una posición superior. Cuando la válvula está abierta, el caudal es Q_2 . Con la válvula conectada, el caudal se reduce a Q_1 (Figura 1.19).

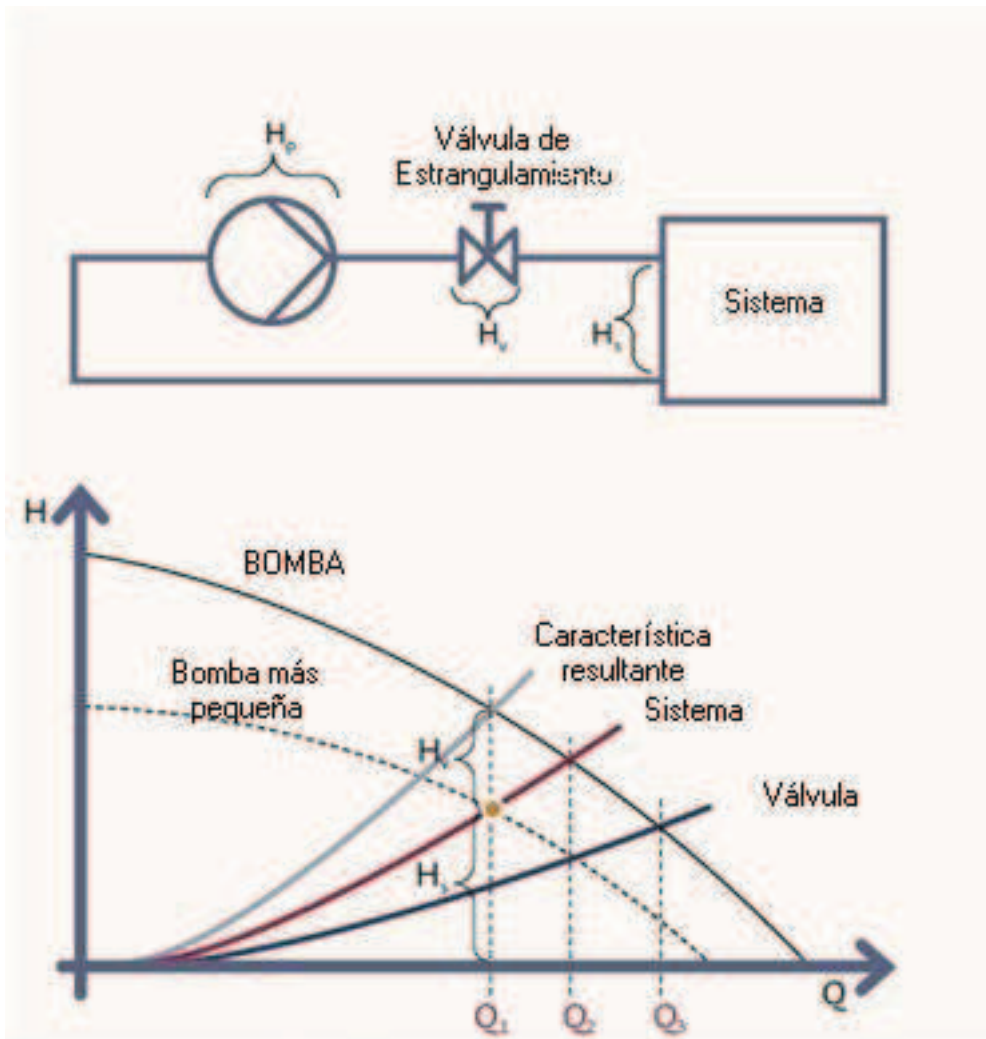


Figura 1.19. Control por estrangulamiento

Al ajustar el rendimiento de la bomba con este método, la bomba producirá una altura de elevación superior a la necesaria para el sistema.

1.4.2 CAMBIO DE DIÁMETRO DEL IMPULSOR

Este método consiste en cambiar el diámetro del impulsor de la bomba. Al reducir el diámetro, se reduce el consumo de la bomba. Esta modificación debe realizarse antes de instalar la bomba.

En este método el caudal y la altura cambian en la misma proporción, obteniéndose que los puntos de servicio estén sobre una línea recta con origen

en (0,0). La variación del consumo es proporcional al cambio del diámetro elevado a la cuarta potencia.

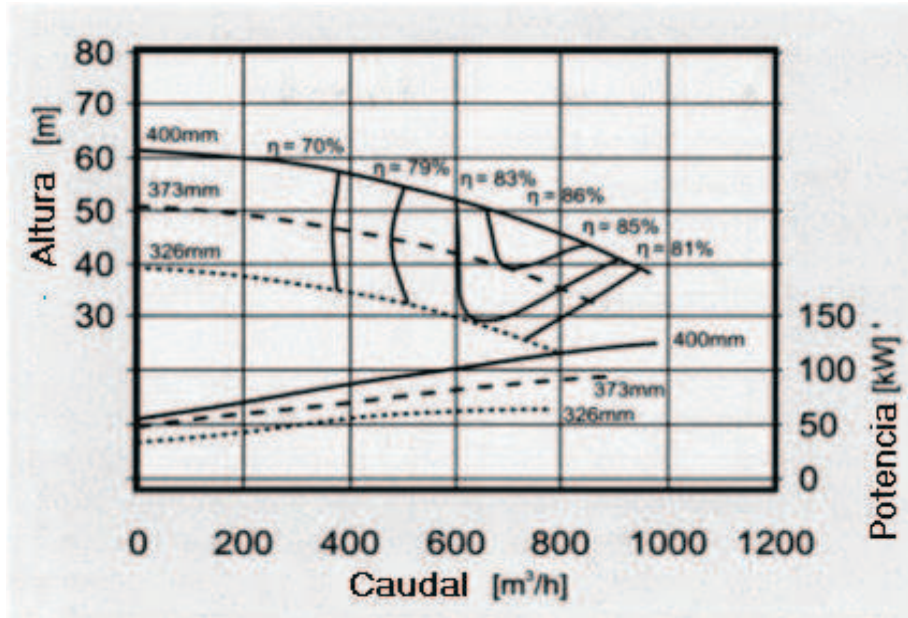


Figura 1.20. Control por cambio del diámetro del impulsor.

1.4.3 CONTROL DE VELOCIDAD (VFD)

El control de velocidad por medio de un convertidor de frecuencia (VFD) es considerado el método más eficaz para ajustar el rendimiento de una bomba, cuando se requiere caudal variable.

Como una bomba centrífuga es un dispositivo que genera presión mediante la rotación de su impulsor, se deduce que existe una relación entre la velocidad del impulsor y la presión o altura generada para un diámetro fijo del impulsor. Las ecuaciones que describen el desempeño de la bomba en función de la velocidad son las denominadas Leyes de Afinidad (Ec. 1.14).

$$\frac{Q_n}{Q_x} = \frac{n_n}{n_x}$$

$$\frac{H_n}{H_x} = \left(\frac{n_n}{n_x}\right)^2$$

$$\frac{P_n}{P_x} = \left(\frac{n_n}{n_x}\right)^3$$

Ec. 1.14. Leyes
de Afinidad

En la Ec. 1.14, Q , P , H y n designan el caudal, la potencia, la altura y la velocidad respectivamente. Por su parte, η corresponde al rendimiento de la bomba. Las relaciones expresadas por las Leyes de Afinidad permiten predecir cambios en los valores principales de la bomba al variar la velocidad de un valor n_x a un valor n_n . El comportamiento descrito por las leyes de afinidad se puede apreciar de manera gráfica en la Figura 1.21.

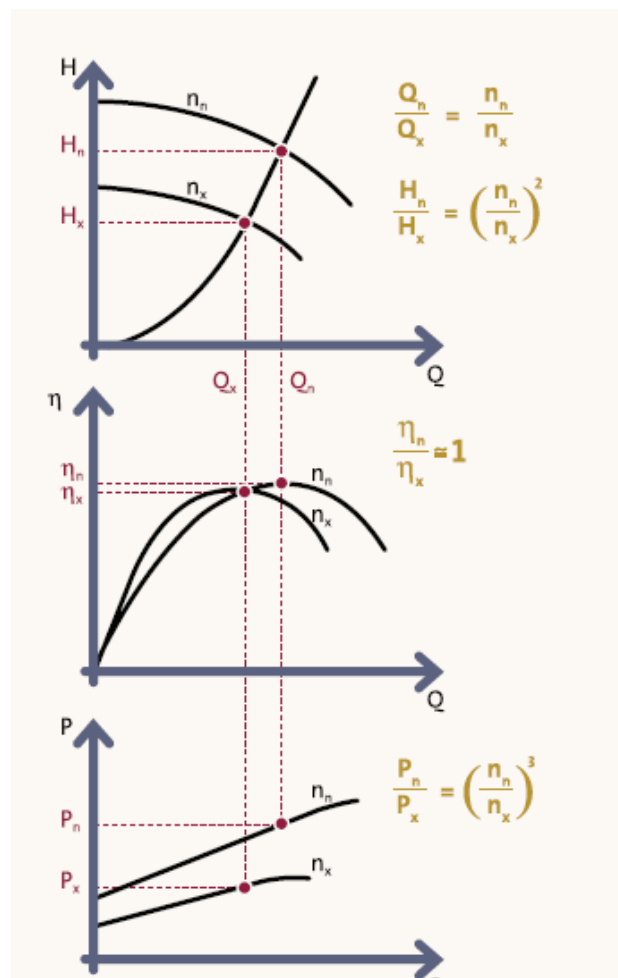


Figura 1.21. Características del sistema según las leyes de afinidad

En la práctica, se observa que una ligera disminución en la velocidad produce una variación significativa en la potencia demandada por la bomba. Por ejemplo, si la velocidad de la bomba se reduce a la mitad, la potencia se reducirá a la octava parte. El rendimiento, por su parte, forma una parábola que corta el origen de coordenadas.

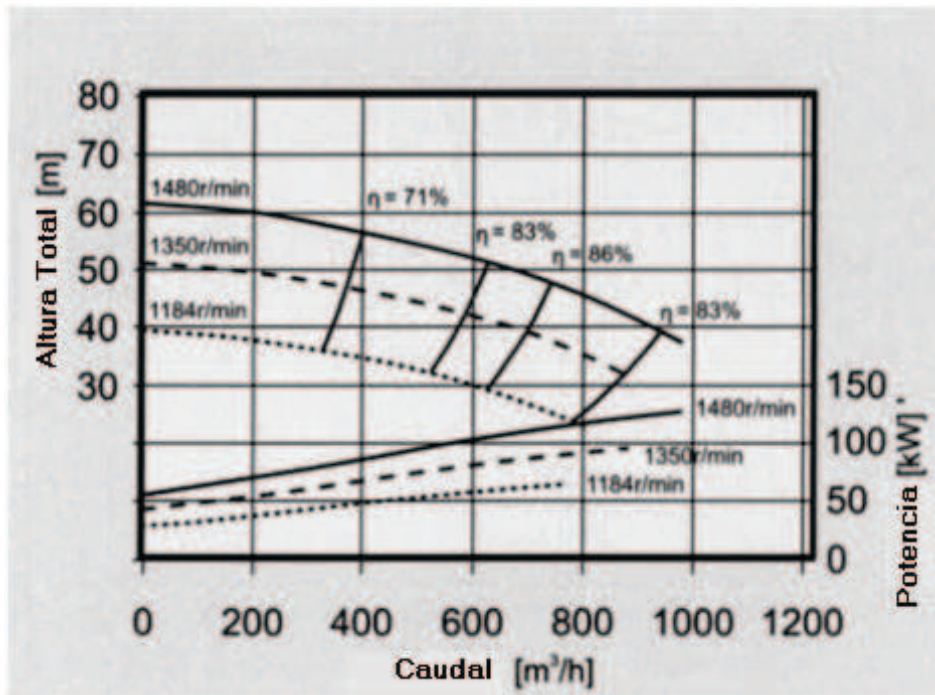


Figura 1.22. Curvas de rendimiento de la bomba al variar la velocidad

Como puede observarse de las curvas antes presentadas, la variación de la velocidad de la bomba da como resultado una nueva curva QH con menor altura y caudal, por lo que es posible reducir el caudal de la bomba sin incrementar la presión del sistema.

1.4.3.1 Variación de la velocidad en un sistema con alta carga estática

En este tipo de sistema, la curva del mismo se caracteriza porque empieza desde un valor dado de presión o altura. Por esta razón, la curva del sistema

no sigue las curvas de eficiencia constante, sino que más bien las corta. Esto produce que la eficiencia de la bomba cambie al variar de la velocidad.

Otra característica de este sistema es que la reducción de flujo no es proporcional a la reducción de la velocidad, sino que una pequeña reducción de esta variable puede producir una gran reducción en el flujo que provee la bomba. Por esta razón, en este tipo de sistema, las leyes de afinidad se pueden utilizar sólo como aproximaciones en el cálculo del ahorro de energía. También se debe observar que la variación de la velocidad de la bomba afecta la curva de rendimiento QH de la misma. Al reducir la velocidad baja el rendimiento que esta puede proporcionar. En la Figura 1.23 se muestra el efecto de variar la velocidad en un sistema de alta carga estática.

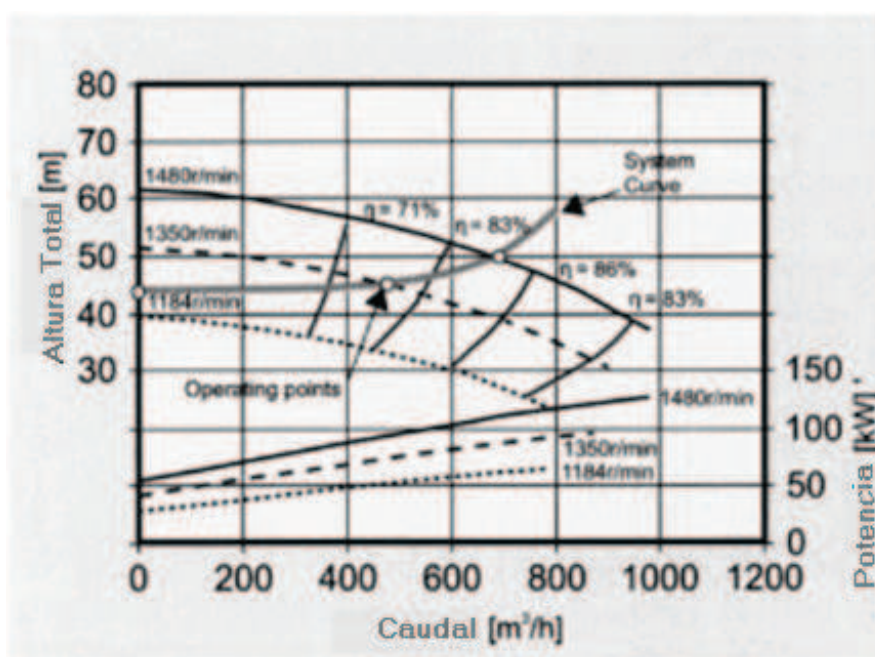


Figura 1.23. Efecto de la variación de velocidad de una bomba en un sistema con alta carga estática

Se puede observar en la Figura 1.23 que una pequeña reducción en la velocidad hace que el punto de operación de la bomba se mueva hacia arriba en la curva de rendimiento QH. Por esta razón en este tipo de mecanismos debe tenerse cuidado de no reducir la velocidad hasta el punto de *presión de cierre* (*shut-off head*). El operar la bomba cerca de este punto por prolongados

períodos de tiempo puede producir serios daños a la misma, debido a que este punto provee la máxima presión con caudal nulo. Por tanto, el resultado de operar la bomba cerca a la presión de cierre es que, al no haber flujo de líquido, la bomba empezará a calentarlo por fricción pudiendo alcanzar temperaturas dañinas.

De igual forma, en la Figura 1.23 también puede observarse que al variar la velocidad se afecta el rendimiento de la bomba. Este particular reduce los beneficios económicos de la utilización de VFDs en estas aplicaciones. Generalmente, este problema se puede compensar con la correcta selección de la bomba respecto de la curva de sistema.

Finalmente, la velocidad de operación de la bomba para un sistema con alta carga estática puede estar dentro de un rango en función de la presión del sistema y la eficiencia. Por ejemplo, en la Figura 1.23, una velocidad inferior a 1184 rpm no provee la presión del sistema y la eficiencia es menor al 70%. Por su parte la velocidad de 1480 rpm provee de presión al sistema con una eficiencia mayor al 83%. Por tanto en estos sistemas, se ha de buscar un rango razonable para la variación de la velocidad de la bomba, tal que se logre mantener la presión del mismo a una eficiencia adecuada.

1.4.3.2 Variación de velocidad en un sistema con pérdidas de fricción

En el acápite anterior se analizó la variación de la velocidad en un sistema que sólo tiene una alta carga estática. De igual manera, ahora se considera un sistema que sólo tenga que vencer la fricción del mismo.

Como muestra la Figura 1.24, cuando el sistema únicamente tiene pérdidas de fricción, la variación de velocidad no afecta el rendimiento de la bomba. El punto de operación de la ésta se mueve sobre una curva de rendimiento constante. En este caso se puede aplicar las leyes de afinidad, lo que implica que existe una reducción substancial en la energía consumida por el sistema, por lo que la variación de velocidad con VFDs resulta una propuesta ideal.

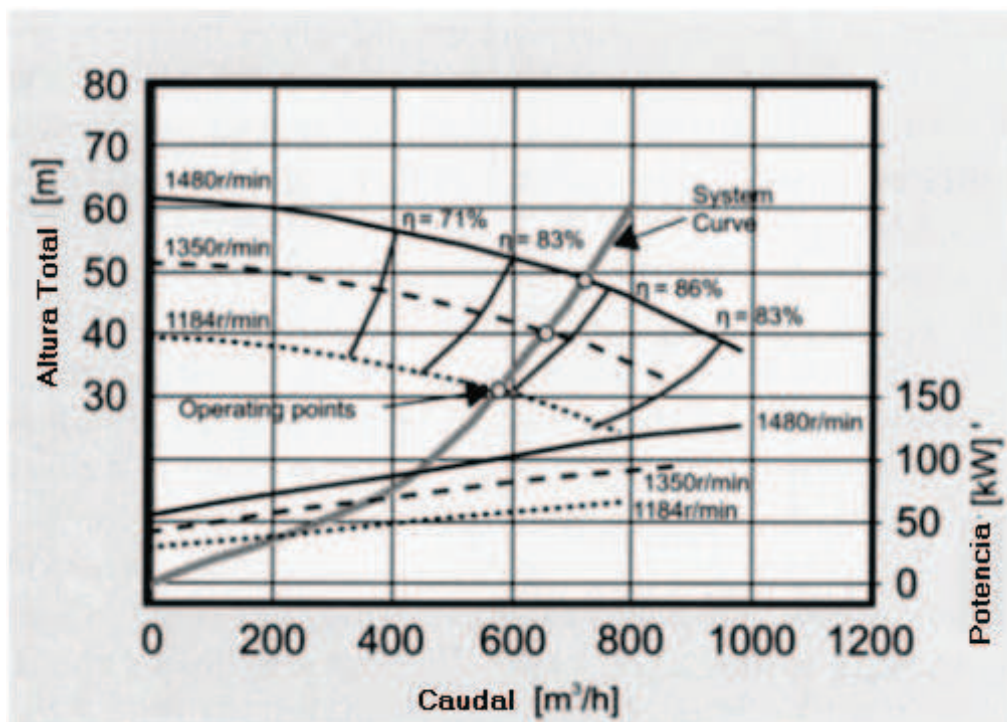


Figura 1.24. Variación de velocidad en un sistema con pérdidas de fricción únicamente

1.4.4 EFICIENCIA ENERGÉTICA

Al comparar los diferentes métodos que se disponen para ajustar el rendimiento de la bomba, interesa conocer cuáles permiten ahorro de energía en el desempeño del trabajo realizado por la bomba.

La potencia de salida de la bomba se puede definir como:

$$Potencia = \frac{Head(pies) * Caudal(GPM) * SG}{3960} \quad \text{Ec. 1.15}$$

Por tanto la potencia transmitida al líquido en un gráfico QH se puede representar como el área de los rectángulos contenidos en la curva QH para cada punto de operación como se indica en la Figura 1.25.

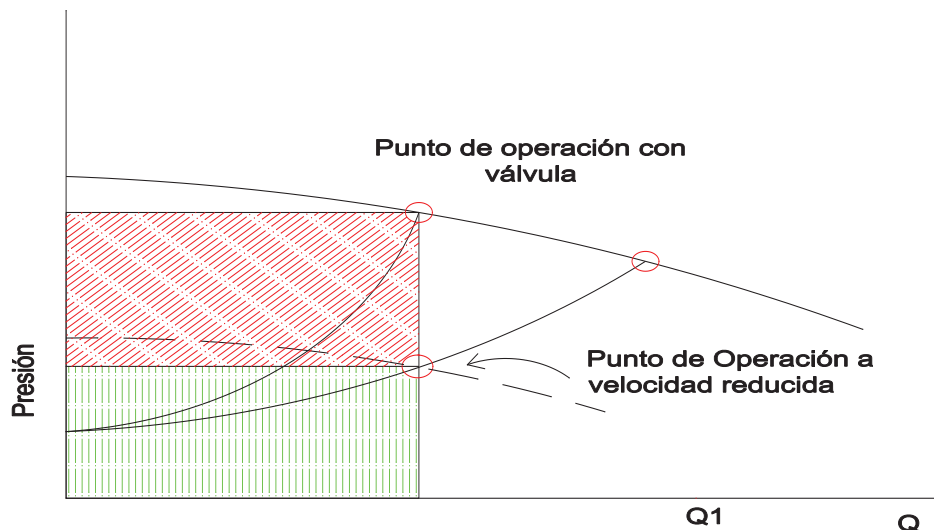


Figura 1.25. Consumo Energético VFD vs Válvulas de estrangulamiento

La Figura 1.25 indica que al reducir el caudal utilizando el método de estrangulamiento, se tendrá que incrementar innecesariamente la presión del sistema. Por tanto, este método utiliza una potencia igual a la suma del área del rectángulo oscuro y claro. En cambio, al utilizar un variador de frecuencia, se crea una nueva curva QH que permite alcanzar la misma reducción de caudal a una presión menor, lo que no sólo se traduce en menos consumo de energía, ya que sólo consume la energía representada por el área del rectángulo claro, sino que existe menos fricción en el sistema mecánico.

Energéticamente, los diferentes métodos de control de rendimiento de la bomba se pueden apreciar de forma resumida en Figura 1.26. En ella se puede notar que el funcionamiento con VFD de la bomba genera la menor demanda de energía

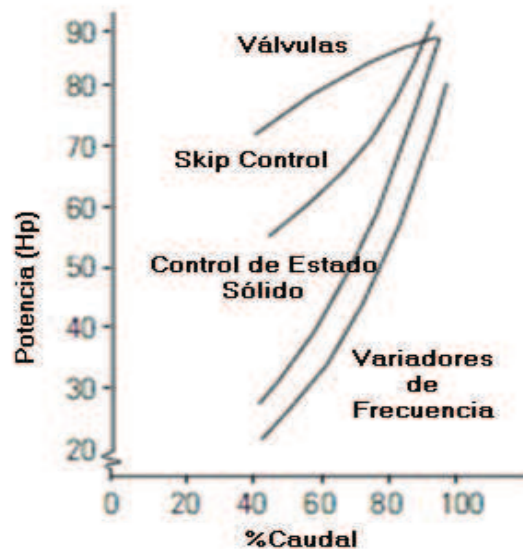


Figura 1.26. Comparación de la potencia de entrada

1.4.5 VENTAJAS DEL CONTROL DE VELOCIDAD POR VFD

Menor consumo de energía:

Las bombas de velocidad controlada sólo utilizan la cantidad de energía necesaria para realizar un trabajo específico. Comparada con otros métodos la velocidad controlada por frecuencia ofrece el mayor rendimiento y la utilización más eficiente de la energía.

Bajo costes del ciclo vital:

Un funcionamiento eficiente permite un menor consumo energético, lo que se refleja en menores costes de operación. En comparación con sistemas de velocidad fija, las bombas con velocidad controlada pueden reducir el consumo de energía hasta un 50%.

1.5 CONFIGURACIONES DE BOMBEO:

1.5.1 CONFIGURACION SERIE:

Este tipo de conexión se utiliza cuando el sistema se caracteriza por altas pérdidas de fricción y poca carga estática, ya que la presión resultante para un caudal determinado es igual a la suma de las presiones desarrolladas por cada bomba. Por esta razón, este tipo de sistema se suele conocer también como de *presión aditiva*. En la Figura 1.27 se muestra un esquema de la conexión de las bombas y la curva de rendimiento resultante.

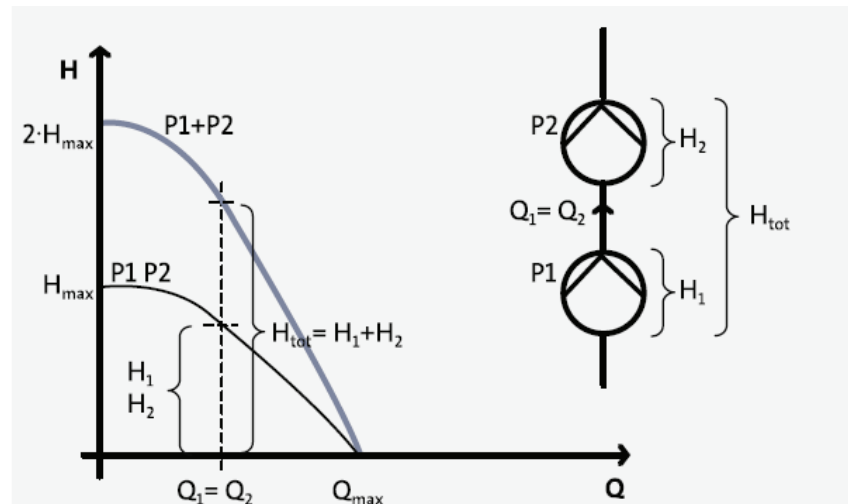


Figura 1.27. Bombas Conectadas en Serie

Si ahora se superpone la curva de sistema, se tiene que si sólo opera la bomba 1, el sistema operará en el punto A a la presión y caudal indicados por la Figura 1.28. Si se conecta la otra bomba, el sistema operará en el punto B.

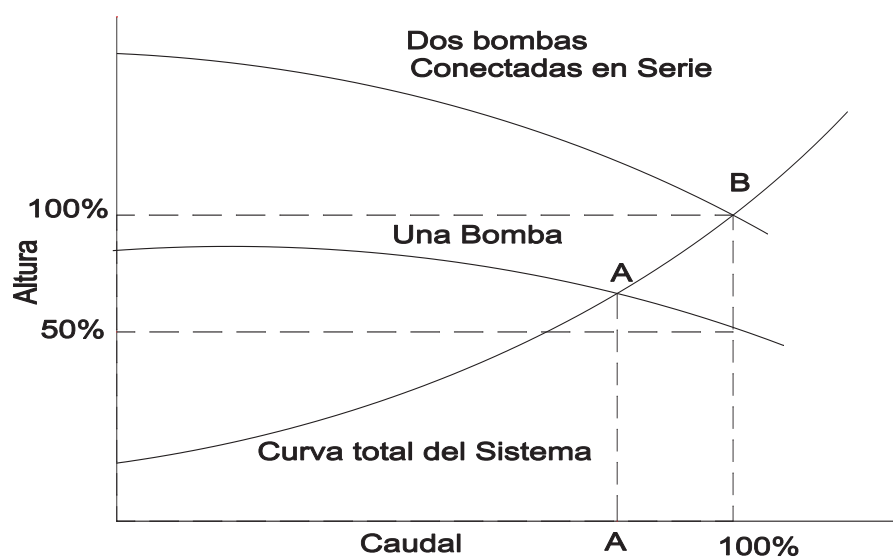


Figura 1.28. Curva de Sistema y de rendimiento en conexión en serie

Sin embargo, este tipo de respuesta sería la esperada de tener 2 bombas de iguales características conectadas en serie. En caso de que las bombas fueren de tamaños diferentes, existen puntos operativos donde sólo una de ellas proporciona caudal al sistema.

1.5.2 CONFIGURACION EN PARALELO:

La conexión de bombas en paralelo es un método de regulación de caudal eficiente, generalmente utilizado en sistemas de alta carga estática, cuando el caudal requerido por el sistema es mayor al caudal que provee una sola bomba, o cuando los requisitos de caudal son variables. El método generalmente consiste en conectar varias bombas auxiliares en paralelo para suplir la demanda. En la Figura 1.29 se puede observar la configuración en paralelo de manera esquemática y la respuesta QH combinada.

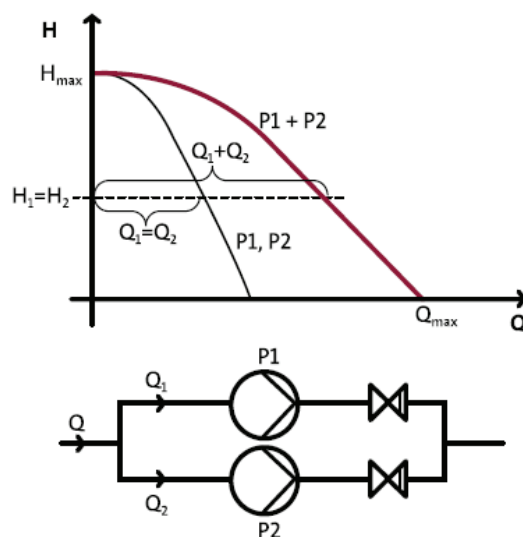


Figura 1.29. Bombas en Paralelo⁹

De la Figura 1.29 se puede observar también que la salida de cada bomba se conecta una válvula de retención para evitar un reflujo de agua.

⁹ GRUNDFOS, "Manual de Bombeo de la Industria", Grundfos 2004, página 102.

Normalmente las bombas instaladas en paralelo son de similares características. En este caso, la curva de rendimiento total del sistema de bombas en paralelo se obtiene sumando los caudales individuales de cada bomba para el mismo valor de altura. De ahí que a este tipo de conexión de bombas se le conoce como de *flujo* aditivo. En la Figura 1.30 se puede ver la curva típica obtenida al poner en paralelo 2 bombas.

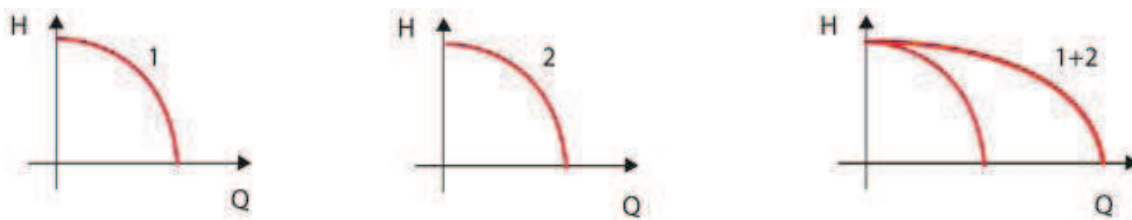


Figura 1.30. Curvas QH en paralelo¹⁰

En este tipo de arreglo, todas las bombas trabajan a la misma presión, altura o cabeza, donde la curva QH combinada se interseca con la curva del sistema. Por ejemplo, en la Figura 1.31, se puede observar una curva de sistema con carga estática y de fricción.

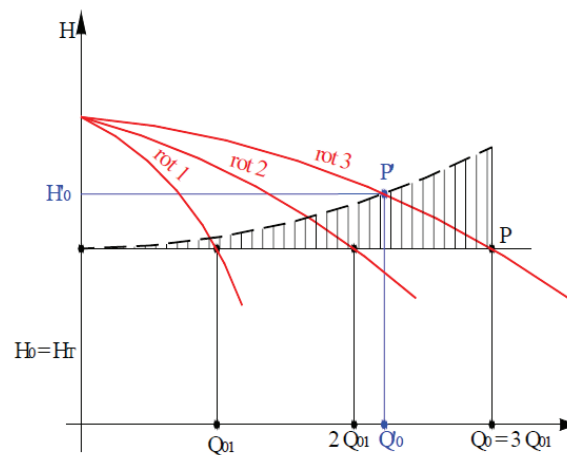


Figura 1.31. Curva QH en paralelo y curva de sistema¹¹

¹⁰http://www.cbs.grundfos.com/CBS_Master/lexica/images/image_files/Pumps_in_parallel.jpg?__scale=w:331,h:123,t:1,c:transparent

¹¹ <http://escuelas.fi.uba.ar/iis/BOMBAS%20Seleccion%20Fina.pdf>

Si la carga estática es predominante en el sistema, entonces el caudal, proporcionado por el sistema de bombas en paralelo es proporcional al número de bombas conectadas (Punto P). No obstante, si en el sistema existen pérdidas dinámicas (p.ej. fricción), entonces el caudal proporcionado por las bombas en paralelo es menor (Punto P').

En un sistema de bombas en paralelo, debe asegurarse que cuando trabaje una sola bomba, su curva se encuentre en un punto operativo que asegure la suficiente altura de aspiración o NPSH.

Variación de velocidad en un sistema de bombas en paralelo:

Cuando se dispone de bombas conectadas en paralelo y controladas por variadores de frecuencia en un cabezal o header común, el comportamiento del sistema es el mismo que operar una bomba en un sistema de sólo carga estática.

Generalmente las demás bombas se acoplan y desacoplan del sistema. La primera bomba en funcionar presuriza el sistema. Las bombas adicionales que se conecten al sistema tendrán que bombear en un sistema ya presurizado. Por esta razón, para que las bombas auxiliares puedan generar flujo en el sistema deberán primero vencer la presión actual del sistema. Normalmente se acepta como regla que todas las bombas sean idénticas y se manejen a una velocidad idéntica. No se recomienda acoplar una bomba con velocidad fija en paralelo con una bomba con regulación de velocidad, ya que puede producir que una de las bombas no genere flujo. En Figura 1.32 se muestra las curvas QH y de sistema para una configuración en paralelo de 3 bombas.

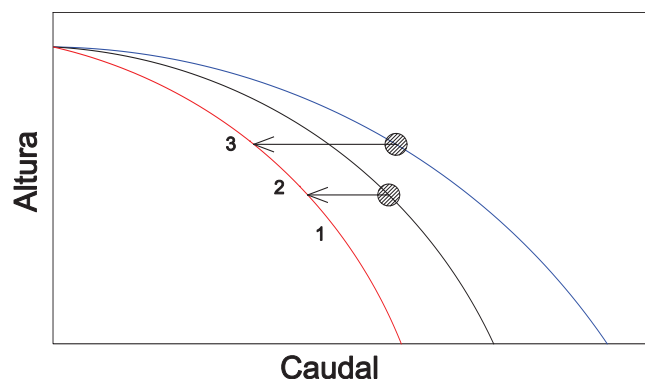


Figura 1.32. Bombeo en Paralelo

1.6 CONTROL DE PRESIÓN CONSTANTE

Son sistemas en los que se requiere mantener la presión del sistema constante independientemente de la demanda de caudal originada por el usuario. Como la demanda de agua es variable, las características del sistema variarán en función del caudal requerido.

Estos sistemas están formados por una bomba de velocidad controlada por medio de un variador de frecuencia (VFD) con un algoritmo de control Proporcional – integral. El sistema de control mide la presión real suministrada (p_1) mediante un transmisor de presión (PT). Este valor es retroalimentado al variador que compara el valor medido con el valor de consigna de presión (p_{set}) configurado.

Si la presión real es superior al valor establecido, el sistema de control reduce la velocidad y el rendimiento de la bomba. De igual manera si la presión real es menor, la velocidad de la bomba será incrementada. La instalación de la bomba garantiza que la presión de suministro será constante en el rango de caudales entre 0 y Q_{max} , como se puede ver en la Figura 1.33.

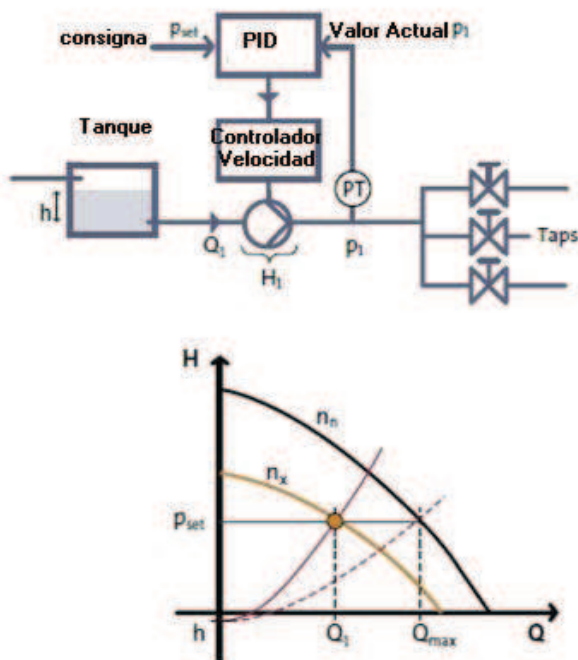


Figura 1.33. Sistema de presión constante

1.7 PROYECTO SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN CONSTANTE PARA LA PASTEURIZADORA QUITO

El presente proyecto nace de la necesidad de la Pasteurizadora Quito de incrementar su capacidad de producción, instalando una máquina Pasteurizadora UHT y una máquina Homogenizadora de Leche. Para el funcionamiento de ambas máquinas es prioridad el consumo de agua. Así por ejemplo, la máquina homogenizadora utiliza un caudal aproximado de 14000 l/h. De igual manera, la máquina de ultra – pasteurización utiliza vapor a temperaturas muy elevadas (entre 135 – 140°C) para la destrucción de micro organismos en la leche.

Por tanto, es necesario instalar un sistema de bombeo a presión constante para el uso de las máquinas antes mencionadas. Para esto, la Pasteurizadora seleccionó y dimensionó las bombas a utilizar, así como instaló el sistema de tuberías. Debido a que el sistema debe disponer de presión constante de agua, se diseña un tablero de control con 2 variadores de frecuencia, uno para cada bomba, un transmisor de presión y un PLC para el funcionamiento coordinado de todo el sistema. Adicional a estos equipos, el tablero dispone de equipos de protección indispensables para el buen funcionamiento eléctrico del mismo.

Para mantener la presión constante se utiliza el regulador PID integrado en los variadores instalados, de forma que cada variador está constantemente modificando su velocidad para mantener la presión constante del sistema. El PLC, coordina de manera jerárquica el funcionamiento alternado de las bombas, permitiendo que ambas trabajen en los momentos de alta demanda.

CAPÍTULO 2 IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE

2.1 REQUERIMIENTOS OPERATIVOS DEL SISTEMA

Con el fin de asegurar presión constante de agua para la máquina de UHT y homogenizadora, se indica a continuación los requerimientos exigidos para la operación del sistema:

1. Mantener la presión de operación constante.
2. Uso alternado de las bombas durante el proceso de producción. Cada bomba opera semanalmente como bomba líder, quedando la otra bomba como reserva.
3. En caso de que el sistema sufra de una alta demanda y por tanto se detecte un decremento en la presión del sistema, se utiliza la bomba de respaldo.
4. Monitoreo de presión del sistema. Esto es, interfaz en la que el operador puede visualizar digitalmente el valor de presión actual del sistema.
5. En caso de que una bomba deje de operar por falla, la otra bomba debe reemplazarla inmediatamente.
6. Prevenir el funcionamiento en seco de las bombas. Para este fin se utiliza un equipo de Grundfos llamado CR Liqtec, que previene la ejecución en seco de la bomba mediante un sensor que se integra en el cabezal de la misma. También se dispone de flotadores para detectar el nivel mínimo de líquido en la cisterna y un monitor de prevención de bombeo en seco instalado en cada bomba.
7. Prevenir el calentamiento excesivo de la bomba.

La Pasteurizadora Quito realizó la selección y dimensionamiento mecánico de las bombas así como de las tuberías, válvulas y accesorios para el transporte del líquido.

2.2 ARQUITECTURA DE LA SOLUCIÓN

Para cumplir con los objetivos planteados, el sistema instalado en la Pasteurizadora Quito consta de 2 bombas de 7.5 kW @ 220 Vac instaladas en paralelo, cada una accionada con un variador de frecuencia (VFD) adecuadamente dimensionado. La presión del sistema se retroalimenta a través de un transmisor de presión instalado en el manifold de la tubería, cuya señal está conectada a los variadores y al PLC. Las señales de nivel de cisterna y nivel de líquido en bomba, son retroalimentadas también al sistema de control.

En la Figura 2.1 se puede apreciar un esquema P&ID de la solución implementada.

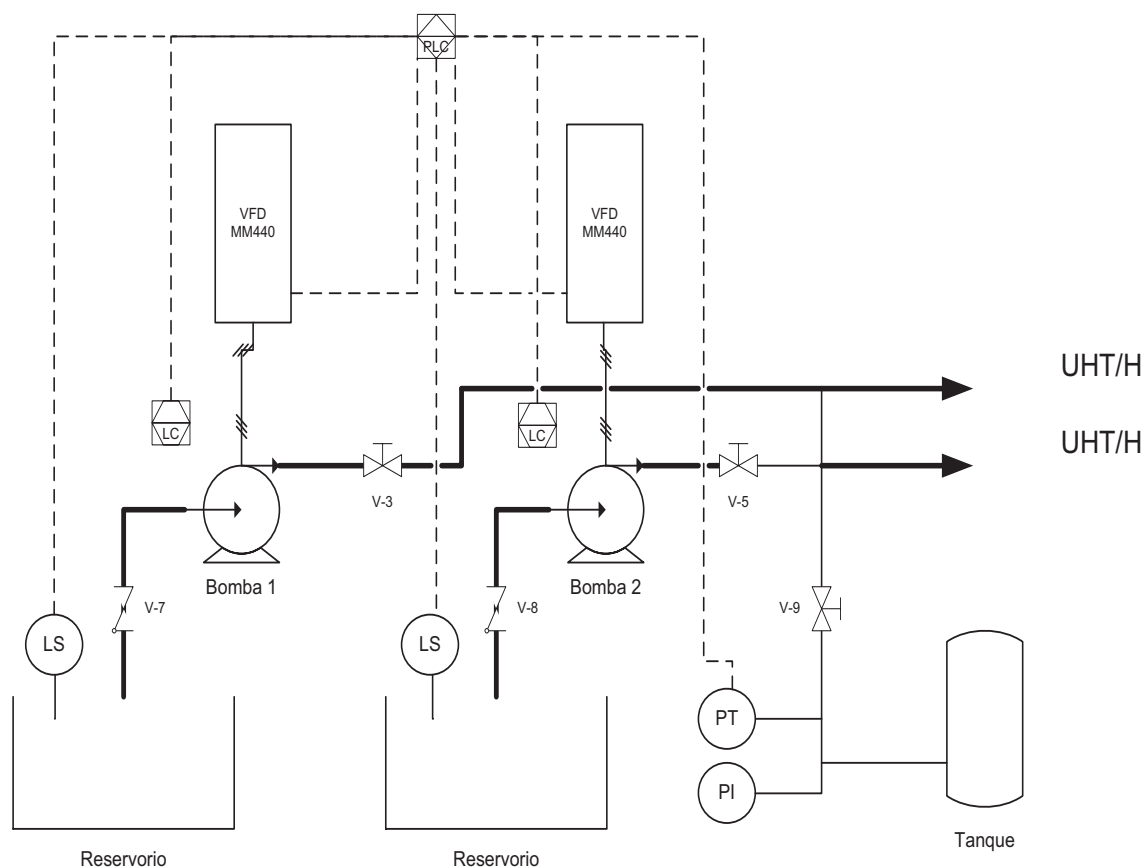


Figura 2.1 Esquema de la Solución

A continuación se realiza el análisis de la solución propuesta para los requerimientos del cliente.

2.2.1 ANALISIS DE LA INSTALACION MECÁNICA

La curva de sistema de la Pasteurizadora Quito se puede considerar como una curva que exige una presión de trabajo constante para cualquier caudal; ya que las pérdidas por fricción, debidas en su mayoría a la distancia que tiene que recorrer el líquido, se estiman despreciables.

El requerimiento del cliente es disponer de una presión constante de agua independientemente del caudal para suplir las demandas del líquido por las nuevas máquinas de UHT. Por esta razón disponen de otra bomba en paralelo para poder incrementar las necesidades de caudal del sistema a la misma presión.

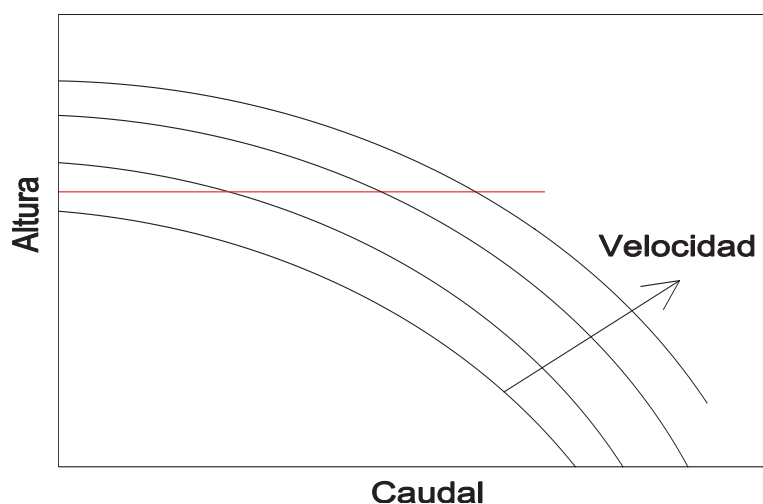


Figura 2.2 Sistema de Presión Constante

En la Figura 2.2 se puede observar el efecto de la variación de velocidad en un sistema de presión constante. Se puede concluir que la velocidad de la bomba no necesariamente tiene que ser 0. Por tanto, las bombas pueden disponer de un rango de velocidades de operación. En este tipo de sistemas, la variación de la velocidad afecta el rendimiento de la bomba.

Adicionalmente, debido a que la bomba auxiliar ingresa a una línea presurizada, ésta debe proveer la presión actual del sistema antes de poder

proveer de flujo al mismo. A su vez, una vez compensada la deficiencia de presión es necesario que la bomba deje de trabajar, ya que de continuar funcionando, empezará a calentar el líquido pudiendo generar cavitación.

2.3 CARACTERÍSTICAS Y SELECCIÓN DE EQUIPOS

2.3.1 BOMBAS CENTRÍFUGAS:

La determinación de las bombas adecuadas para la aplicación depende del tipo de sistema en el que trabajarán. Las mismas que se resumen a continuación:

1. Sistema con carga estática predominante. Las pérdidas por fricción se consideran del 3%.
2. Se conoce que la máquina Homogenizadora instalada requiere un flujo aproximado de $14\text{m}^3/\text{h}^{12}$.
3. La presión debe mantenerse constante independientemente de los requerimientos de flujo variables del proceso. Esto asegura la circulación de agua en el sistema.
4. Control de demanda en paralelo. Si la presión disminuye en más del 7%, será porque los requerimientos de caudal se incrementan más allá de lo que puede suplir una sola bomba. Para compensar esta situación, la otra bomba se conecta en paralelo, con lo cual se incrementa la capacidad de flujo para la misma presión y la robustez del sistema.

¹² Información respecto a la máquina Homogenizadora está disponible en: www.fbfitalia.it

2.3.1.1 Punto de operación del sistema:

La Figura 2.3 indica las curvas características de las bombas instaladas. En la parte superior de la figura están las curvas de QH y rendimiento, mientras que debajo de ellas están representadas las curvas de Potencia y NPSH. Se puede notar que el punto de mejor eficiencia (BEP) se obtiene para el caudal nominal de $20.5 \text{ m}^3/\text{h}$, indicado en el punto B.

De igual manera, a partir del punto B se puede establecer que la bomba trabaja a la altura nominal de 81.1 m (Punto A).

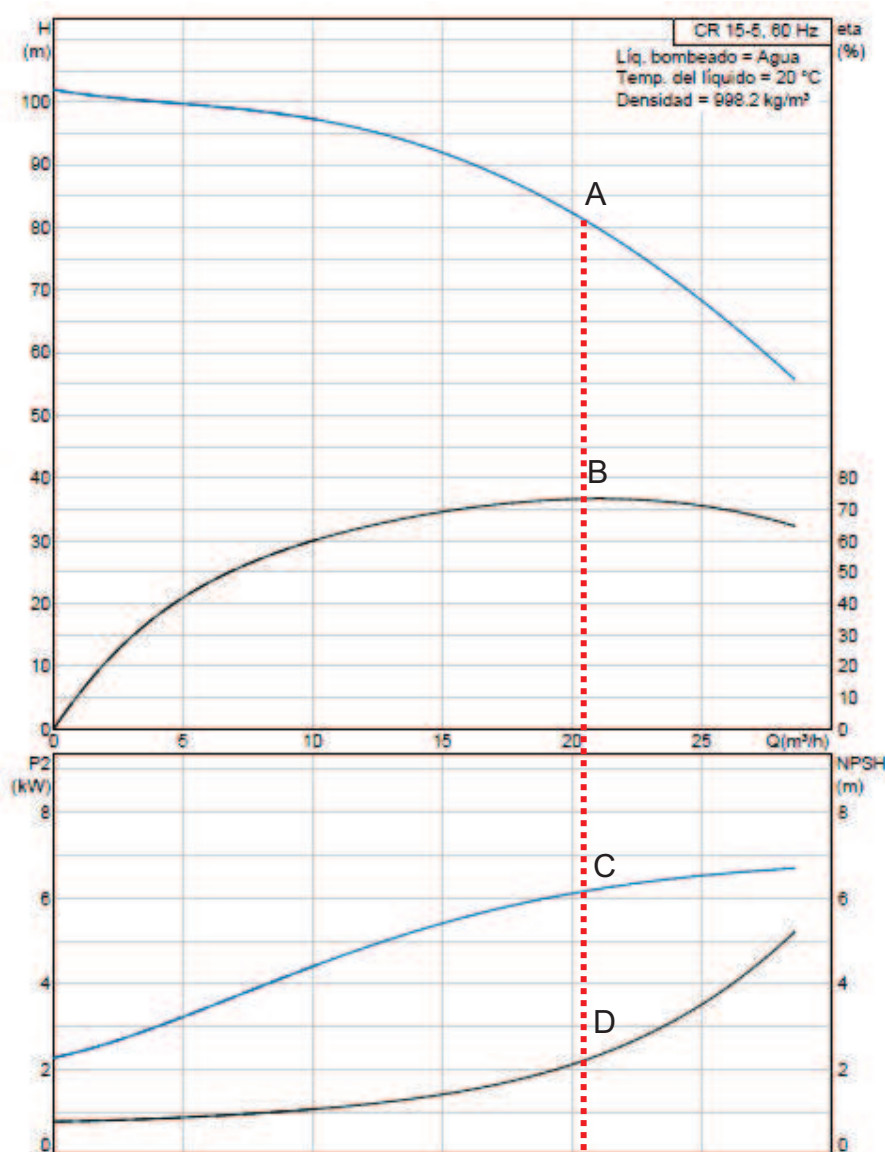


Figura 2.3. Curvas Características de las bombas instaladas.

Para determinar la presión del sistema se usa la Ec. 1.10. De acuerdo con estas relaciones, la presión esperada en el sistema para trabajar en valores nominales es aproximadamente: 7.95 Bar ó 115.39 PSI.

Adicionalmente, el personal mecánico de la Pasteurizadora ha estimado las pérdidas de fricción en un 3%. Considerando este valor se puede considerar una presión de trabajo aproximada de 120 psi.

2.3.1.2 Características de las bombas instaladas:

La Pasteurizadora Quito seleccionó e instaló 2 bombas centrífugas multicelulares de montaje vertical. Este tipo de bomba tiene la característica de usar varias células acopladas en serie que le permiten a la bomba ser utilizada en instalaciones que requieren una gran altura con respecto al caudal.

En la Figura 2.4 se puede ver un esquema representativo de una bomba multicelular de montaje vertical.

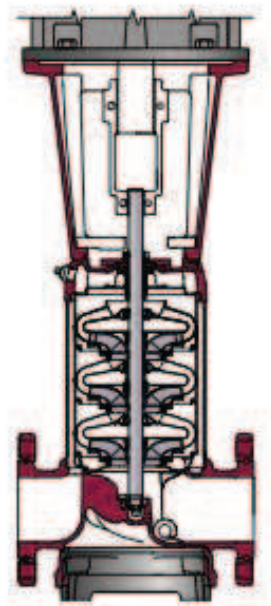


Figura 2.4. Bomba Multicelular Vertical

Las características principales de las bombas instaladas se resumen en la siguiente tabla:

Tipo de Bomba	Centrífuga vertical, no autocebante, multicelular, en línea para la instalación de tuberías o montaje en una cimentación	
Código	CR15-5-A-F-A-E-HQQE/96503822	
Líquido	Agua	-20..120°C
Altura Nominal	81,1	m
Altura Máxima	102	m
Caudal Nominal	20,5	m ³ /h
Velocidad nominal	3490	rpm
Frecuencia de alimentación	60	Hz
Tensión nominal	220-277	3xVac
Corriente Nominal	24,6-20,8	A
Intensidad de arranque	680% - 1050%	
Potencia nominal	7,5	kW

Tabla 2.1. Características de las bombas instaladas

Las bombas instaladas se pueden apreciar en la Figura 2.5:



Figura 2.5. Bombas instaladas

2.3.2 VARIADORES DE FRECUENCIA:

2.3.2.1 Principio de funcionamiento:

Un variador de frecuencia, desde el punto de vista de potencia, es un convertidor de energía AC/AC para el control de torque y/o velocidad de un motor asincrónico. Desde el punto de vista de control, integra diferentes funcionalidades tales como: diferentes tipos de control, opciones de frenado¹³, funciones de vigilancia del circuito intermedio y del motor, así como también la capacidad de integrarse a redes industriales mediante buses de campo (Profibus, Profinet, Modbus, etc.).

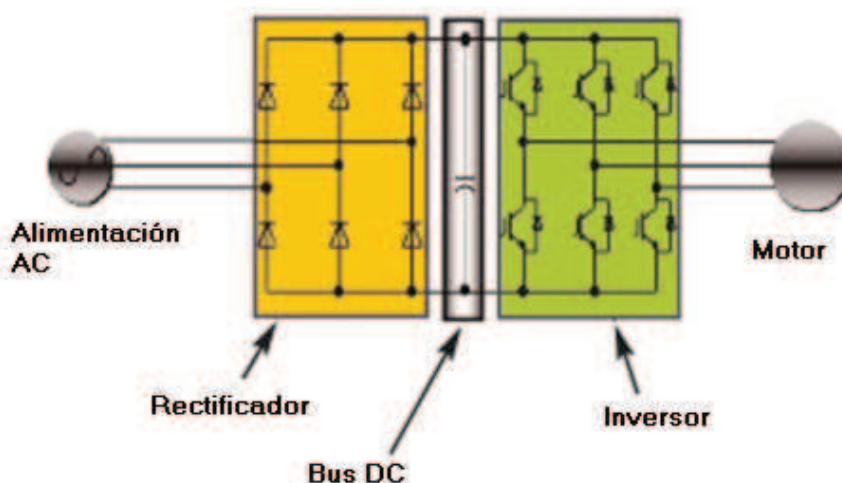


Figura 2.6. Estructura de Potencia de un VFD

El convertidor consta principalmente de las siguientes etapas:

1. **Etapas de rectificación:** conversión de AC/DC normalmente utilizando 6 diodos rectificadores. Sin embargo, se pueden utilizar varias etapas de rectificación con lo que se dispone de convertidores de 6, 12, 18 o 24 pulsos. El sistema de rectificación también puede ser realizado utilizando tiristores controlados.

¹³ Los nuevos modelos de variadores de frecuencia se construyen para habilitar frenado regenerativo.

2. **Bus de DC:** provee de un voltaje constante de DC a la siguiente etapa de inversión. Se caracteriza por disponer de capacitores que permiten acumular la energía de la etapa previa (rectificación). Para evitar que las altas corrientes de carga (inrush current), que se generan al conectar el capacitor directamente con la fuente rectificadora, y que podrían disparar las protecciones como fusibles o interruptores termomagnéticos, se dispone de un circuito de pre-carga con resistencias. Otras opciones para minimizar las corrientes de inrush en esta etapa consisten en utilizar rectificadores controlados.

3. **Etapa de inversión:** consiste en un inversor trifásico conformado por un arreglo de 6 semiconductores de alta potencia (IGBTs, GTO, Mosfet, BJT) con diodos de corrida libre (free wheeling¹⁴). Los semiconductores son conmutados a frecuencias en el orden de los kHz (generalmente de 2 a 16 kHz), en conducción a 180° o 120° según un algoritmo de modulación por ancho de pulso sinusoidal. Este tipo de modulación permite disminuir considerablemente las pérdidas armónicas en el motor. Sin embargo, como resultado de las altas frecuencias de conmutación y la capacitancia propia del cable motor – variador, se generan corrientes de fuga que producen pérdidas en el convertidor. Si el cable es más largo, el efecto se amplifica, haciendo necesario el uso de reactancias de salida para eliminar el efecto capacitivo parásito del cable. Normalmente, los fabricantes indican la longitud máxima a la que está diseñado el inversor. Si bien los variadores al usar una fuente de alimentación trifásica de AC eliminan los armónicos de tercer orden, las interferencias electromagnéticas generadas por la alta frecuencia de conmutación en el cable del motor pueden afectar otros equipos cercanos como los PLCs. Por esta razón, se recomienda utilizar cables apantallados entre el convertidor y el motor junto con una práctica de separar el cableado de potencia de los variadores de las señales de control e instrumentación. La norma IEEE-519 pone límites a la

¹⁴ Diodo de corrida libre o diodo volante. Se conecta en paralelo a la carga inductiva para evitar sobrevoltajes y suavizar la onda de corriente.

distorsión de voltaje y corriente. Normalmente se acepta que la distorsión de estas variables sea menor al 5%.

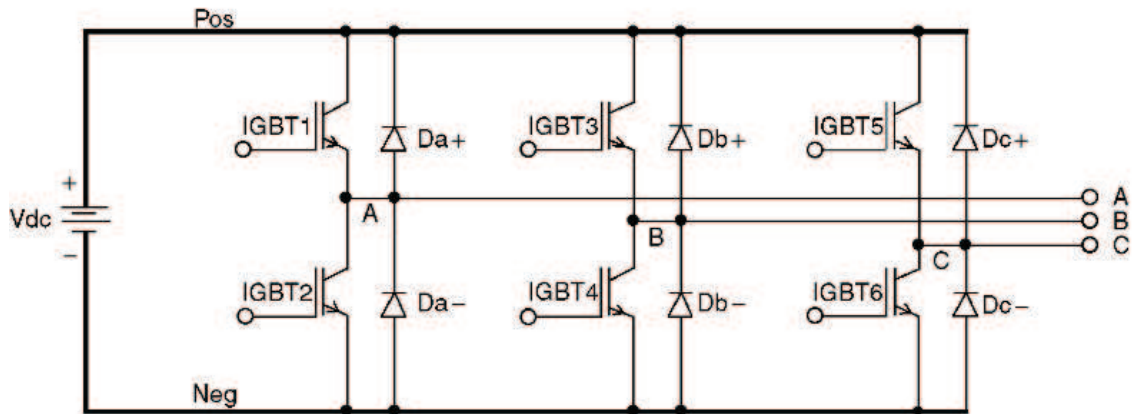


Figura 2.7. Inversor CC/CA de 6 pulsos¹⁵

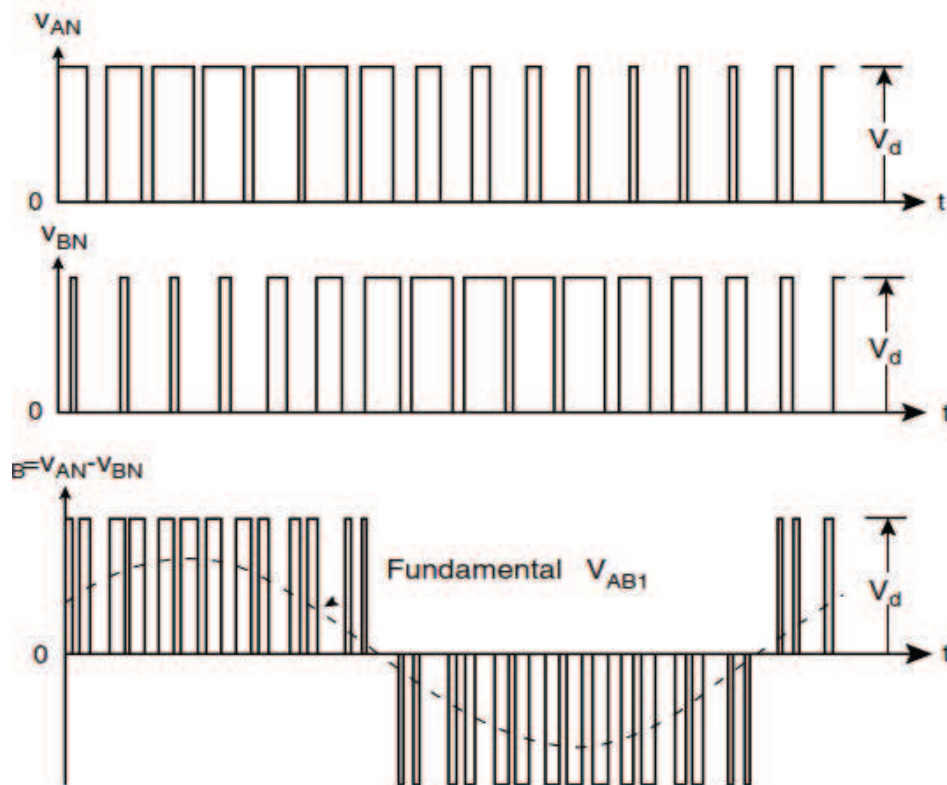


Figura 2.8. Forma de onda del voltaje de salida del convertidor DC/AC trifásico con modulación sinusoidal¹⁶.

¹⁵ INDUSTRIAL ELECTRONICS SERIES, "The Power Electronics Handbook", CRC Press 2002, USA, Figura 5.2.

¹⁶ INDUSTRIAL ELECTRONICS SERIES, "The Power Electronics Handbook", CRC Press 2002, USA. Figura 5.18.

En la Figura 2.8 puede observarse la forma de onda de voltaje de salida del convertidor, que tiene como pico superior e inferior, el voltaje rectificado V_D .

Este voltaje, si bien es aplicado durante intervalos de tiempo muy cortos, y si bien se obtiene un VRMS similar al voltaje de alimentación trifásico, el valor pico es superior al voltaje nominal, por lo que fatiga el aislamiento del motor. Para evitar este inconveniente se recomienda utilizar motores con aislamiento clase F, que es el mejor aislamiento disponible para el trabajo con motores de inducción.

2.3.2.2 Dimensionamiento y selección

El dimensionamiento de un variador de frecuencia se realiza en función de los siguientes parámetros:

- a) **La corriente nominal del motor a la tensión de trabajo.** La potencia es en general un parámetro de guía. Las bombas instaladas son de 7.5 kW.
- b) **El tipo de tensión instalado en el sistema y su valor.** Debe existir la alimentación de AC suficiente para cargar al BUS de DC de la etapa inversora. La Pasteurizadora Quito utiliza 220 Vac.
- c) **El rango de velocidad de operación del sistema.** Si el sistema exige operaciones a más de 60 Hz, el torque que se puede proveer al sistema se verá disminuido, debido a que la tensión no aumenta; por tanto operar en esta condición implica operar a una potencia menor. De igual manera, si la velocidad de operación es muy baja (menos del 30%), el motor puede ser recalentado por insuficiente refrigeración. Las bombas operaran en el rango completo de velocidad de 0 a 60 Hz.
- d) **La altura, temperatura ambiente de operación y humedad del ambiente.** Todos los equipos sufren de una reducción en la potencia en función de la altura de la instalación. Para el proyecto presente, se considera que la instalación se ha realizado en Quito a 2800 msnm.

Adicionalmente, se debe considerar el ambiente en el que trabaja el variador. Normalmente, los variadores de frecuencia vendidos en el país son de grado IP20, por tanto deben estar protegidos del agua o de la condensación de la misma y de la exposición al polvo.

- e) **Desempeño bajo sobrecarga.** Normalmente, los fabricantes especifican el valor de corriente máximo que puede proveer el equipo bajo sobrecarga, especificando la duración y repetición del evento.
- f) **El tipo de frenado del sistema:** frenado rápido, regenerativo, etc. Si el frenado de la carga es muy rápido se puede requerir de resistencias de frenado o variadores regenerativos que disipen la energía devuelta. En este caso, no aplica frenar al sistema, ya que se está trabajando con bombas.
- g) **Longitud del cableado de salida del variador.** Si las distancias son muy largas, y debido a que la frecuencia de conmutación de los IGBTs de los variadores es de al menos 4kHz, se generan efectos capacitivos en las líneas de conexión variador – motor. Este efecto se ve incrementado por la distancia del cableado. Para evitar este tipo de problema, cuando la distancia es mayor a 50 m. en cables apantallados o 100 m. en cables no apantallados, se requiere la instalación de reactancias de salida. La distancia entre el tablero de control y las bombas es menor a 100 mts. y el cable utilizado no es apantallado, por lo que no se requiere reactancias de salida.
- h) **El tipo de control o regulación** adecuado para la aplicación:
- Control V/F
 - Control V/F parabólico (bombas, ventiladores)
 - Control V/F con compensación de flujo o FCC
 - Curva programable V/F
 - Control vectorial con encoder
 - Control Vectorial sin encoder

En este caso se utiliza V/F parabólico ya que la carga de los motores son bombas centrífugas.

Características eléctricas de las bombas:

Las características eléctricas del motor de la bomba son:

Características eléctricas		
Motor trifásico	MG132SB2-38FF265-H3	
Potencia:	7,5	kW
Frecuencia:	60	Hz
Conexión Delta		
Voltaje:	220 -277	Vac
Corriente:	24,6 - 20,8	A
Corriente máxima:	27,0 - 22,8	A
Conexión Y		
Voltaje:	380-480	Vac
Corriente:	14,2-12,0	A
Corriente máxima:	15,6 -13,2	A
COSPHI	0,9-0,82	
EFICIENCIA	IE2	IE3
	89,50%	90,20%

Tabla 2.2. Características eléctricas de las bombas

La tensión de operación en la Pasteurizadora es de 220 Vac, por tanto las bombas se conectan en Delta. En este tipo de conexión las bombas consumen nominalmente 24.6 A.

El variador debe ser capaz de suministrar la cantidad suficiente de corriente que requiere la aplicación en ejecución normal. Para esto se debe considerar la reducción en suministro de corriente debido a la altura y temperatura; así como los requerimientos de refrigeración del variador a seleccionar.

Temperatura:

Dependiendo de la temperatura de operación, existe disminución en la corriente que el variador puede proporcionar al motor. El fabricante provee la siguiente curva, mostrada en la Figura 2.9, como guía:

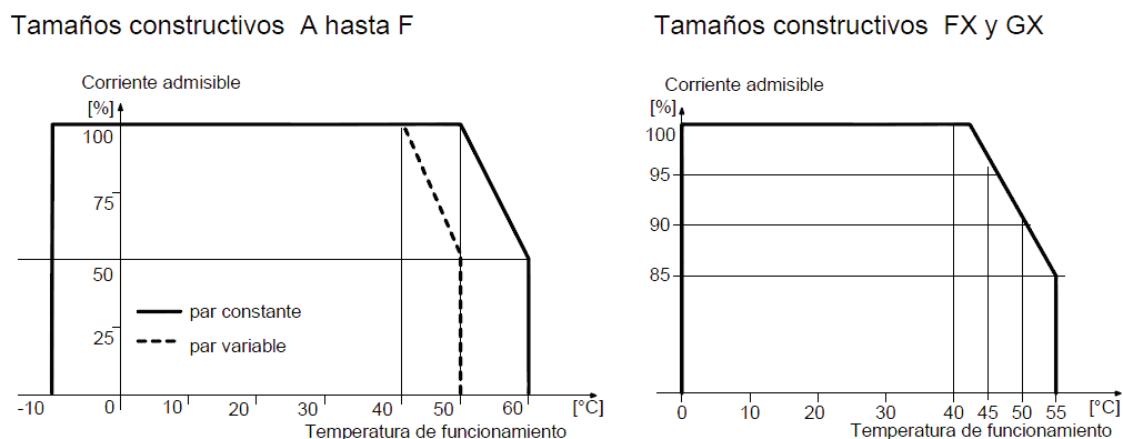


Figura 2.9. Corriente de salida en función de la temperatura

El fabricante presenta dos curvas distintas en función del tamaño de los equipos. Para una potencia de 7.5 kW, el variador tiene un tamaño tipo D. Adicionalmente la curva es diferente si el tipo de carga es de torque variable (bombas) o de torque constante (p.ej. elevadores).

De la Figura 2.9, puede observarse que la corriente empieza a disminuir a partir de los 40°C para cargas de torque variable y a partir de los 50°C para cargas de torque constante.

En el caso particular de la Pasteurizadora Quito las temperaturas de operación no superan los 30°C. Por tanto, no se requiere realizar un sobredimensionamiento del variador debido a la temperatura.

Sin embargo, de acuerdo a las especificaciones técnicas del equipo, un variador utiliza dos medios para evacuar el calor generado en las etapas de potencia a saber: a) mediante disipador, b) mediante circulación aire¹⁷.

¹⁷ Existen otros equipos que debido a su potencia o su arquitectura inclusive pueden utilizar circulación de agua para su refrigeración

Altitud:

En general a partir de los 1000 msnm, se produce la disminución de la capacidad de corriente. Al igual que con la temperatura, el fabricante indica mediante una curva corriente vs altura la disminución esperada en su equipo, como se indica en la Figura 2.10.

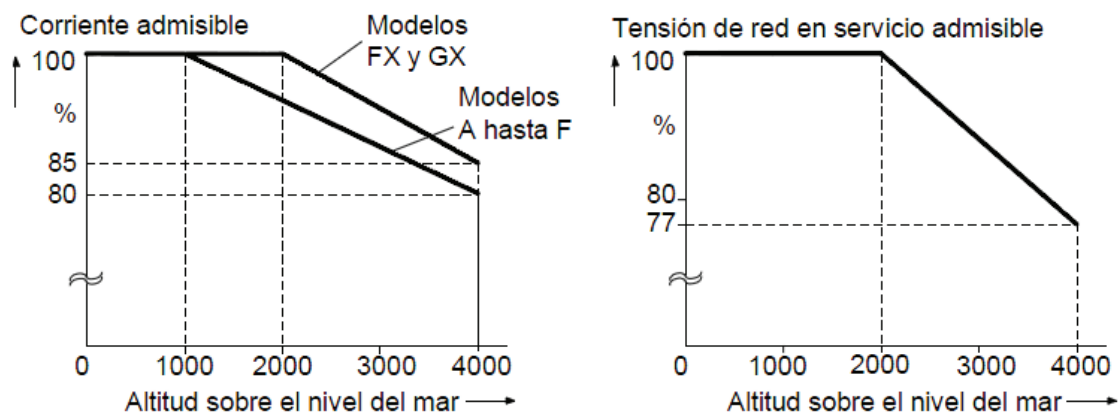


Figura 2.10. Corriente en función de la altura sobre el nivel del mar

La altura de la ciudad de Quito se estima en 2800 msnm en promedio, por lo que se puede esperar una reducción mayor al 85% en la capacidad de corriente.

Por tanto, si el variador entrega 24.6 A a nivel del mar, a la altura de Quito sólo podrá entregar, 20.91 A. De ahí que se requiere un variador cuya corriente de salida sea al menos de: 28.94 A.

En la Tabla 2.3, proporcionada por el fabricante, se puede apreciar las características de algunos variadores de la familia Micromaster 440 de Siemens, clasificados en función de la potencia motor esperada:

Referencia	6SE6440-	2UC24- 0CA1	2UC25- 5CA1	2UC27- 5DA1	2UC31- 1DA1	2UC31- 5DA1	2UC31- 8EA1	2UC32- 2EA1	2UC33- 0FA1	2UC33- 7FA1	2UC34- 5FA1
Potencia nominal (CT)	[kW] [hp]	4,0 5,0	5,5 7,5	7,5 10,0	11,0 15,0	15,0 20,0	18,5 25,0	22,0 30,0	30,0 40,0	37,0 50,0	45,0 60,0
Potencia de salida	[kVA]	7,7	9,6	12,3	18,4	23,7	29,8	35,1	45,6	57,0	67,5
Corr. de entrada CT 1)	[A]	19,7	26,5	34,2	38,0	50,0	62,0	71,0	96,0	114,0	135,0
Corr. de salida CT.	[A]	17,5	22,0	28,0	42,0	54,0	68,0	80,0	104,0	130,0	154,0
Corr. de entrada VT 1)	[A]	28,3	34,2	38,0	50,0	62,0	71,0	96,0	114,0	135,0	164,0
Corr. de salida VT	[A]	22,0	28,0	42,0	54,0	68,0	80,0	104,0	130,0	154,0	178,0
Fusible recomendado	[A]	32	35	50	80	80	100	125	200	200	250
obligatorio para UL	3NA 3NE	3812 +	3814 +	3820 1817-0	3824 1820-0	3824 1820-0	3830 1021-0	3832 1022-0	3140 1225-0	3142 1225-0	3144 1227-0
Sección mínima cable de entrada	[mm ²] [awg]	4,0 12	4,0 12	10,0 8	16,0 6	16,0 6	25,0 3	25,0 3	70,0 2/0	70,0 2/0	95,0 3/0
Sección máxima cable de entrada	[mm ²] [awg]	10,0 8	10,0 8	35,0 2	35,0 2	35,0 2	35,0 2	35,0 2	150,0 300	150,0 300	150,0 300
Sección mínima cable de salida	[mm ²] [awg]	4,0 12	4,0 12	10,0 8	16,0 6	16,0 6	25,0 3	25,0 3	50,0 1/0	70,0 2/0	95,0 3/0
Sección máxima cable de salida	[mm ²] [awg]	10,0 8	10,0 8	35,0 2	35,0 2	35,0 2	35,0 2	35,0 2	150,0 300	150,0 300	150,0 300
Peso	[kg] [lbs]	5,5 12,1	5,5 12,1	17,0 37,0	16,0 35,0	16,0 35,0	20,0 44,0	20,0 44,0	55,0 121,0	55,0 121,0	55,0 121,0

1) Condiciones marginales: La corriente de entrada en punto nominal es válida para una tensión de cortocircuito de la red $U_s = 2\%$ basada en la potencia nominal del convertidor y una tensión nominal de red de 240 V sin bobina de conmutación de red.

Tabla 2.3. Especificaciones Técnicas de Variadores Micromaster 440

Para los requerimientos de las bombas instaladas en la Pasteurizadora Quito es suficiente trabajar con el variador 6SE6440-2UC27-5DA1. Ya que al ser la carga una bomba, la curva Torque – Velocidad de este tipo de carga es variable. El variador escogido es capaz de proveer 42 A en torque variable, que con la reducción debido a la altura sería 35.7 A. En torque constante, es capaz de proveer 28 A que daría 23.8 A. Por tanto cubre los requerimientos eléctricos de la carga.

Para la protección de los variadores se requiere instalar, como indica la Tabla 2.3, fusibles electrónicos o también llamados ultra-rápidos de 50 A.

2.3.2.3 Características técnicas variador 6se6440-2uc27-5da1:

En la Tabla 2.4 se resumen las características técnicas principales del variador escogido.

	Tipo de variador	Bajo Voltaje	
	Código	6SE6440-2UC27-5DA1	
Datos de entrada	Voltaje de Entrada	200 -240	Vac
	Corriente de entrada		
	Torque constante	33,97	A
	Torque Variable	48,72	A
Datos de salida	Potencia	7,5	kW
	factor de potencia	0,95	
	Eficiencia	96%	
	Sobrecarga	150% por 60s cada 300s	
	Tipo de control	Vector	
		FCC	
		V/F	
Entradas/Salidas	Entradas Digitales	6	
	Salidas Digitales	3	
	Entradas Analógicas	2	
	Salidas Analógicas	2	
Datos Mecánicos	Ancho	275	mm
	Alto	520	mm
	Profundidad	245	mm
	Peso	16	kg
	Framesize	D	
	Grado de Protección	IP20	

Tabla 2.4. Características técnicas de Variador Micromaster 440

A continuación se muestra una fotografía del variador instalado.



Figura 2.11. Variador Micromaster 440 instalado

2.3.2.4 Configuración de hardware:

En Figura 2.12, se indica un diagrama de bloques en el que se aprecia la disposición general de las entradas/salidas digitales y analógicas del variador así como de los bornes de alimentación, bus de DC, resistencia de frenado y salida al motor:

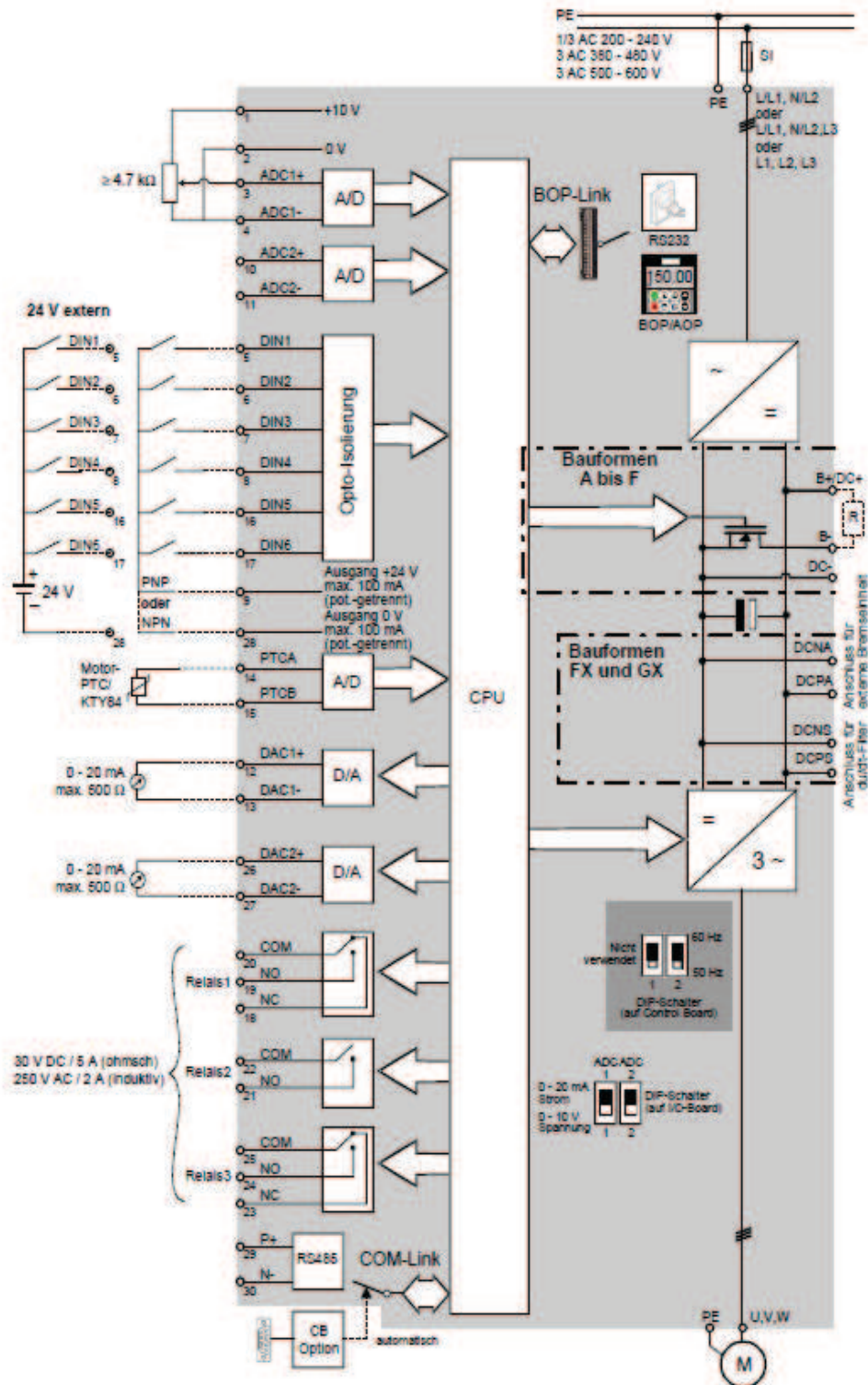


Figura 2.12. Diagrama de Bloques de Variador

2.3.2.4.1 Bornes de Conexión del Variador:

2.3.2.4.1.1 Bornes de Potencia:

El variador seleccionado corresponde al tamaño constructivo tipo D. En la siguiente figura se aprecian los bornes de potencia del variador.

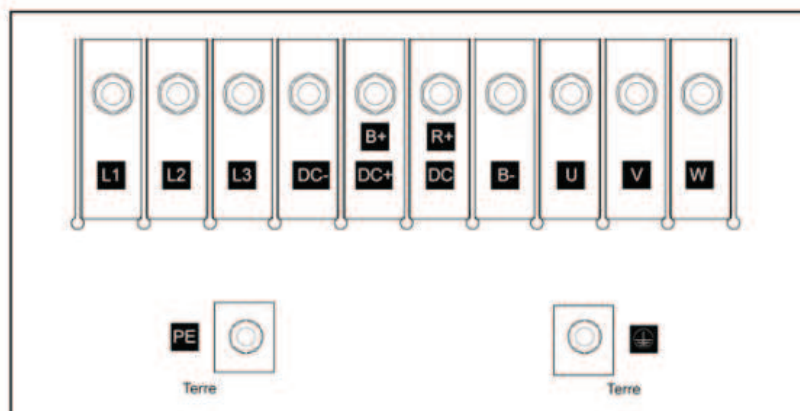


Figura 2.13. Bornes de Potencia del variador

Borne	Función
L1/L2/L3	Alimentación trifásica 220 Vac
U/V/W	Conexión a motor trifásico asincrónico
DC+/DC-	Bus de DC
B+/B-	Conexión a Resistencia de Frenado
PE	Conexión a Tierra

Tabla 2.5. Funciones de los bornes de potencia del variador

2.3.2.4.1.2 Bornes de Control:

En la Tabla 2.6 se puede apreciar el juego de 30 bornes para operaciones de control que dispone el variador. Están resaltados los bornes que han sido conectados para llevar a cabo el proyecto.

Borne	Denominación	Función
1	-	Salida +10 V
2	-	Salida 0 V
3	ADC1+	Entrada analógica 1 (+)
4	ADC1-	Entrada analógica 1 (-)
5	DIN1	Entrada digital 1
6	DIN2	Entrada digital 2
7	DIN3	Entrada digital 3
8	DIN4	Entrada digital 4
9	-	Salida aislada +24 V / máx. 100 mA
10	ADC2+	Entrada analógica 2 (+)
11	ADC2-	Entrada analógica 2 (-)
12	DAC1+	Salida analógica 1 (+)
13	DAC1-	Salida analógica 1 (-)
14	PTCA	Conexión para PTC / KTY84
15	PTCB	Conexión para PTC / KTY84
16	DIN5	Entrada digital 5
17	DIN6	Entrada digital 6
18	DOU1/NC	Salida digital 1 / contacto de reposo
19	DOU1/NO	Salida digital 1 / contacto de trabajo
20	DOU1/COM	Salida digital 1 / conmutador
21	DOU2/NO	Salida digital 2 / contacto de trabajo
22	DOU2/COM	Salida digital 2 / conmutador
23	DOU3/NC	Salida digital 3 / contacto de reposo
24	DOU3/NO	Salida digital 3 / contacto de trabajo
25	DOU3/COM	Salida digital 3 / conmutador
26	DAC2+	Salida analógica 2 (+)
27	DAC2-	Salida analógica 2 (-)
28	-	Salida aislada 0 V / máx. 100 mA
29	P+	Conexión RS485
30	N-	Conexión RS485

Tabla 2.6 Funciones de los Bornes de control

Los bornes 5, 6 y 7 están conectados a las salidas del PLC, I1, I2 e I3, respectivamente. Por su parte los bornes 10 y 11, que corresponden al canal analógico 2, están conectados al transmisor de presión. Las salidas digitales, en los bornes 18 a 20 y 21 a 22 están conectadas a relés auxiliares que controlan el encendido y apagado de las luces piloto de estado.

Físicamente el juego de bornes de Mando se aprecia en el variador como se indica en la Figura 2.14:



Figura 2.14. Bornes de mando

La configuración de las entradas/salidas digitales y analógicas se realiza mediante software. No obstante, en la Tabla 2.7 se indica la disposición general que tendrán para el presente proyecto.

CONFIGURACION ENTRADAS/SALIDAS D/A		
ENTRADA DIGITAL	PIN	FUNCION
DIN1	5	ON/OFF1
DIN3	7	RESET FALLA
SALIDA DIGITAL	PIN	FUNCION
DO1	18/19/20	DRIVE FUNCIONANDO
DO2	21/22	FALLA VARIADOR
ENTRADAS ANALÓGICAS	PIN	FUNCION
ADC1	3/4	RESERVADO
ADC2	10/11	TRANSMISOR DE PRESIÓN

Tabla 2.7. Configuración E/S de mando del variador

En la Figura 2.15 se muestra las conexiones de hardware realizadas en el variador:

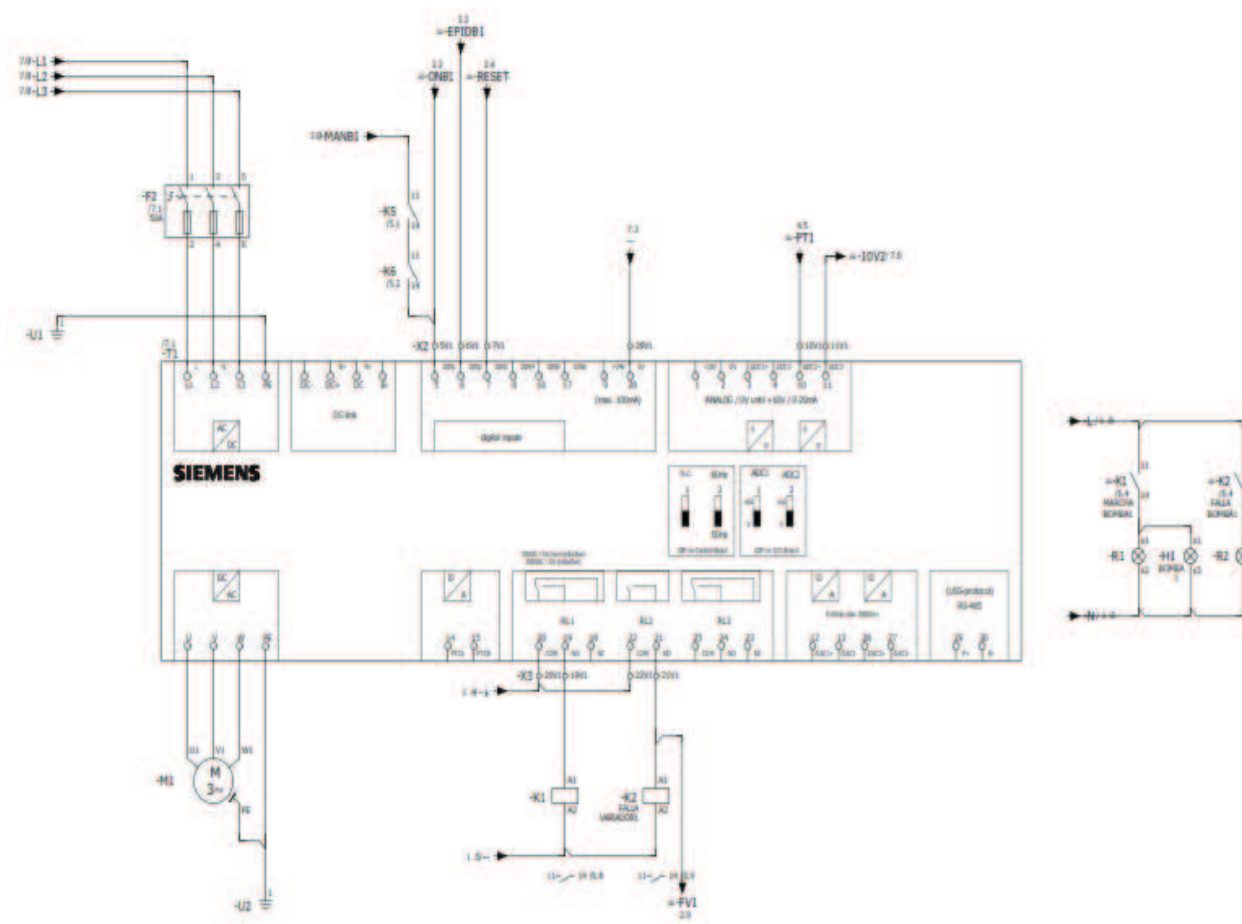


Figura 2.15 Conexiones Variador.

2.3.2.4.1.2.1 Entradas Digitales:

Las entradas digitales del variador permiten implementar funciones de control tales como: encendido/apagado con rampa, frecuencias fijas, incremento de consigna, etc. La función de cada entrada digital se puede especificar de manera libre al programar el equipo.

En la Figura 2.16 se presenta un diagrama de bloques del hardware de las entradas digitales. Éstas se pueden conectar como PNP¹⁸ o NPN, tienen separación galvánica a prueba de cortocircuitos y son leídas por el microcontrolador del variador en un tiempo de ciclo de 2 ms. Todas las entradas digitales en el proyecto han sido configuradas como PNP.

¹⁸ En conexión PNP el 1 lógico se obtiene a un valor de 24 VDC.

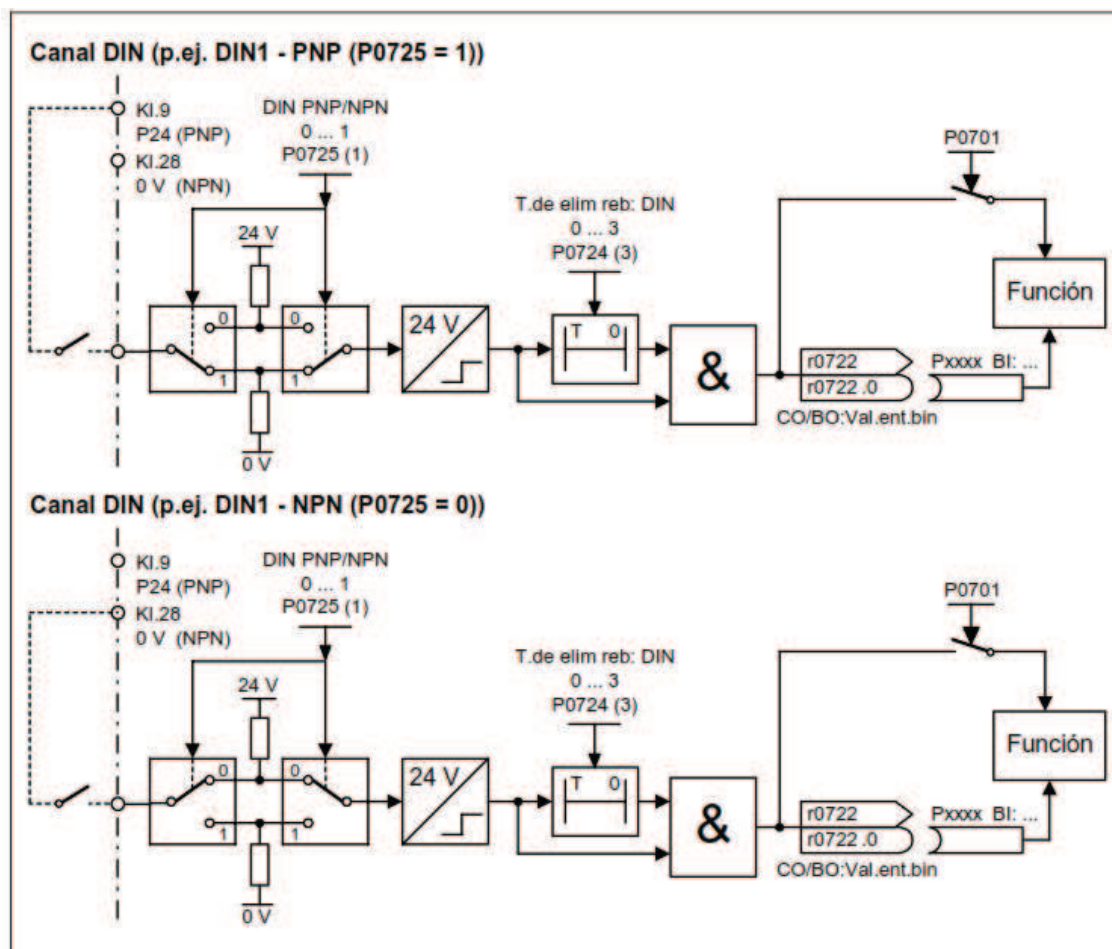


Figura 2.16. Diagrama de bloques de la entrada digital

La Figura 2.16 también indica parámetros generales de configuración de las entradas digitales como los siguientes:

R0722: es un parámetro de lectura que permite leer el estado en el que se encuentran las entradas digitales. R0722.0 corresponde a la primera entrada digital. El enlace entre el parámetro R0722.0 y el P701 permite configurar la función de la entrada digital seleccionada. A este enlace se le conoce como enlace Conector – Binector.

P0725: configura la entrada digital en modo PNP cuando su valor es 1 y en modo NPN cuando su valor es igual a 0. Para el presente proyecto este parámetro tiene el valor de 1.

P0724: permite configurar un retardo en ms para eliminar rebotes en la señal de mando, se dispone de 3 valores que permiten 4 opciones diferentes a saber:

- 0: sin eliminación de rebotes
- 1: 2.5 ms
- 2: 8.2 ms
- 3: 12.3 ms

Este parámetro se ha dejado en su valor por defecto que corresponde a la opción 3, 12.3 ms, de anti-rebote.

P0701 a P0706: permiten configurar a través de una selección de valores la función que será asignada a la entrada digital, correspondiendo numéricamente cada una a su respectiva entrada digital (P701 a la DI1 y P706 a la DI6).

En la Tabla 2.8 se indica las diferentes funciones y sus valores que se pueden programar para las entradas digitales del variador.

Valores de parámetro	Significado
0	Entrada digital deshabilitada
1	ON / OFF1
2	ON+inversión / OFF1
3	OFF2 – parada natural
4	OFF3 – deceleración rápida
9	Acuse de fallo
10	JOG derecha
11	JOG izquierda
12	Inversión
13	Potenciómetro motorizado (MOP) subida (incremento de frecuencia)
14	Potenciómetro motorizado (MOP) bajada (decremento de frecuencia)
15	Consigna fija (selección directa)
16	Consigna fija (selección directa + ON)
17	Consigna fija (código BCD + ON)
25	Activar freno por inyección de corriente continua
29	Fallo externo
33	Deshabilitar consiga frecuencia adicional
99	Habilitar parametrización BICO

Tabla 2.8. Ajustes estándar de una Entrada Digital

Para el proyecto se han programado los valores resaltados de la siguiente manera:

Borne	Entrada Digital	Parámetro	Función	Valor
5	DIN1	P701	On/OFF1	1
6	DIN2	P702	DESHABILITADO	0
7	DIN3	P703	Reset Falla	9

Tabla 2.9. Configuración Entradas Digitales

A continuación se describen las funciones utilizadas:

ON/OFF1: Permite acelerar y desacelerar el motor utilizando los tiempos de aceleración y desaceleración configurados en el drive.

Acuse de fallo: permite resetear fallas que se presenten en la operación del accionamiento motor + variador.

2.3.2.4.1.2.2 Salidas Digitales:

Permiten indicar estados binarios internos del accionamiento. Estos estados se seleccionan mediante la configuración de los parámetros respectivos relacionados con las salidas digitales. El tiempo de ciclo es de 1 ms. Las salidas son tipo relé con tiempos máximo de apertura y cierre estimados de 5/10 ms. La relación tensión corriente es la siguiente:

30 VDC @ 5 A.

250 VAC @ 2 A.

En la Figura 2.17 se indica el diagrama de bloques que describe las características principales de las salidas digitales del variador.

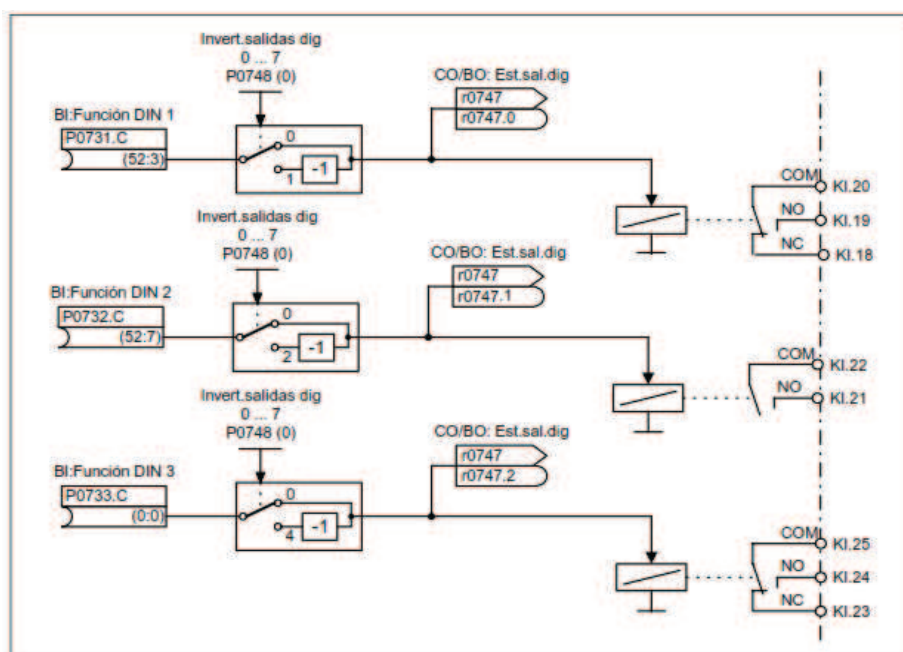


Figura 2.17. Diagrama de Bloques de una salida digital

Los parámetros P0731, P0732 y P0733 permiten configurar la función que desempeña la salida digital. Entre las más comunes se dispone de las siguientes:

Valores de parámetro	Significado
52.0	Listo para encendido
52.1	Listo para servicio
52.2	Accionamiento en marcha
52.3	Fallo activo
52.4	OFF2 activa
52.5	OFF3 activa
52.6	Activación inhibición
52.7	Aviso activo
52.8	Desviación consigna / valor real
52.9	Control por PLC (control PZD)
52.A	Frecuencia máxima alcanzada
52.B	Aviso: limitación intensidad motor
52.C	Freno de mantenimiento del motor (MHB) activo
52.D	Sobrecarga motor
52.E	Dirección funcionamiento motor a la derecha
52.F	Sobrecarga convertidor
53.0	Freno DC activo
53.1	Frecuencia real $f_{act} \geq P2167 (f_{off})$
53.2	Frecuencia real $f_{act} > P1080 (f_{min.})$
53.3	Intensidad real $r0027 \geq P2170$
53.6	Frecuencia real $f_{act} \geq consigna$

Tabla 2.10. Configuraciones estándar de salida digital

El parámetro P0748 permite invertir por software el estado de las salidas digitales permitiendo flexibilidad en el enlace de estas señales hacia otros dispositivos (p.ej. PLC). El parámetro se ha configurado con el valor 1 en el bit 1, para invertir la salida digital 2.

Los valores resaltados corresponden a los valores programados en el variador, los mismos que se resumen en la Tabla 2.11.

Borne	Entrada Digital	Parámetro	Función	Valor
18/19/20	DO1	P731	Drive en Marcha	r52.2
21/22	DO2	P732	Falla activa	r52.3

Tabla 2.11. Configuración de Salidas Digitales

De esta manera la salida digital 1 (DO1) indica al operario que el variador se encuentra en marcha funcionando. La salida digital 2, en cambio indica si existe una falla activa que requiera ser atendida por el operador.

2.3.2.4.1.2.3 Entradas Analógicas:

El variador dispone de 2 entradas analógicas que permiten ingresar señales analógicas de mando o de proceso (p.ej. presión, nivel, flujo, etc.). Ambos canales aceptan tanto señales de voltaje (0 a 10 VDC) así como de corriente (0..20mA). La resolución del convertidor analógico digital es de 10 bits con un tiempo de ciclo de 4 ms.

Para que el variador interprete las señales conectadas a los canales analógicos como tensión o corriente, es necesario indicarlo mediante el uso de 2 interruptores digitales ubicados en el panel de bornes de mando. Según su posición, el variador interpretará la señal conectada. En la Figura 2.18 se puede apreciar la posición correspondiente para configurar la entrada como tensión o corriente:

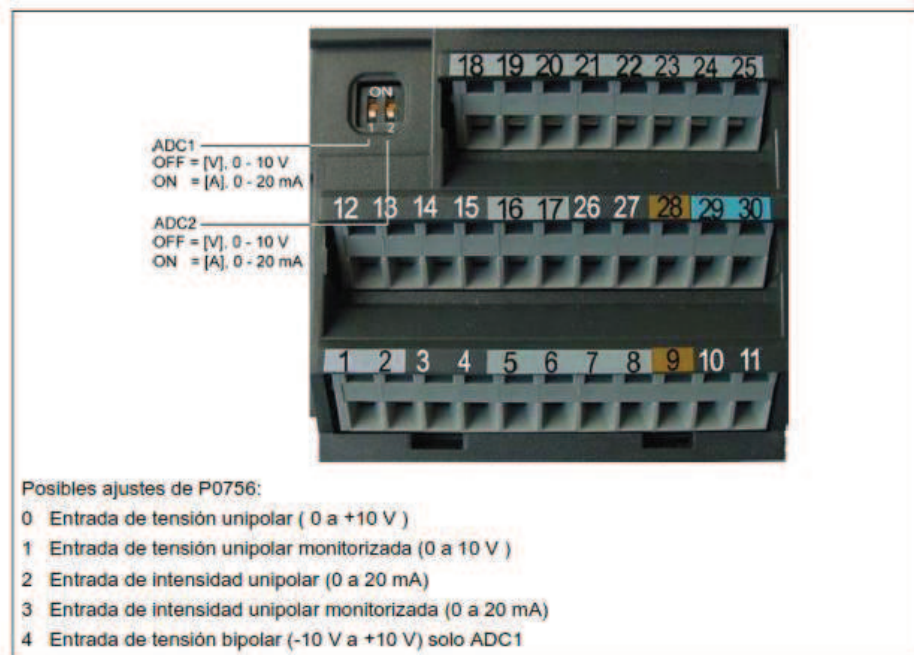


Figura 2.18. Interruptores de configuración de entrada analógica

Además de configurar adecuadamente los interruptores de señal, se debe configurar el parámetro P0756 en concordancia a la señal que se esté conectando.

En el caso particular del presente proyecto, la entrada analógica ADC2 que corresponde a los bornes 10 y 11 es utilizada para el transmisor de presión, por tanto se debe poner el interruptor en la posición ON, ya que la señal a usar es de corriente, y el parámetro P0756 en el valor 2.

En la siguiente figura se ilustra cómo se puede conectar una señal analógica tipo voltaje o corriente.

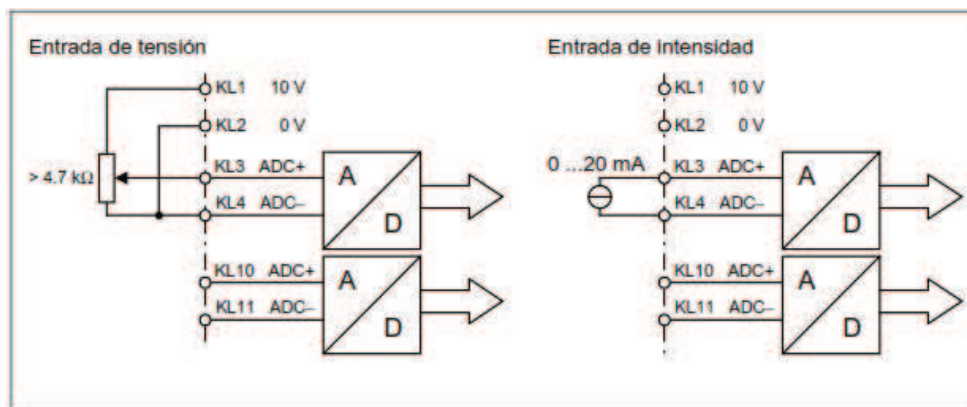


Figura 2.19. Ejemplo de conexiones a las entradas analógicas.

La estructura en diagrama de bloques del canal analógico se la indica en la siguiente figura.

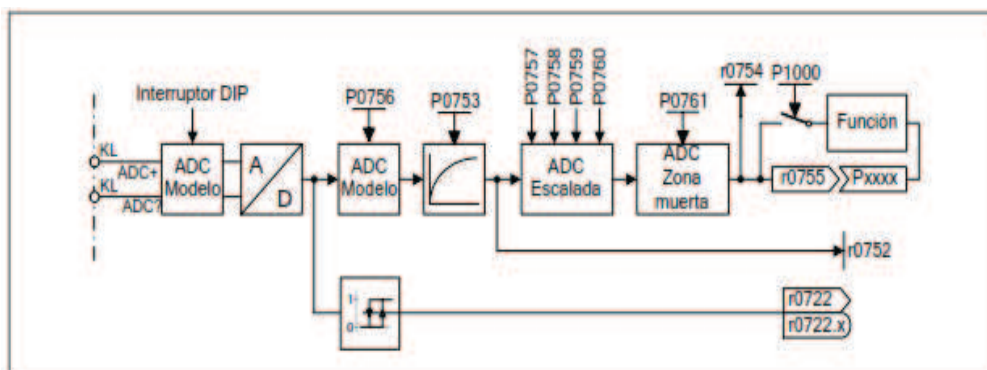


Figura 2.20. Diagrama de Bloques del canal analógico.

Se describen los parámetros más comunes:

P0756: permite elegir el tipo de entrada analógica a utilizar. Su configuración va de la mano con los DIP switches de configuración ubicados en la bornera de mando (OFF para Tensión 10V, ON para Corriente 20 mA). Los posibles ajustes son:

- 0: Entrada de tensión unipolar 0 a 10 Vdc.
- 1: Entrada de tensión unipolar monitorizada
- 2: Entrada de corriente unipolar 0 a 20 mA.
- 3: Entrada de corriente unipolar monitorizada.
- 4: Entrada de tensión bipolar -10 a 10 Vdc.

De estas opciones se selecciona la 2, ya que el transmisor de presión genera una señal analógica de 4 a 20 mA.

P0753: establece un tiempo de filtrado en mili segundos para el canal analógico. Este valor permite reducir oscilaciones suavizando la señal analógica. El incremento de este valor también ralentiza la respuesta a cambios analógicos. Este parámetro se configura con el valor de 300 ms.

P0757 – P0760: permiten configurar el escalado de la entrada analógica. En la Figura 2.21 se puede observar la relación entre los diferentes parámetros:

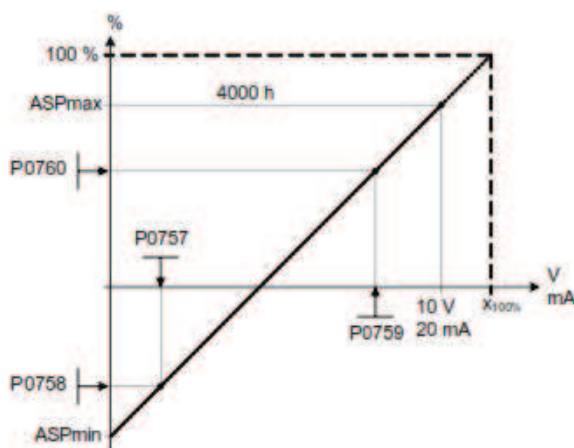


Figura 2.21. Escalado de canal analógico

Para utilizar la función de escalado se debe considerar la procedencia de la señal analógica. Para efectos del proyecto, ésta proviene del transmisor de presión, cuya salida analógica es de 4 a 20 mA.

P0757: valor mínimo de la entrada analógica en sus unidades eléctricas. Su valor se puede configurar al valor mínimo del transmisor de presión 4 mA. Sin embargo, en la práctica se observa en línea, mediante el software de configuración, el valor medido por el variador cuando la presión de línea es de 0 PSI. El valor utilizado es de 3.80 mA.

P0759: valor máximo de la entrada analógica en sus unidades eléctricas. Para el transmisor utilizado este valor corresponde a 20 mA.

P0758: es el valor porcentual que corresponde al valor configurado en P0757. Este valor se configuró como 0%.

P0760: es el valor porcentual que corresponde al valor P0759. En este caso se usó el valor de 100%.

Al configurar P0758 en 0% y P0760 en 100%, el convertidor análogo – digital del variador va a convertir las señales de corriente de 3.89 mA a 20 mA en un valor porcentual entre 0% y 100%. Donde 0% corresponde al valor inferior de 3.89 mA y 100% al valor máximo de 20 mA.

Esta conversión de valores de corriente a valores porcentuales facilita la interconexión BICO del valor del transmisor de presión ingresado en el canal analógico 2 con el regulador PID del variador.

R0754: en este parámetro se puede leer el valor escalado por el convertidor.

R0755: parámetro de lectura Conector que se puede conectar a otras funciones del variador. Este valor se conecta mediante BICO con el parámetro P2264. Esto permite que configurar el valor escalado de la entrada analógica 2 como el valor de la señal de retroalimentación del regulador PID.

2.3.3 SISTEMA DE CONTROL

Para coordinar el funcionamiento del sistema y así cumplir con los requerimientos de control por parte de la Pasteurizadora se instala un PLC que está a cargo de las siguientes tareas:

- Funcionamiento alternado de bombas: cada bomba funciona como bomba principal por 1 semana.
- Funcionamiento emergente de bombas: cuando la demanda de caudal se incrementa, la bomba auxiliar debe ingresar al sistema.
- Alarma de bomba en vacío: mediante un equipo externo que monitorea el nivel de líquido en el cabezal de la bomba se previene que la bomba se ejecute en seco.
- Alarma de nivel de líquido en la toma bajo: Mediante detectores de nivel discreto se conoce si el nivel de agua almacenado para bombeo es suficiente, caso contrario se evita el bombeo.
- Estado de la presión del sistema: se utiliza un panel operador amigable con el usuario para indicar el estado actual del sistema y sus alarmas.
- Reseteo de fallas de variador.

2.3.3.1 Controlador logico programable (plc)

Como cerebro del sistema se eligió al PLC Logo de Siemens con los módulos de expansión para entradas/salidas digitales y analógicas como se muestra en el Figura 2.22:

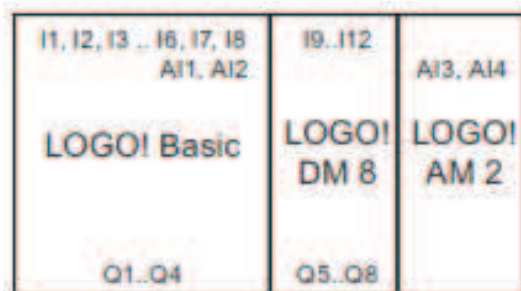


Figura 2.22. Módulos E/S PLC

En la Tabla 2.12 se indica la distribución y función asignada a las entradas y salidas del PLC para el presente proyecto.

	Entradas Digitales	Función	Salidas Digitales	Función
PLC 6ED1052- 1MD00- 0BA6	I1	Manual Bomba1	Q1	Encendido Bomba1
	I2	Automático Bomba1	Q2	Reserva
	I3	Manual Bomba2	Q3	Encendido Bomba2
	I4	Automático Bomba2	Q4	Reserva
	I5	Señal de bomba1 vacío		
	I6	Señal de bomba2 vacío		
	I7	Nivel de agua en cisterna 1		
	I8	Nivel de agua en cisterna 2		
DM8 6ED1055- 1MB00- 0BA1	I9	Falla Variador 1	Q5	Reset Fallas Variadores
	I10	Falla Variador 2	Q6	Ventilador 1
	I11	Sin Conexión	Q7	Ventilador 2
	I12	Sin Conexión	Q8	Sin Conexión
AM2 6ED1055- 1MA00- 0BA0	Entradas Analógicas	Función		
	A13	Transmisor de presión		

Tabla 2.12. Distribución de E/S D/A en el sistema

En la Figura 2.23 se muestra el PLC y sus módulos de manera física.



Figura 2.23. PLC Logo y accesorios

2.3.3.2 Características técnicas

El sistema utiliza una fuente de 24 VDC como alimentación. Las características técnicas principales del PLC son las siguientes:

Características Técnicas PLC	
Código	6ED1052-1MD00-0BA6
Tensión de alimentación	12/24VDC
Consumo de corriente	40..100mA @ 24VDC
Respaldo del reloj en tiempo real a 25°C	80 horas
Precisión del reloj	2 s/día
Número de Entradas Digitales	8
Aislamiento galvánico	No
Entradas rápidas	4 (I3, I4, I4, I6)
Frecuencia de entrada normal	Máx 4Hz
Frecuencia de entrada rápida	Máx 5kHz
Señal 0 Lógico	< 5VDC
Señal 1 Lógico	> 8,5 VDC
Número de Salidas digitales	6
Tipo de salida	Relé
Aislamiento galvánico	Sí
Corriente de salida	Máx 10 A por relé
Frecuencia de conmutación mecánica	10 Hz
Dimensiones An x Al x Pr	72 x 90 x 55 mm
Grado de Protección	IP20

Tabla 2.13. Características técnicas LOGO

Un dato importante a tomar en cuenta es que el tiempo de ciclo para el logo según el fabricante es de 0.1 ms, con un tiempo de arranque de 9 s.

El módulo de E/S digitales DM8 es similar en características al PLC con la diferencia de que las salidas tipo relé tienen una capacidad máxima de 5 A.

Respecto del módulo de entradas analógicas, sus características sobresalientes son las siguientes:

LOGO! AM 2	
Fuente de alimentación	
Tensión de entrada	12/24 V DC
Rango admisible	10,8 ... 28,8 V DC
Consumo de corriente	25 ... 50 mA
Compensación de fallos de tensión	Tip. 5 ms
Disipación a	
• 12 V	• 0,3 ... 0,6 W
• 24 V	• 0,6 ... 1,2 W
Aislamiento galvánico	No
Protección contra inversión de polaridad	Sí
Borne de puesta a tierra	Para poner a tierra y apantallar el cable de medición analógico
Entradas analógicas	
Cantidad	2
Tipo	Unipolar
Rango de entrada	0 ... 10 V DC (impedancia de entrada 76 k Ω) o 0 ... 20 mA (impedancia de entrada <250 Ω)
Resolución	10 bits, normalizado a 0 ... 1000
Tiempo de ciclo para generar valores analógicos	50 ms
Aislamiento galvánico	No
Longitud de cable (blindado y trenzado)	10 m
Alimentación del encoder	Ninguna
Límite de error	\pm 1,5 %
Supresión de frecuencias perturbadoras	55 Hz

Tabla 2.14. Características Módulo de entradas analógicas

2.3.3.3 Cableado

En la Figura 2.24 se muestra el diagrama de conexiones de las entradas y salidas digitales del PLC. Las entradas utilizan voltaje 24 VDC.

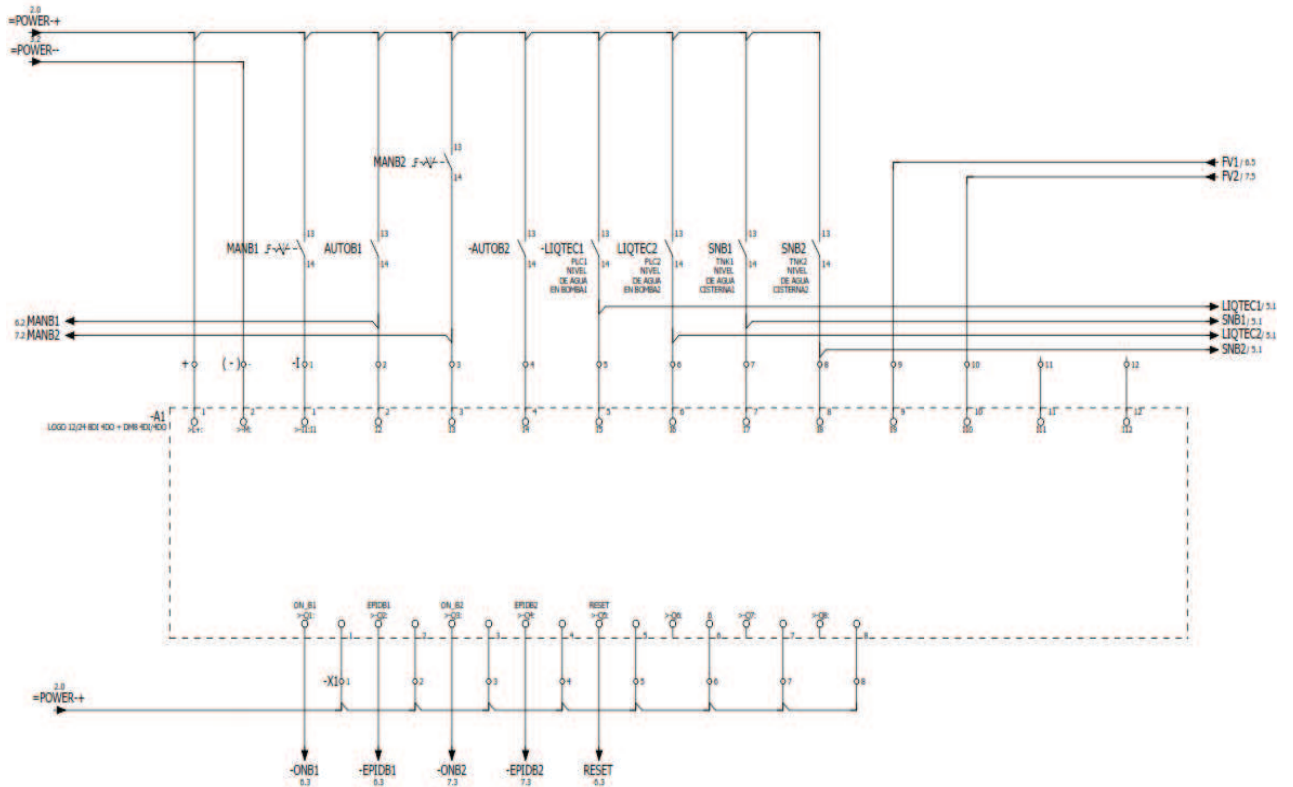


Figura 2.24. Conexión de Entradas Digitales al PLC

Las entradas analógicas en el módulo AM2 se conectan de la siguiente manera:

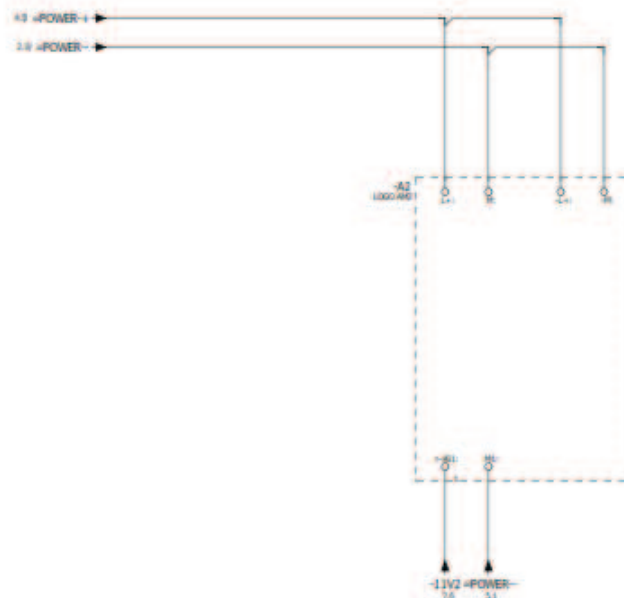


Figura 2.25. Conexión de Entradas Analógicas

En el caso particular del proyecto se utiliza el canal I1 que corresponde a la entrada AI3 en el PLC. La señal es de corriente 4 .. 20 mA que proviene del transmisor de presión del sistema.

2.3.3.4 Interfaz hmi

El sistema incluye un panel LCD de interfaz con el usuario que es propio de la tecnología de automatización del sistema Logo de Siemens y compatible con los PLCs de esta gama a partir de la versión 6 en adelante. La interfaz dispone de su propio cable de comunicación con el PLC y permite las siguientes funciones:

- Visualización de Texto y gráficos de barra
- Configuración básica del PLC Logo mediante los cursores de dirección y los botones Ok y Esc.
- Dispone de 4 teclas nombradas F1, F2, F3 y F4. Cuya función se puede establecer mediante programación.
- Configuración de los mensajes de textos a través de Logo Soft.

Características técnicas:

Características técnicas Panel Logo TD	
Código	6ED1055-4MH00-0BA0
Tensión de alimentación	12VDC Ó 24VAC/VDC
Fuente Luminosa	Led
Tipo de display	STN 4 líneas. 24 caracteres
Teclas configurables	10
Gráficos	Tipo Barra
Interfaz de comunicación	RS 232
Grado de Protección	IP40
Dimensiones (An x Al x Pr)	128,2 x 86 x 38,7 mm

Tabla 2.15. Características técnicas del Panel Operador Logo TD

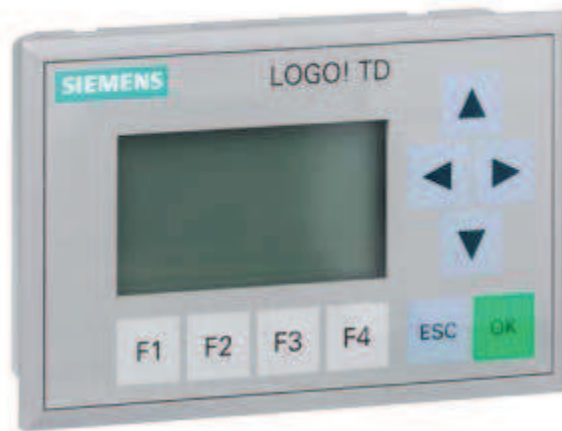


Figura 2.26. Interfaz de Operación LOGO TD

2.3.4 TRANSMISOR DE PRESIÓN

Para la retroalimentación de la presión del sistema se utiliza un transmisor de presión que convierte la variable física en una señal de corriente que puede ser interpretada por los variadores y el PLC.

Su modo de funcionamiento consiste en una célula piezoresistiva de acero inoxidable que contiene un puente de película gruesa que transfiere la presión a un diafragma de acero inoxidable. El voltaje de salida es luego convertido en una señal de corriente de 4 a 20 mA linealmente proporcional con la presión.

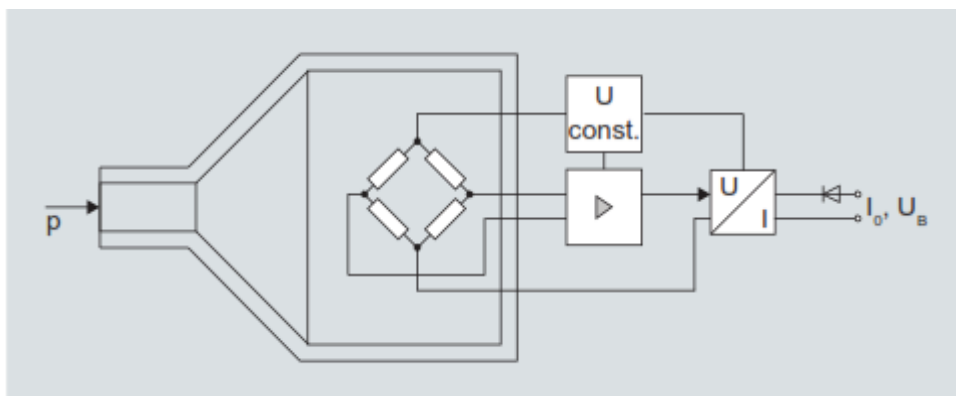


Figura 2.27. Modo de funcionamiento del transmisor

El transmisor utilizado es un equipo pasivo, ya que no tiene terminales propios o independientes de alimentación. Su esquema de conexión es el siguiente:

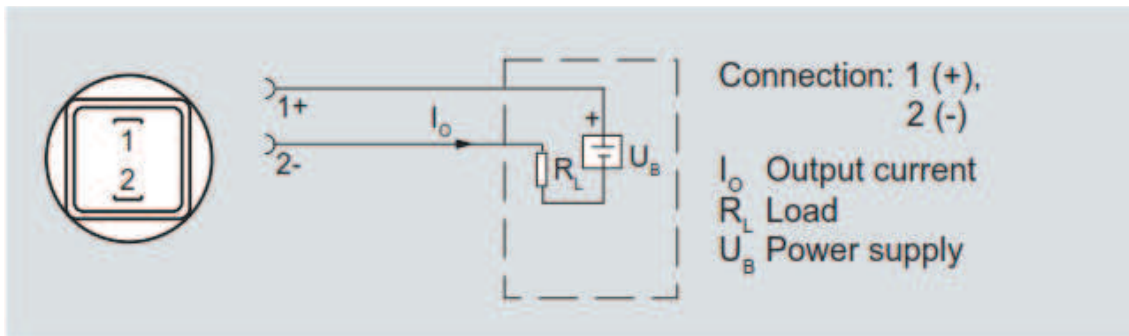


Figura 2.28. Esquema de conexión con salida de corriente de acuerdo a EN175301

Como puede observarse, la alimentación para el transmisor de presión se conecta directamente al conector 1. Por el conector 2 se obtiene la respuesta de corriente, la misma que se cablea a las entradas analógicas de los variadores y la entrada analógica del PLC en forma serial. El último punto se conecta nuevamente al negativo de la fuente. El transmisor seleccionado utiliza alimentación de 24VDC. Se debe recordar el uso de cable apantallado para mitigar las influencias electromagnéticas a las que pueda estar sujeto el transmisor.



Figura 2.29. Transmisor de Presión Siemens.

La conexión del transmisor de presión con los variadores y el módulo AM2 del PLC se indica en la Figura 2.30

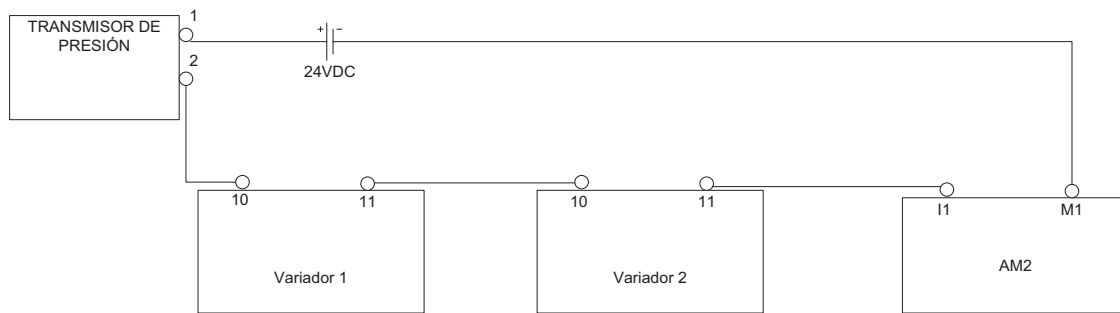


Figura 2.30. Conexión Transmisor – Variadores - PLC

Las características principales del transmisor escogido son las siguientes:

Características técnicas Transmisor de Presión	
Código	7MF1567-4CA00-1GA1/ Siemens
Tensión de alimentación	12...30VDC
Rango de Presión	0 a 150 PSI
Salida	4..20mA
Carga	> 10KOHM
Curva de salida	lineal
Error en medida	0,25% del fondo de escala / 0,5% máximo
Grado de Protección	IP65
Temperatura del proceso	-30 a +120°C
Conexión eléctrica	DIN EN 175301-803-A
Conexión al Proceso	1/2" - 14 NPT macho

Tabla 2.16. Características Principales del Transmisor de Presión

2.3.5 EQUIPOS ADICIONALES

Como equipos adicionales de protección se instala el CR LIQTEC. Este equipo permite detectar el nivel de agua en la bomba generando una señal de alarma mediante contacto tipo relé que es utilizada en el sistema de control para desconectar inmediatamente la bomba. De esta manera se previene el funcionamiento de la bomba en seco que es una de las causas más frecuentes de deterioro de las bombas en la industria.

Debido a que otra gran fuente de problemas en una bomba es el incremento de la temperatura del líquido, situación que sucede en la cavitación o en la aspiración de aire, el equipo también mide la temperatura de la bomba. Para esto, el equipo acciona el contacto de alarma una vez alcanzada la temperatura de 130°C.

Adicionalmente el equipo detecta si el cable del sensor de nivel/temperatura está roto, lo que lo convierte en un equipo intrínsecamente seguro. Tiene una entrada de PTC por lo que se puede también evaluar la temperatura del motor. Si bien esta función también se puede realizar directamente con el variador de frecuencia.

Bornes de conexiones Liqtec:

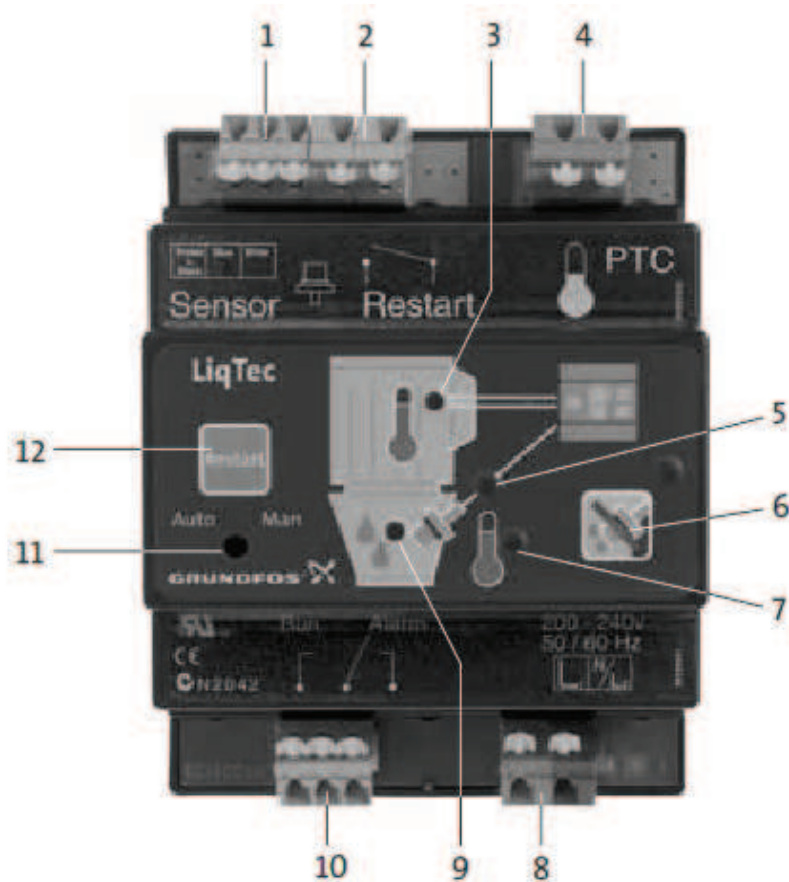


Figura 2.31. Liqtec

1. Borne de conexión para el sensor de dry – running
2. Pulsador de reinicio
3. Indicador de temperatura del motor
4. Bornes de conexión para las PTC del motor
5. Indicador del cable del sensor
6. Desactiva la función de protección de bombeo en seco (dry-running)
7. Indicador de temperatura del líquido.
8. Conexión de alimentación a 220 VAC
9. Indicador del sensor de protección de bombeo en seco.
10. Contacto de alarma. Se activa si el cable del sensor está roto, la temperatura del líquido es muy alta o la bomba está sin agua.
11. Permite escoger entre reinicio de falla manual o automático
12. Botón de reinicio del bombeo.

2.3.6 TABLERO ELÉCTRICO DE CONTROL

Para el montaje de los variadores junto con sus protecciones eléctricas y el sistema de control se diseñó un tablero eléctrico. Dispone de un interruptor termomagnético principal de 80 A que alimenta de energía eléctrica a un sistema de barras de cobre. Del sistema de barras se distribuye a los seccionadores con fusibles rápidos para cada variador. La salida de los seccionadores se conecta a los bornes de alimentación trifásica.

El sistema de control se instala en la parte superior utilizando una fuente de control de 24 VDC y las protecciones por fusible necesarias. Las diferentes señales del sistema se interconectan mediante borneras de 2 pisos para facilitar el cableado y mediante relés de interfaz de 1 polo con bobina de 24 VDC.

El sistema cuenta adicionalmente con un supervisor de tensión que desconecta el funcionamiento del sistema cuando la alimentación trifásica es inestable o está fuera de los límites que requieren los variadores. Los paneles operadores de los variadores están montados directamente en la puerta lo que permite a los operarios y a los usuarios expertos diagnosticar el estado de los variadores sin tener que abrir el tablero. Debido a que los variadores requieren de un determinado flujo de aire desde abajo hacia arriba para refrigerar la etapa de potencia, se instalaron 4 ventiladores, 2 a cada lado. Los ventiladores inferiores ingresan aire, mientras que los superiores retiran el aire caliente de los variadores. Los 4 ventiladores utilizan filtro, limitando de esta manera el ingreso de polvo al sistema.

En la Figura 2.32 se muestra el tablero finalmente ensamblado.



Figura 2.32. Vista exterior del tablero de control



Figura 2.33. Vista interior del tablero de control

2.3.7 ESQUEMA DE CONEXIONES DEL TABLERO DE CONTROL

Los planos eléctricos para el ensamble del tablero de control de presión constante se indican en las siguientes páginas. Los planos se dividen en:

1. Distribución de Energía: Indica las principales señales de alimentación utilizadas en el tablero. Para el sistema de control se utiliza 24VDC, mientras que para la potencia se utiliza 220 Vac trifásica.
2. Entradas/Salidas digitales del PLC: se indica la conexión de las señales de mando del tablero, así como de las señales enviadas por el dispositivo Liqtec.
3. Entradas Analógicas del PLC: indica la conexión del módulo AM2 para recibir la señal del transmisor de presión.
4. Transmisor de Presión: indica la conexión pasiva del transmisor de presión instalado.
5. Control Manual: Indica la conexión a los relés auxiliares para el control manual del sistema.
6. Conexiones Variador Bomba 1: se indica las conexiones de control y potencia en el variador correspondiente.
7. Conexiones Variador Bomba 2: se indica las conexiones de control y potencia en el variador correspondiente.

Los planos fueron desarrollados con el software de ingeniería Eplan Electric.

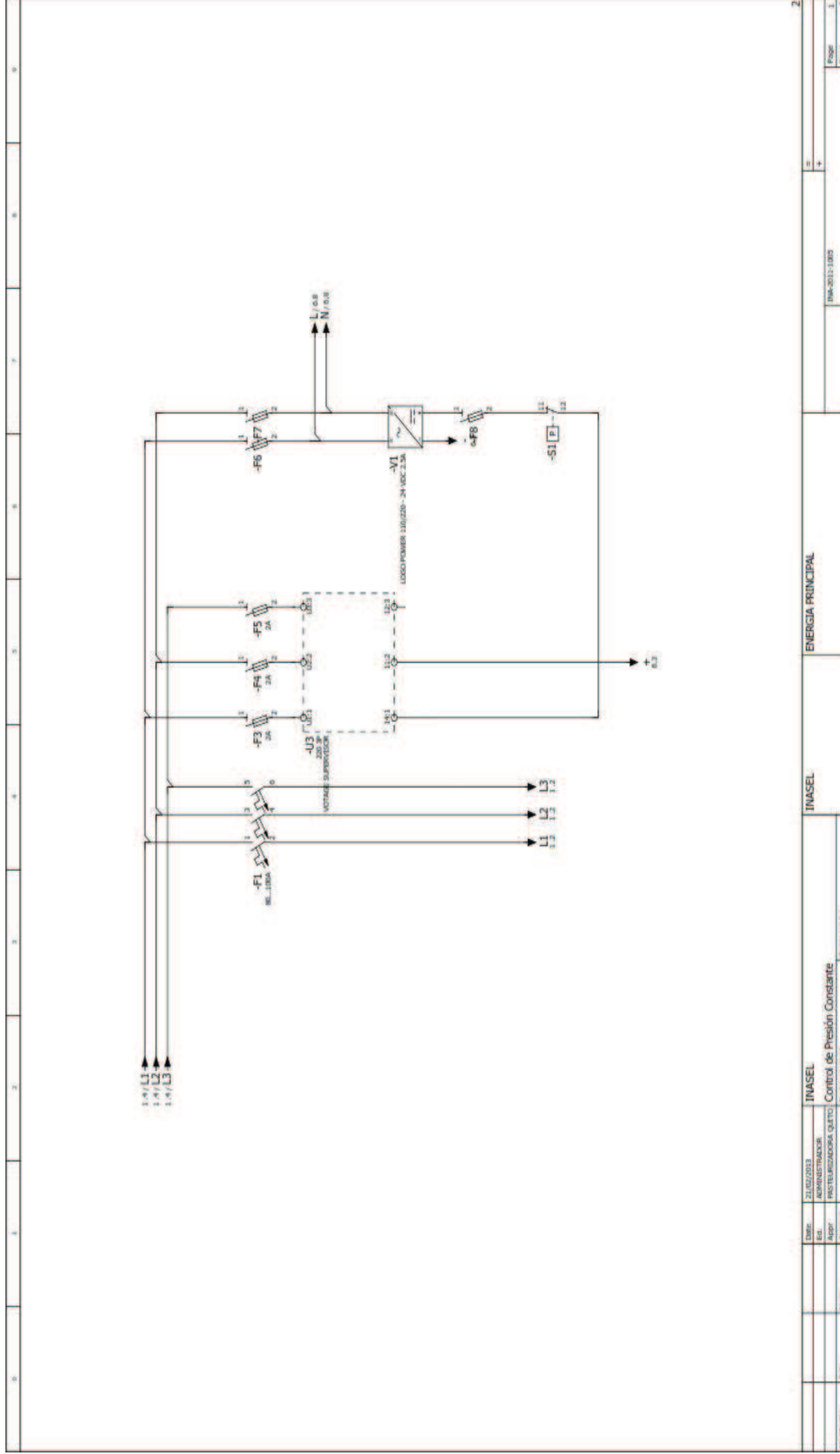


Diagrama 2.1. Distribución

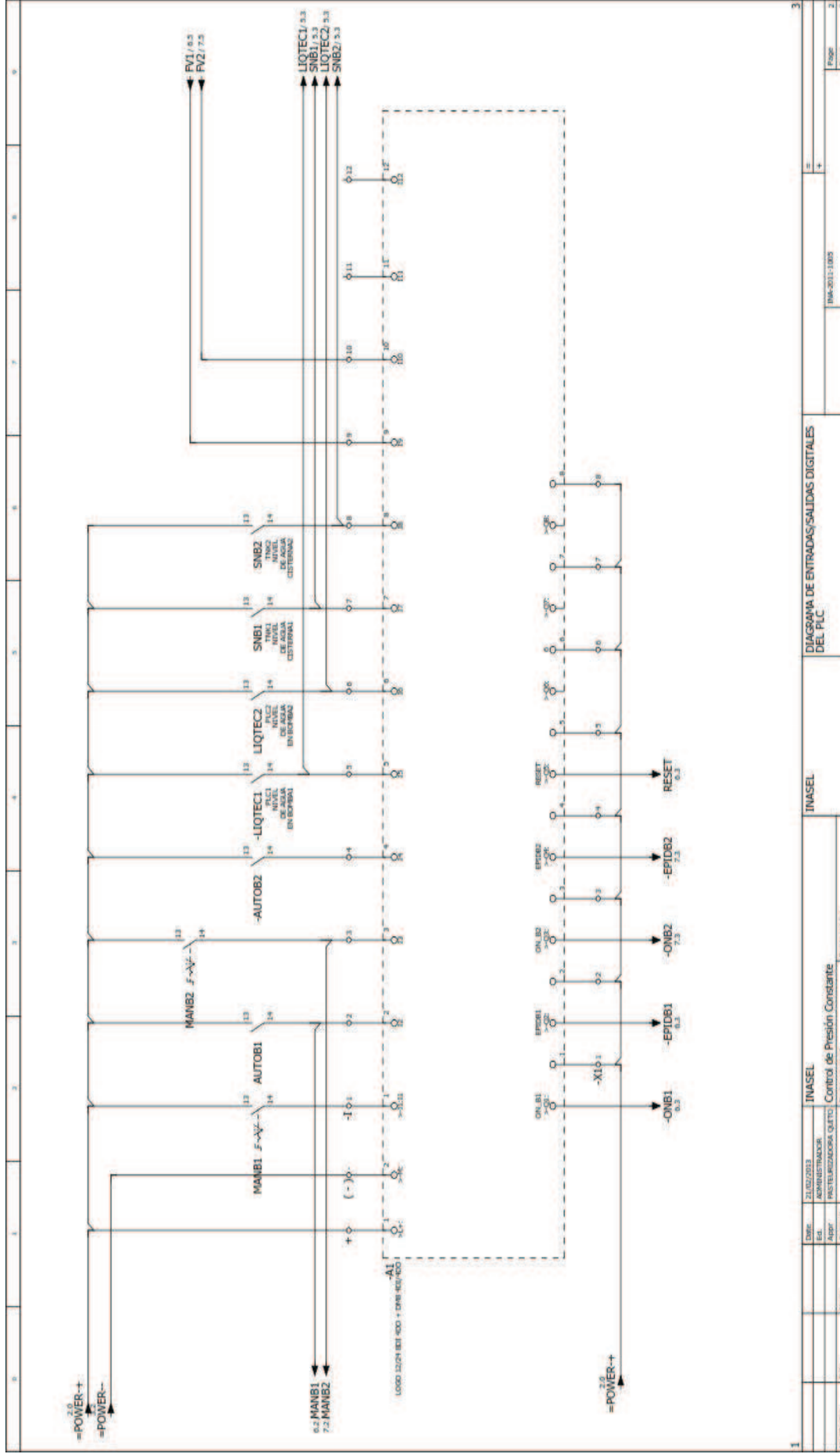


Diagrama 2.2. Entradas/Salidas Digitales

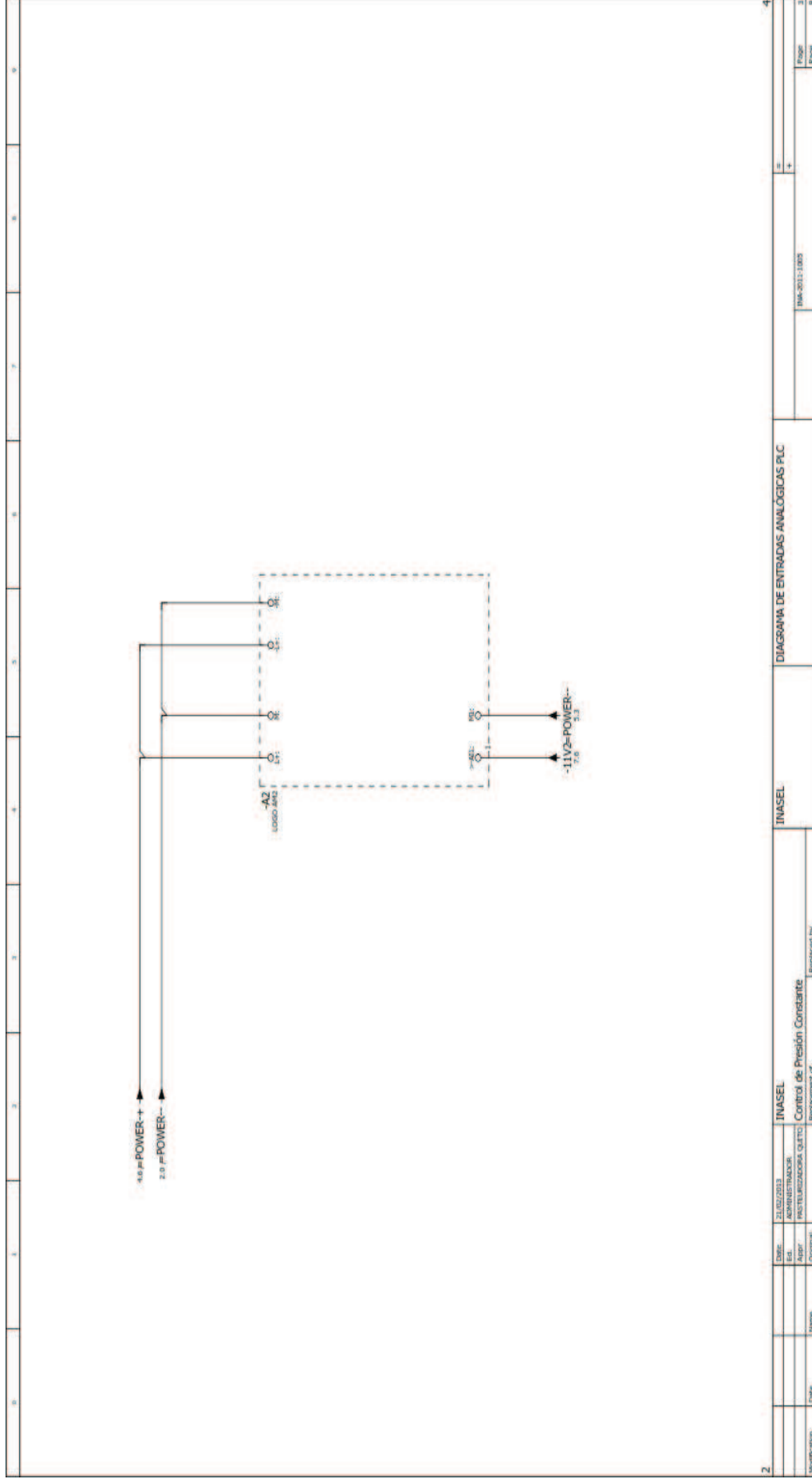


Diagrama 2.3. Entradas Analógicas PLC.

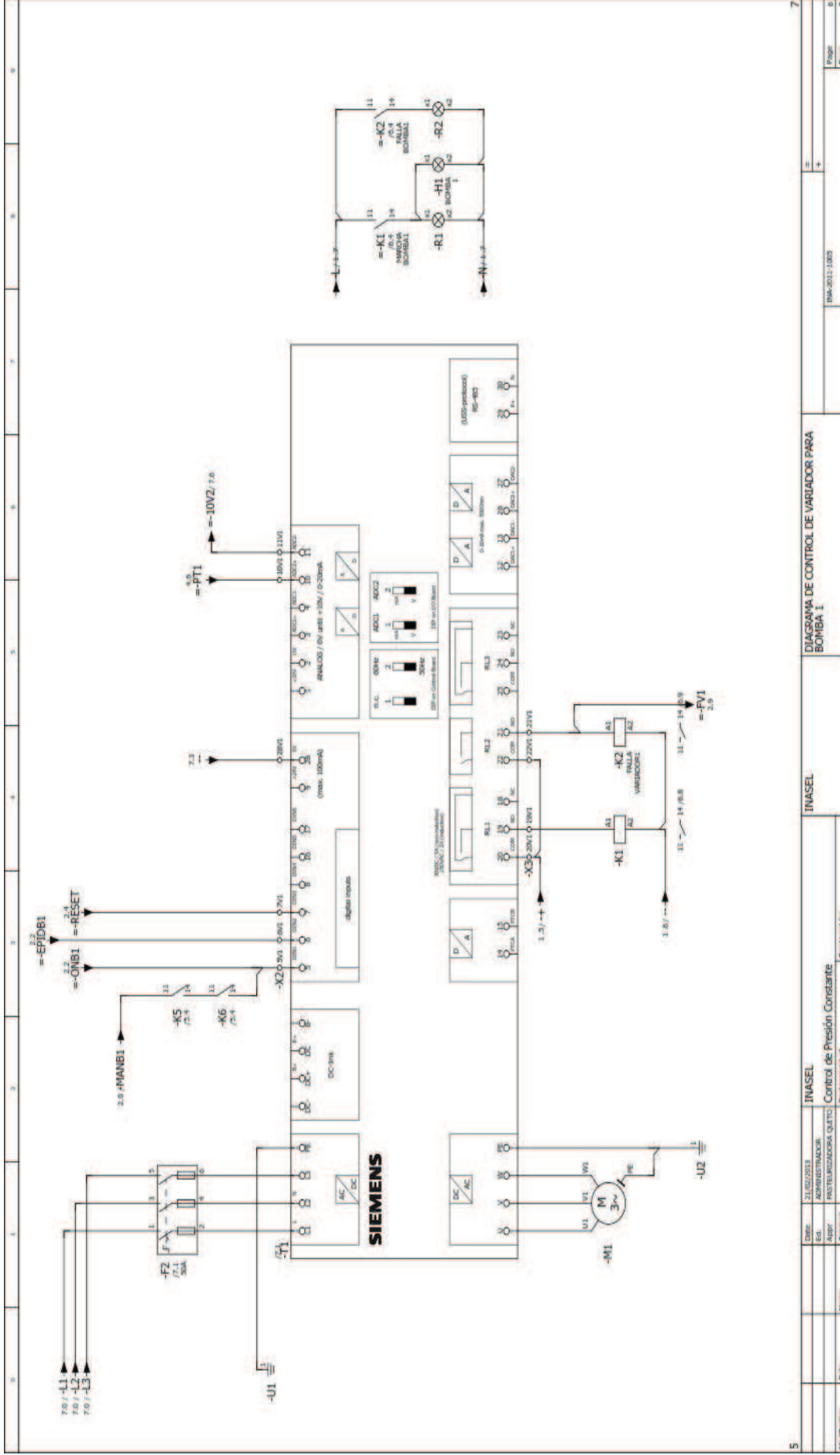


Diagrama 2.6. Conexiones Variador 1.

5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
										DIAGRAMA DE CONTROL DE VARIADOR PARA BOMBA 1																																																																																					
										INASEL																																																																																					
										Control de Presión Constante																																																																																					
										Replacements of																																																																																					
										Original																																																																																					
										Date																																																																																					
										Name																																																																																					
										Appr																																																																																					
										21/02/2013																																																																																					
										ADMISTRADOR																																																																																					
										PROTECCIONA QUITO																																																																																					
										Page																																																																																					
										Page																																																																																					

CAPÍTULO 3 .DESARROLLO DEL SOFTWARE DE CONTROL

En el presente capítulo se presenta la configuración y programación de los variadores de frecuencia seleccionados para controlar los motores de las bombas centrífugas instaladas, así como la programación del PLC Logo para las tareas de control y coordinación del sistema.

El objetivo principal del sistema de bombeo es mantener la presión constante de manera independiente a la demanda de caudal. Para esto el sistema cuenta con 2 bombas de características idénticas que al trabajar en paralelo permiten mantener la misma presión y dotar de mayor caudal al sistema. La regulación de la velocidad de las bombas se realiza utilizando los reguladores PID integrados en cada uno de los variadores de frecuencia instalados.

El PLC coordinará el funcionamiento alternado de las bombas así como la conexión y desconexión de la bomba auxiliar en casos de demanda excesiva de líquido que se reflejan como despresurización del sistema. En el panel Logo TD se podrá observar el nivel de presión en el sistema así como el contador de horas de funcionamiento de cada bomba.

Para tomar las decisiones de control así como para la regulación PID de cada variador se dispone de un transmisor de presión de 150 PSI instalado en el manifold de descarga de las bombas. Para equilibrar la señal medida así como la respuesta de las bombas se instaló adicional un tanque de presurización. La señal de retroalimentación del sistema se conecta tanto a los variadores como al PLC en un lazo serie.

El sistema permite la ejecución de las bombas sólo si existe nivel suficiente de agua en las tomas de alimentación y si las bombas están debidamente cebadas. De igual manera, si una de las bombas se desceba durante operación el sistema automáticamente arrancará la otra bomba. Adicionalmente el circuito

hidráulico dispone de válvulas de pie para mantener la tubería con líquido cuando las bombas son apagadas.

3.1 PROGRAMACIÓN DE LOS VARIADORES MICROMASTER 440

Cada fabricante dispone de sus propias herramientas para la configuración de los variadores. Normalmente la mayoría de variadores en el mercado se pueden configurar mediante la programación de parámetros que son escogidos por el programador haciendo uso de algún panel de configuración que disponga el equipo o de un software de programación. En el caso de los variadores Micromaster 440 de Siemens instalados, para su programación se utilizó las siguientes herramientas tecnológicas:

1. El Panel Operador Básico (BOP): se trata de un equipo de interfaz con el operario que permite configurar y controlar el variador de frecuencia. Dispone de 8 teclas y una pantalla LCD con diodo backlight que permite observar los parámetros configurados y estados del variador.

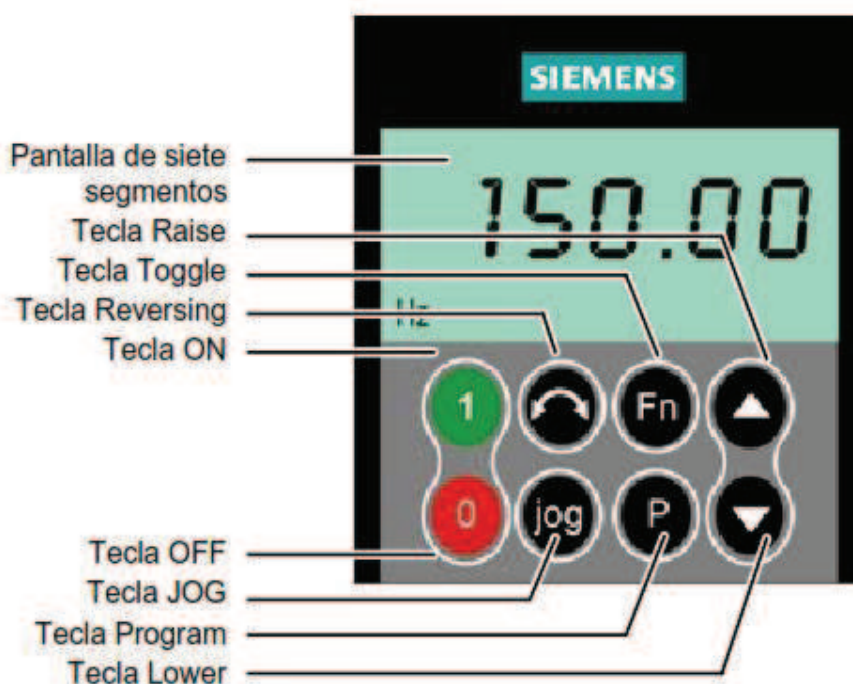


Figura 3.1 Panel Operador Básico

En la Figura 3.1 se indican los 8 botones integrados en el panel operador. Este equipo debe ser usado en conjunto con el manual de parámetros del variador ya que su interfaz únicamente muestra los parámetros y sus valores escogidos. Para el proyecto actual este dispositivo se instaló para indicar al operario la frecuencia actual de las bombas.

2. Siemens Starter: Programa de ingeniería que permite el diagnóstico, configuración y puesta en marcha de las familias de drives de Siemens. Integra las series de variadores: Sinamics y Micromaster. El software dispone de una interfaz gráfica y asistentes para facilitar las tareas de configuración del drive, permitiendo una programación intuitiva. Para descargar el programa al drive se requiere de Kits de comunicación que permiten establecer la comunicación entre el computador y el drive. En el caso de los variadores Micromaster instalados se utiliza cable serial junto con un adaptador que se monta directamente en el drive como el indicado en la Figura 3.2.



Figura 3.2. Cable de Programación Micromaster 440

En el desarrollo del proyecto actual se utiliza para la programación de los variadores el software Starter junto con el Kit de comunicación antes mencionado.

3.1.1 ESTRUCTURA DE PROGRAMACIÓN

Para llevar a cabo la programación efectiva del variador es necesario conocer la lógica de programación del variador. Esto facilita el uso de la herramienta de ingeniería Starter que se utiliza para la puesta en marcha de los variadores.

El sistema de programación del variador se divide en 3 partes:

- Los Parámetros de Programación
- Juegos de Datos
- Tecnología de interconexión BICO.

3.1.1.1 Parámetros de programación

Los parámetros son el medio de configuración del variador que permiten adaptarlo a la aplicación. El acceso a los parámetros del Micromaster se puede realizar con la ayuda del BOP o el software Starter. Están identificados por una letra (P o r), seguida de un número único, que corresponde a determinada función o valor del drive. Algunos parámetros también disponen de índices, que permiten hacer uso de juegos de datos del variador o escoger subfunciones. Además, cada parámetro dispone de atributos particulares que permiten definir las características individuales del mismo.

Para el Micromaster 440, existen 2 tipos de parámetros:

1. **Parámetros de Ajuste “P”**: son parámetros del tipo escritura/lectura y que por tanto permiten activar, configurar o desactivar funciones del variador. El cambio de un parámetro de ajuste se puede guardar por defecto en la memoria volátil o en la memoria EEPROM del variador.

Ya sea en el BOP o mediante el software, este tipo de parámetros aparece con las siguientes posibles notaciones:

- P0927, parámetro 927
- P0702.1, parámetro 702 bit 1
- P0719 [1], parámetro 719 índice 1.

2. **Parámetros de observación “r”:** son parámetros de sólo lectura, y que indican estados o valores reales del variador (p.ej.: corriente de salida, frecuencia actual, etc.). La notación de este tipo de parámetros puede ser la siguiente:

- r0001, parámetro de observación 1
- r00052.3, parámetro de observación 52 bit 3
- r0947[2], parámetro de observación 947 índice 2

Los atributos principales que disponen los parámetros son:

a) **Tipo de datos:** determina el margen de valores máximos y mínimos que se pueden configurar en el variador. En el micromaster se utilizan 3 tipos de datos a saber:

- Entero sin signo de 16 bits, U16: 0 a 65535
- Entero sin signo de 32 bits, U32: 0 a 4294967295
- Entero con signo de 16 bits, I16
- Entero con signo de 32 bits, I32
- Coma flotante según formato IEEE

b) **Margen de valores:** son los valores mínimos y máximos que puede aceptar un parámetro. Por ejemplo, el P2280, ganancia de PID acepta valores entre 0 a 65.

c) **Unidad:** es la unidad física de medición del objeto o proceso. Algunos parámetros de configuración y de lectura tienen una unidad de medida asociada a su valor. Por ejemplo, el parámetro de lectura r027 indica la corriente en amperios que consume el motor. Otros parámetros no tienen unidades físicas asociadas.

-	Sin dimensión
%	Tanto por ciento
A	Amperio
V	Voltio
Ohm	Ohmio
us	Microsegundo
ms	Milisegundo
s	Segundo
Hz	Hertzio
kHz	KiloHertzio
1/min	Revoluciones por minuto
m/s	metros por segundo
Nm	Newton Metro
W	Vatio
kW	Kilovatio
Hp	Horse Power
°C	Grado Celsio
m	metros por segundo
kg	Kilogramo
°	Grado

Tabla 3.1. Unidades físicas de parámetros del variador

d) Nivel de acceso de usuario: Este valor permite acceder a determinados grupos de parámetros, distinguiéndose los siguientes valores:

- **0:** Lista definida por el usuario.
- **1:** Acceso estándar. Parámetros más utilizados.
- **2:** Acceso extendido. Incluye el nivel anterior más otros parámetros.
- **3:** Acceso Experto. Se puede visualizar toda la lista de parámetros. Por ejemplo, regulador PID, bloques libres, etc.
- **4:** Personal de servicio autorizado.

Starter permite observar directamente todos los parámetros, mientras que la programación mediante BOP requiere especificar en el parámetro P0003 el nivel de acceso de usuario como 3 para acceder a las funciones especiales. Para el caso del proyecto, el nivel de

acceso de usuario está configurado con el valor 1, de acceso estándar, donde el usuario no podrá alterar valores de las constantes PID del equipo por precaución.

- e) **Grupo Funcional:** los parámetros están agrupados según su funcionalidad. El parámetro P0004 se puede usar como filtro para ingresar a determinado grupo de parámetros afines. En la siguiente figura se indica los valores que se puede asignar P0004 para filtrar los grupos de parámetros:

Sección principal de parámetros	
0	Todos los parámetros
2	Parámetros del convertidor
3	Parámetros del motor
4	Sensor de la velocidad
5	Tecnología: aplicación / unidades
7	Órdenes de control: entradas y salidas digitales
8	Entradas y salidas analógicas
10	Canal de consigna y generador de rampas
12	Funciones del convertidor
13	Control y regulación del motor
20	Comunicación
21	Fallos, alarmas, monitorización
22	Regulador tecnología (regulador PID)

Figura 3.3. Grupos Funcionales de parámetros

- f) **BICO:** Es una tecnología de interconexión entre parámetros para definir funciones específicas de la aplicación.
- g) **Juego de datos:** Permiten distinguir si el parámetro es un juego de datos del drive o un juego de órdenes para el drive. Esto posibilita cambiar el comportamiento del variador mediante las señales de mando externas.

- h) Estado de servicio del parámetro:** indica si el cambio del valor del parámetro se puede hacer válido con el variador detenido o funcionando. Se distingue 3 estados: En servicio C, En marcha U, listo para marcha T.

3.1.1.2 Juego de datos

Los juegos de datos permiten el cambio de varios parámetros de manera simultánea con una señal externa. Mediante estos se puede cambiar el tipo de control ejercido sobre el motor, habilitar/deshabilitar PID o cambiar de motor. Esta funcionalidad aprovecha el indexado que disponen los parámetros del variador.

Existen 2 tipos de juegos de datos:

1. **Command Data Set (CDS):** Los CDS son juegos de datos de órdenes para el variador. Afectan las fuentes de comando del variador. Por ejemplo, se puede cambiar el funcionamiento de una entrada digital de ON/OFF1 a frecuencia fija. El enlace de las señales para las órdenes de control y consignas se realiza usando la tecnología bico. Se pueden parametrizar hasta 3 juegos de datos de órdenes. Una aplicación típica es cambiar de operación manual a automática.
2. **Drive Data Set (DDS):** Los DDS son juegos de datos del accionamiento que permiten cambiar ajustes importantes para el control y regulación de un accionamiento. Entre ellos se encuentran los datos del motor, los valores de frecuencias fijas, los tiempos de aceleración, el modo de control, etc.

Para el proyecto se configuraron todos los parámetros en el DDS 0 y en CDS 0 en ambos variadores.

3.1.1.3 Bico

La tecnología BICO permite enlazar las señales (parámetros) internas o externas de manera flexible, facilitando adaptar el accionamiento a la tarea requerida. Los parámetros cuyo valor sea binario serán llamados binectores y pueden ser de entrada (Bi) o salida (Bo). Los parámetros que tienen valores de 16 o 32 bits se enlazan como conectores, y también puede ser de salida (Co) o entrada (Ci). Las entradas BI o CI son parámetros configurables P. Las salidas BO, CO, son parámetros de lectura r.

En la Figura 3.4 y Figura 3.5 se indica representa gráficamente el concepto de binector – conector.


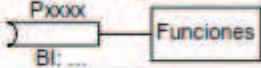


Abreviaturas y símbolos	Nombre	Función
BI 	Entrada de binector (receptor de señales)	Flujo de datos 
BO 	Salida de binector (fuente de señales)	Flujo de datos 

Figura 3.4. Binector






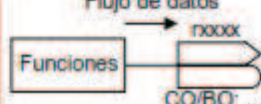
Abreviaturas y símbolos	Nombre	Función
CI 	Entrada de conector (receptor de señales)	Flujo de datos 
CO 	Salidas de conector (fuente de señales)	Flujo de datos 
CO BO 	Salidas de binector y de conector (fuente de señales)	Flujo de datos 

Figura 3.5. Conector

El enlace BICO se utiliza en el presente proyecto para realizar la interconexión entre las señales del regulador PID con las señales de consigna fija y de retroalimentación. También es utilizado para crear los enlaces de funcionamiento de las salidas digitales como se verá más adelante.

3.1.2 SOFTWARE DE INGENIERÍA STARTER

Starter es el software para la configuración y puesta en marcha de los variadores Sinamics y Micromaster. La interfaz gráfica permite una programación eficiente del variador. Al conectarse en línea con el accionamiento permite conocer el estado completo actual del sistema, así como acceso a las fallas del mismo y cambiar parámetros. En esta sección se describen las características principales del entorno de programación.

3.1.2.1 Estructura del workbench

El programa está dividido en tres áreas clave que son:

- a) **Árbol del proyecto:** ubicado a la izquierda proporciona una visión general de todos los elementos del proyecto en forma esquemática. Un proyecto puede incluir varias unidades de drives. Cada drive integra sus diferentes objetos de programación y esta área permite navegar entre ellos. Por ejemplo, se tiene acceso a las entradas/salidas, el regulador pid, frecuencias fijas, etc.
- b) **Área de trabajo:** es el área centrada que permite realizar la modificación de los diferentes parámetros del variador de manera gráfica o directamente en la lista de experto.
- c) **Vista de detalles:** ubicada en la parte inferior proporciona información adicional como por ejemplo: el estado de conexión con el accionamiento (on – line /off – line), y el registro de alarmas y fallas. También es el lugar donde se ubica el panel de mando.

En la Figura 3.6 se muestra las diferentes áreas citadas anteriormente del programa Starter

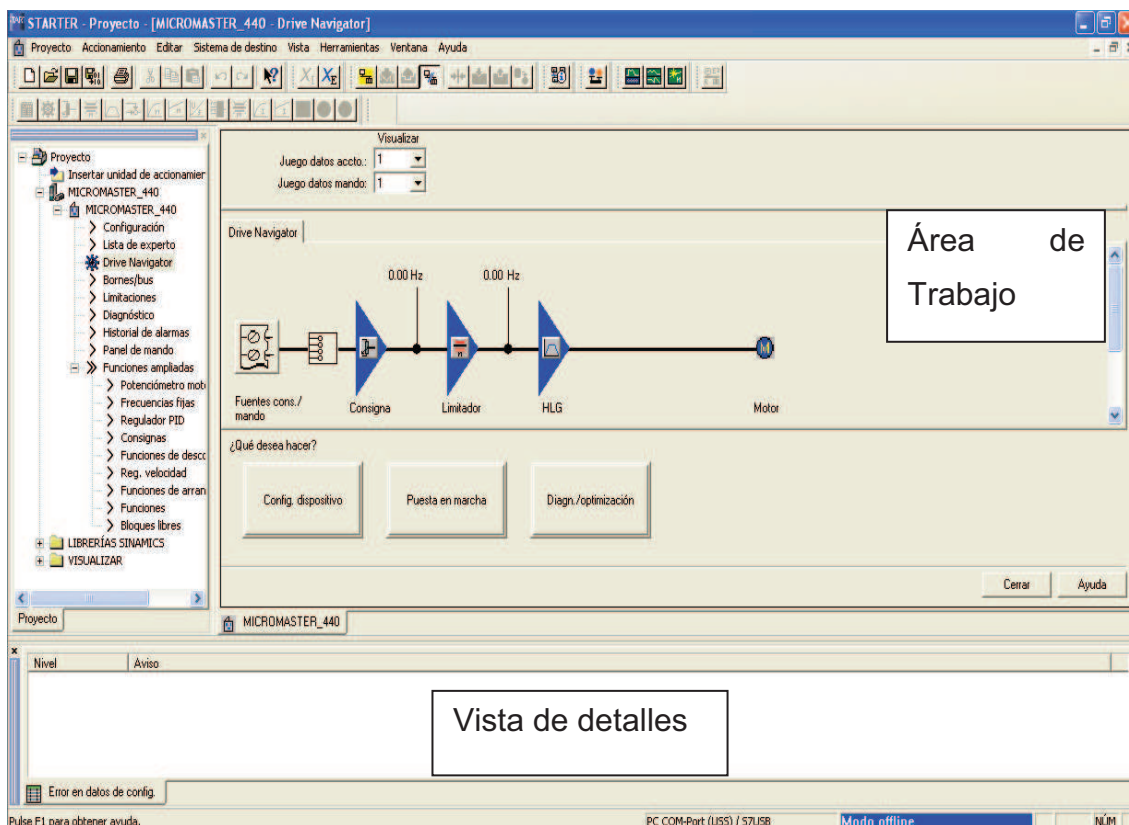


Figura 3.6. Estructura del Workbench

Starter puede funcionar en dos modos:

- a) **Modo off – line:** se puede realizar todos los cambios y configuraciones que se desee en el variador. Para cargar la programación realizada se debe conectar con el variador y descargar el programa.
- b) **Modo on – line:** se establece la comunicación con el variador. Permite realizar cambios en “vivo” del accionamiento o tomar control de éste para realizar pruebas. Los cambios realizados en este modo se quedan en la memoria Ram del accionamiento por lo que deben ser copiados a la memoria Rom del mismo. Cuando se realiza una programación on – line, ningún cambio es registrado en el proyecto del computador. Para guardar dichos cambios se debe cargar los datos del variador en el proyecto. Esto permite respaldar el funcionamiento del variador en el disco duro.

3.1.2.2 Asistente de conexión y configuración

Al abrir Starter aparece un asistente interactivo que permite:

- Crear el proyecto de ingeniería
- Detectar variadores conectados al computador
- Ingresar de manera manual el variador.
- Configurar los parámetros básicos del variador.

Para realizar una conexión exitosa entre el variador y el computador debe observarse que la interfaz PG/PC este ajustada de la siguiente manera:

Punto de acceso: device Starter, Scout

Interfaz ajustada: PC Com-Port USS

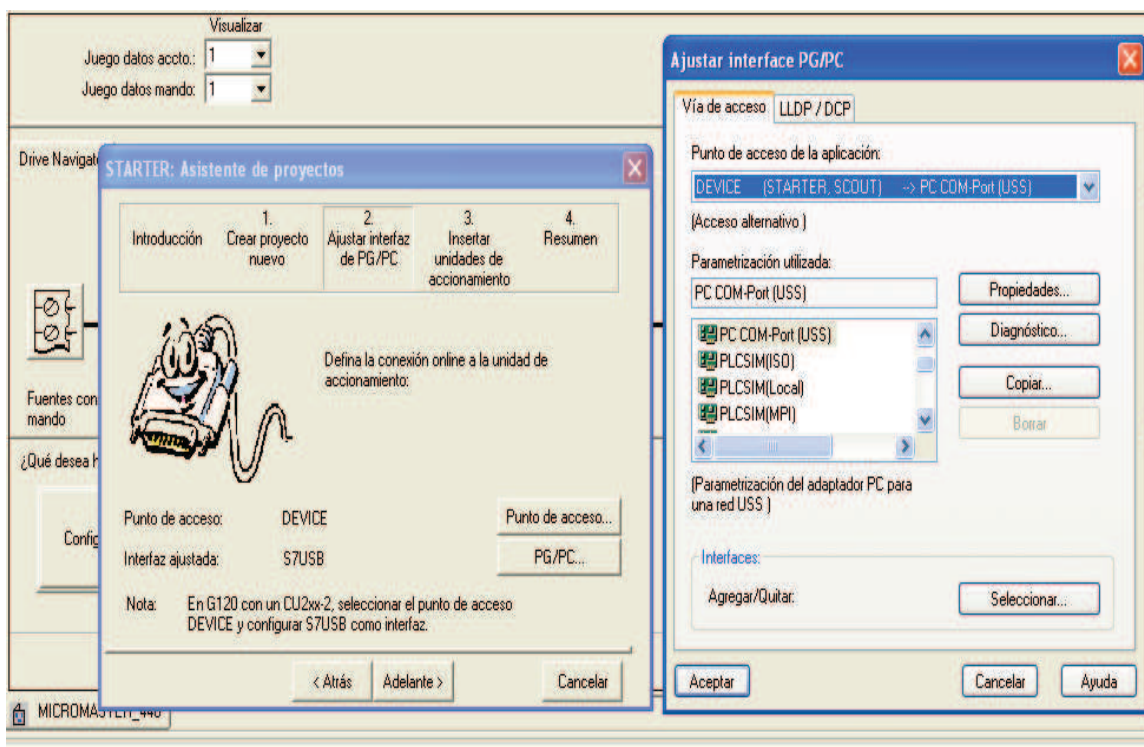


Figura 3.7. Conexión PG/PC

La configuración de comunicación serial se puede realizar haciendo clic en Propiedades en donde se podrá hacer la búsqueda de la velocidad de transmisión. Normalmente para un Micromaster 440, este valor corresponde a 9600 baud.

Una vez establecida la comunicación, se puede insertar en el proyecto los variadores encontrados. La ventaja de este procedimiento es que el programa identifica de manera automática la versión del firmware del variador, con lo cual se puede evitar problemas de coherencias. El asistente también permite seleccionar de manera manual el variador.

Con los variadores integrados al proyecto se puede iniciar el asistente de configuración, el mismo que permite ingresar los parámetros básicos del variador. Entre estos parámetros están:

- a) **Norma del motor:** permite configurar si los datos de potencia y frecuencia del motor serán americanos (kW ó Hp a 60 Hz) o europeos (Hp a 50 Hz). Se configuró como normal la americana con valores de potencia en kW y frecuencia de 60 Hz.
- b) **Tipo de carga:** permite indicar al variador si la aplicación es de torque constante o variable. Debido a que se trabaja con bombas se seleccionó torque variable.
- c) **Datos eléctricos del motor:** se ingresan los principales datos del motor como se indica en la Figura 3.8, en este caso serán los datos eléctricos del motor de la bomba instalada.

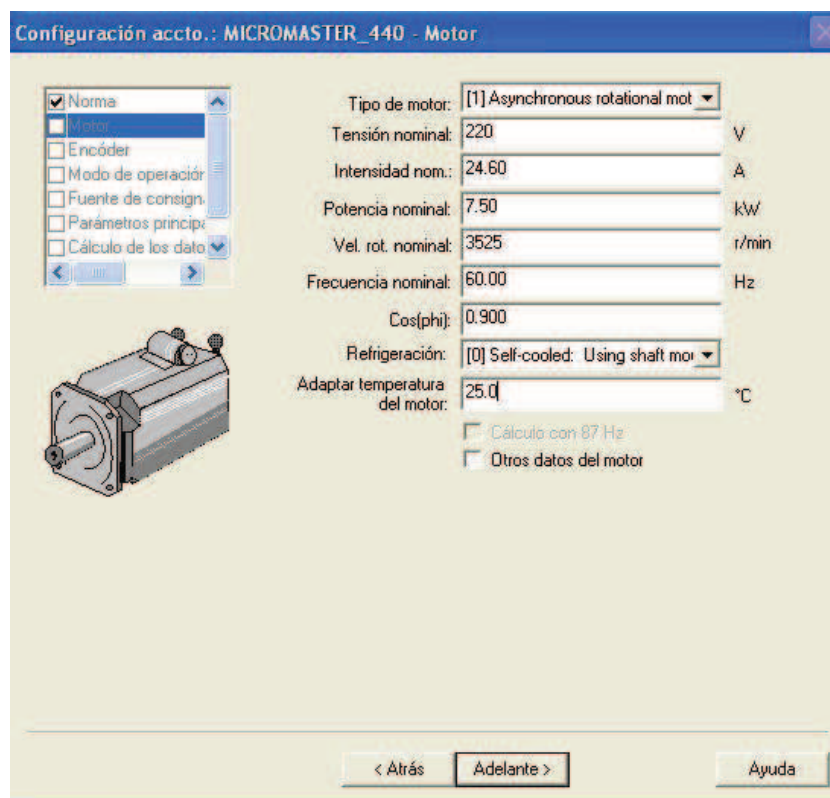


Figura 3.8. Configuración de datos del motor. Asistente Starter

- d) **Configuración del encóder:** para este caso particular está deshabilitada esta función ya que no se dispone de dicho equipo instalado en los motores. Generalmente su uso es provechoso en aplicaciones que requieren de control vectorial.
- e) **Tipo de curva de control V/F:** permite seleccionar cómo el variador va a controlar la carga. Sea utilizando un control Voltaje-frecuencia lineal, cuadrático, programable, o vectorial. En el caso particular del proyecto presente se trabaja con V/F de característica cuadrática, ya que el motor mueve una bomba centrífuga.
- f) **Fuente de consignas:** permite escoger el origen de las señales de mando y predefinir funciones a los terminales del variador. No obstante, se puede personalizar el funcionamiento de los mismos después.

- g) **Parámetros Principales:** permite configurar la frecuencia mínima, máxima, así como los tiempos de aceleración y desaceleración. También permite especificar el factor de servicio del motor instalado.

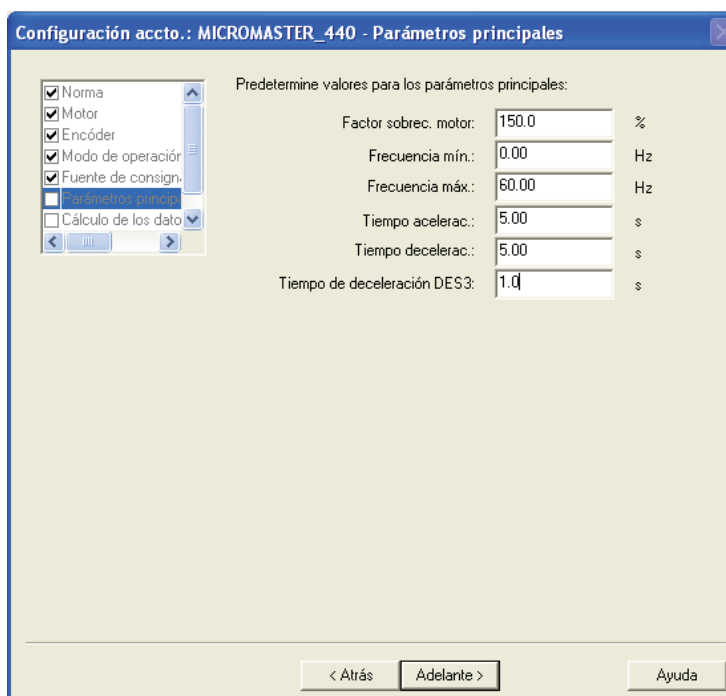


Figura 3.9. Asistente de configuración. Parámetros Principales

- h) **Cálculo de datos del motor:** permite realizar un cálculo de los valores del circuito equivalente del motor en función de los datos ingresados. En aplicaciones con regulación vectorial es recomendable realizar este paso, para optimizar la respuesta del variador.

3.1.2.3 Drive navigator

Permite un ingreso rápido a los parámetros y funciones importantes del accionamiento como son: Fuentes de consigna y mando, límites de operación, generador de rampa y motor. Su interfaz es gráfica, disponiendo de íconos para facilitar la navegación. También brinda acceso directo a los asistentes de configuración y optimización de respuesta del variador.

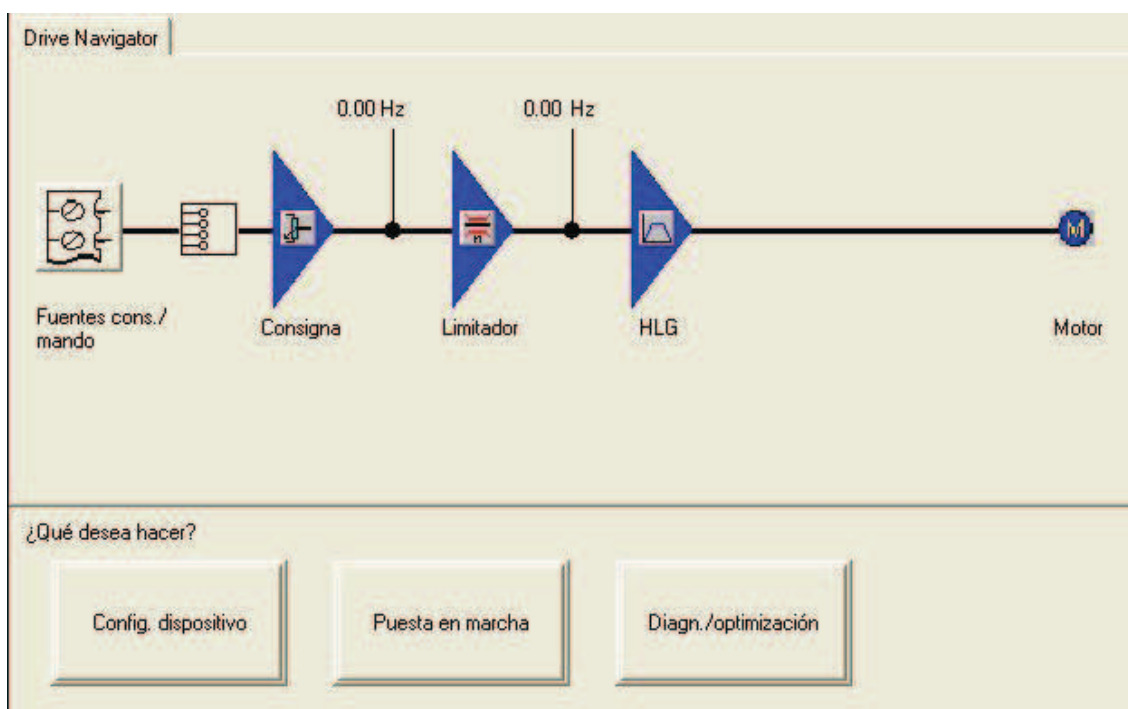


Figura 3.10. Navegador del Variador

Fuentes de señales de mando: Permite la configuración de los bornes de mando. Por ejemplo, se pueden asignar funciones específicas a las entradas y salidas digitales, así como realizar el escalamiento de las entradas y salidas analógicas.

Canal de consigna: permite configurar la consigna principal de frecuencia que tendrá el variador. Dicha consigna puede provenir de una entrada analógica, del regulador PID u otra fuente.

Limitador: permite modificar los valores de tiempos de aceleración/desaceleración, la frecuencia mínima y máxima, el factor de sobrecarga del motor, así como habilitar/deshabilitar la generación de la rampa.

3.1.2.4 Diagnóstico

El software permite visualizar de manera gráfica y amigable con el programador la palabra de mando y estado del accionamiento. Dichas palabras facilitan realizar un diagnóstico del funcionamiento del variador.

Se dispone de 2 palabras de mando y 2 palabras de estado, cada una formada por 16 bits. Las palabras de mando indican el estado de las órdenes enviadas al variador, como por ejemplo: encendido/apagado, frecuencia fija, etc. Por su parte, las palabras de estado indican el funcionamiento actual del variador. Por ejemplo: pueden indicar si el motor se encuentra sobrecargado o el variador en falla.

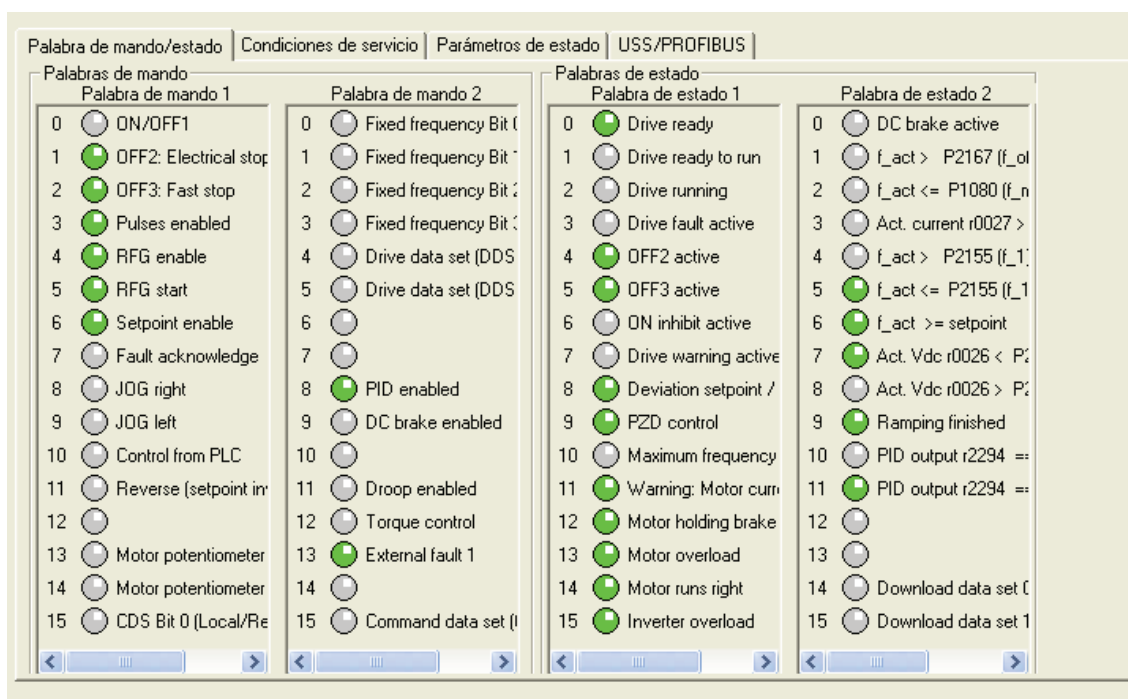


Figura 3.11. Palabra de Mando y Estado

3.1.3 PROGRAMA DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

Los variadores de frecuencia están encargados de regular la velocidad de la bomba para mantener la presión del sistema constante. Para cumplir con este objetivo, los variadores funcionan en un lazo de control cerrado, haciendo uso de su regulador PID.

La programación realizada a los variadores se puede dividir en varias etapas, como se indica en la

Figura 3.12:

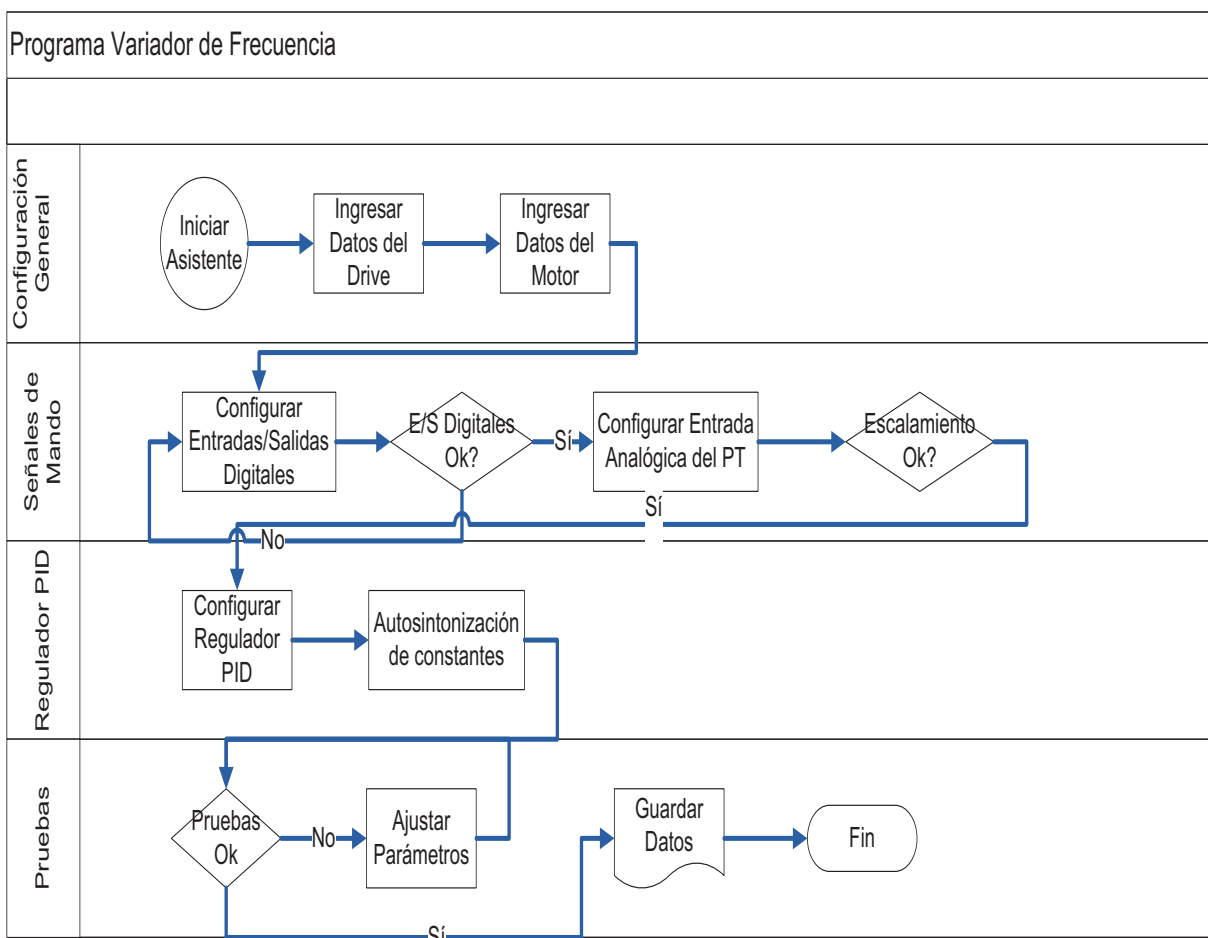


Figura 3.12. Diagrama de Flujo de la configuración de los variadores

3.1.3.1 Configuración del accionamiento

En la configuración del accionamiento se ingresan los datos del motor a utilizar así como se especifica el modo de control que se usa para la salida de voltaje y frecuencia del variador.

Para el ingreso de datos del motor, se establece la conexión en línea con el variador y se inicia el asistente de configuración. Los datos del motor y el variador son ingresados de acuerdo a las solicitudes en pantalla. Se Obtienen los siguientes valores para los parámetros respectivos del motor:

Lista de experto

	Parám...	Jue	Texto del parámetro	Valor offline BOMBA1	Unidad
	Todos	Todos	Todos	Todos	Todos
73	p300[0]	D	Select motor type, 1st. Drive data set (DDS)	[1] Asynchronous rotat...	-
74	p304[0]	D	Rated motor voltage, 1st. Drive data set (DDS)	230	V
75	p305[0]	D	Rated motor current, 1st. Drive data set (DDS)	24.60	A
76	p307[0]	D	Rated motor power, 1st. Drive data set (DDS)	7.50	-
77	p308[0]	D	Rated motor cosPhi, 1st. Drive data set (DDS)	0.820	-
78	p309[0]	D	Rated motor efficiency, 1st. Drive data set (DDS)	87.6	%
79	p310[0]	D	Rated motor frequency, 1st. Drive data set (DDS)	60.00	Hz
80	p311[0]	D	Rated motor speed, 1st. Drive data set (DDS)	3490	r/min

Figura 3.13. Parámetros Motor.

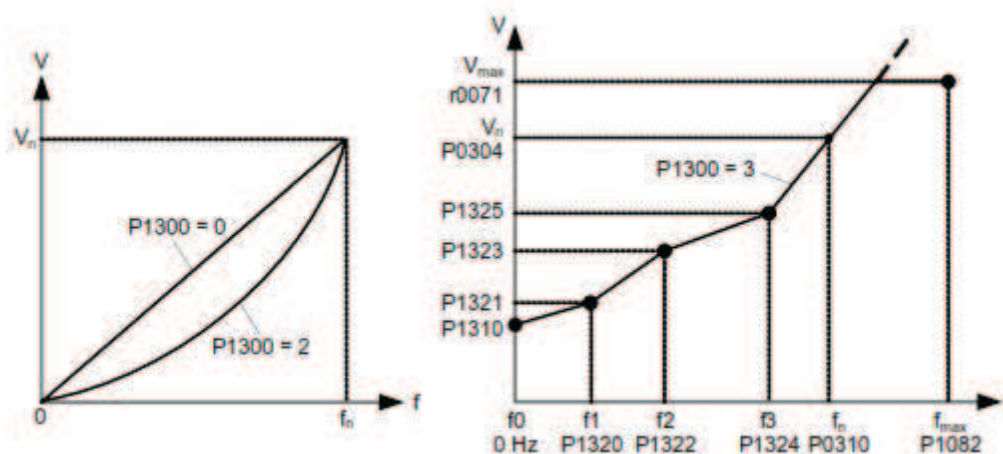
Como puede observarse, los parámetros de datos del motor deben concordar con los datos de placa. Es importante que el valor de la corriente del motor corresponda a la corriente nominal indicada, ya que según este valor y el factor de sobrecarga, el variador realiza la vigilancia del motor.

Debido a que el tipo de carga que se está manejando es una bomba, se debe seleccionar un macro tecnológico adecuado. Para esto, se ingresa mediante el árbol del proyecto a Funciones ampliadas/ Funciones. Aquí se puede modificar el valor del parámetro P0500 que permite escoger entre 3 macros tecnológicas a saber:

- Torque constante
- Bombas y ventiladores
- Posicionamiento Simple

Para el presente caso queda seleccionado P0500 = 1, bombas y ventiladores

Mediante el parámetro P1300 se escoge el tipo de regulación que realiza el variador sobre el motor. Este parámetro permite escoger entre las siguientes opciones:

**Posibles ajustes:**

- 0 V/f con caracterist. lineal
- 1 V/f con FCC
- 2 V/f con caracterist. parabólica
- 3 V/f con caracterist. programable
- 4 Reservado
- 5 V/f para aplicaciones textiles
- 6 V/f FCC para aplic. textiles
- 19 V/f cna tens. independiente
- 20 Control vectorial sin sensor
- 21 Control vectorial con sensor
- 22 Control vect. de par sin sensor
- 23 Control vect. de par con sensor

Índice:

- P1300[0] : 1er. Juego datos accionam.(DDS)
- P1300[1] : 2do. Juego datos accionam.(DDS)
- P1300[2] : 3er. Juego datos accionam.(DDS)

Dependencia:

Consultar parámetro P0205, P0500

Figura 3.14. Modo de control del variador

Debido a que se está trabajando con bombas, se puede escoger la respuesta V/F con característica parabólica, que corresponde al valor 2, debido al tipo de curva torque – velocidad que tiene una bomba.

Una vez configurado el tipo de regulación, es importante revisar el booster de tensión del motor, el cual permite modificar el valor de tensión inicial que tiene el motor a velocidad cero para romper la inercia de la carga. En la Figura 3.15 se puede apreciar la configuración del mismo.

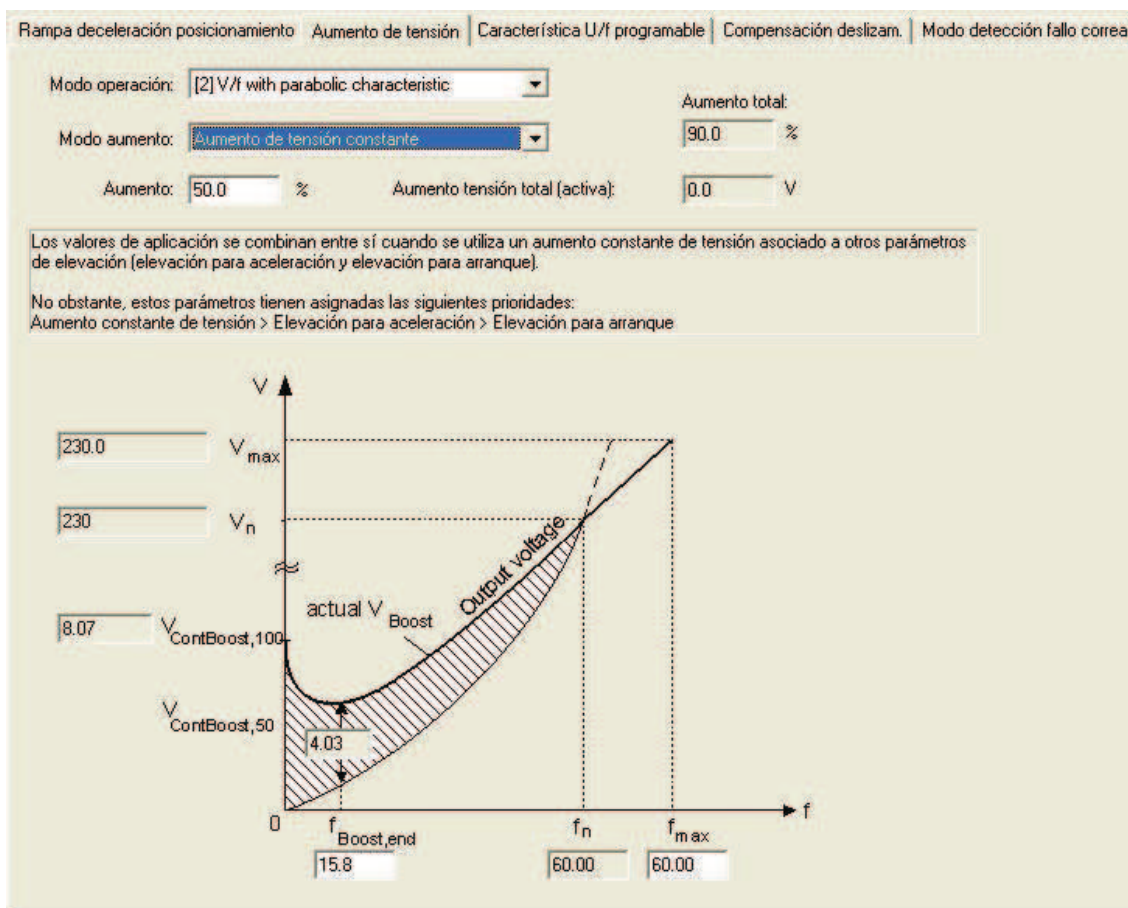


Figura 3.15. Booster de Tensión

Para el caso de las bombas no se requiere de un valor elevado, ya que las mismas no presentan una carga mayor a velocidades bajas, por lo que se puede utilizar los valores por defecto del variador indicados en la Figura 3.15.

Se configura ahora, los límites de operación del variador. Para esto se ingresa mediante el drive navigator a la opción de límites. Se presenta a continuación los valores configurados para el proyecto en la Figura 3.16.

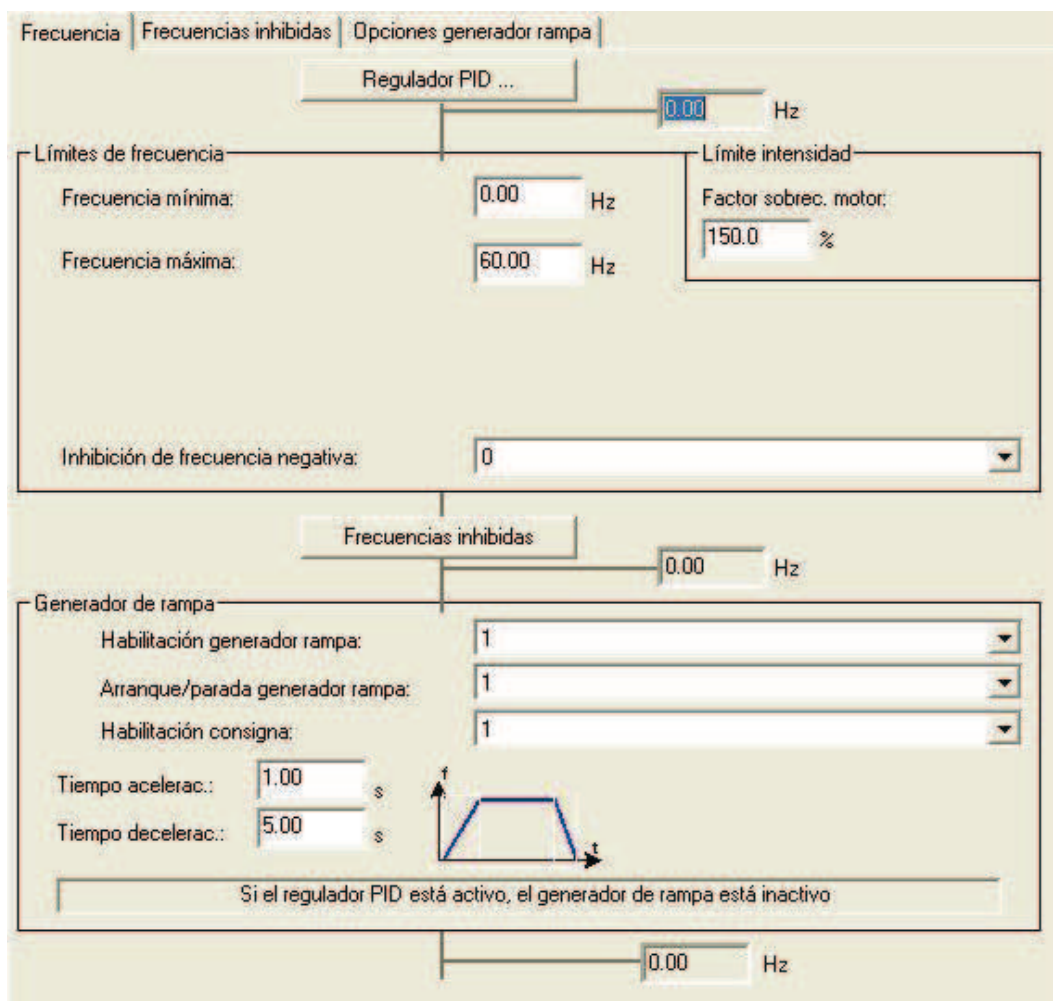


Figura 3.16. Límites de frecuencia y rampa para el variador

Los parámetros configurados en esta ventana son los siguientes:

P1080 [0] = 0 hz

P1082 [0] = 60 Hz

P1120 [0] = 1.00 s

P1121 [0] = 5.00 s

3.1.3.2 Configuración de entradas y salidas

Para la configuración de las entradas/ salidas se ingresa a bornes/bus del árbol del proyecto. En pantalla, se configura la función que tendrán las diferentes entradas digitales disponibles así como el funcionamiento de las mismas (PNP/NPN).

En la Tabla 3.2 se indica la configuración que deben tener las entradas/salidas digitales y analógicas para el proyecto.

CONFIGURACION ENTRADAS/SALIDAS D/A		
ENTRADA DIGITAL	PIN	FUNCION
DIN1	5	ON/OFF1
DIN3	7	RESET FALLA
SALIDA DIGITAL	PIN	FUNCION
DO1	18/19/20	DRIVE FUNCIONANDO
DO2	21/22	FALLA VARIADOR
ENTRADAS ANALÓGICAS	PIN	FUNCION
ADC1	3/4	RESERVADO
ADC2	10/11	TRANSMISOR DE PRESIÓN

Tabla 3.2. Configuración de E/S D/A

Configuración de las Entradas digitales:

En la siguiente figura se observa la configuración de las entradas digitales realizada en el proyecto.

Entradas digitales | Salidas digitales | Entradas analógicas | Salidas analógicas | USS/PROFIBUS | Interconexión de señales

Señales de mando procedentes de: [2] Terminal

¿Entrada digital activa con nivel alto o bajo?
 [1] PNP mode ==> high active

Señal intercon. con:

Entradas digitales: 1 X 5
 2 X 6
 3 X 7
 4 X 8
 5 X 16
 6 X 17
 AIN1/DIN7 X 3/4
 AIN2/DIN8 X 10/11

Tpo. rebote:
 [3] 12.3 ms debounce time

Asign. pred.:
 [1] ON/OFF1
 [0] Digital input disabled
 [9] Fault acknowledge
 [15] Fixed setpoint (Direct selecti
 [15] Fixed setpoint (Direct selecti
 [15] Fixed setpoint (Direct selecti
 [0] Digital input disabled
 [0] Digital input disabled

Nota: control de los bornes mediante tensión de alimentación de 24 V interna o externa (ver ayuda online).

Figura 3.17. Configuración de Entradas Digitales

Los parámetros utilizados en esta ventana son:

- P0700: Selección de la fuente de comando. El valor usado es 2, por tanto los mandos se reciben por la bornera de control.
- P0725: Tipo de entrada digital. Se utiliza el valor 1 que corresponde a señal PNP, con 1 lógico a 24 VDC.
- P0724: tiempo de rebote. Configura un tiempo en milisegundos para que la señal digital recibida en los bornes sea estable. El valor seleccionado es de 12.3 ms.
- P0701: Se configura con el valor 1. De esta manera la entrada digital 1, en el borne 5 permite arrancar y parar con rampa el motor. En otras palabras es la señal de encendido del sistema.
- P0702: Se configura con el valor 0. Esta entrada digital está deshabilitada pero se la tiene disponible en caso de cambios de operación a futuro.
- P0703: Se configura con el valor 9. De esta manera, la entrada digital 3, en el borne 7 permite reconocer fallas. Con lo cual el operador puede poner en marcha nuevamente el variador. Para llevar a cabo esta operación, el operario debe presionar la tecla F4 del panel operador instalado.

Configuración de Salidas Digitales:

Las salidas digitales, como se indica en la Tabla 3.2 son utilizadas para indicar el estado operativo del accionamiento variador + motor al operador. La configuración de las mismas se indica a continuación:

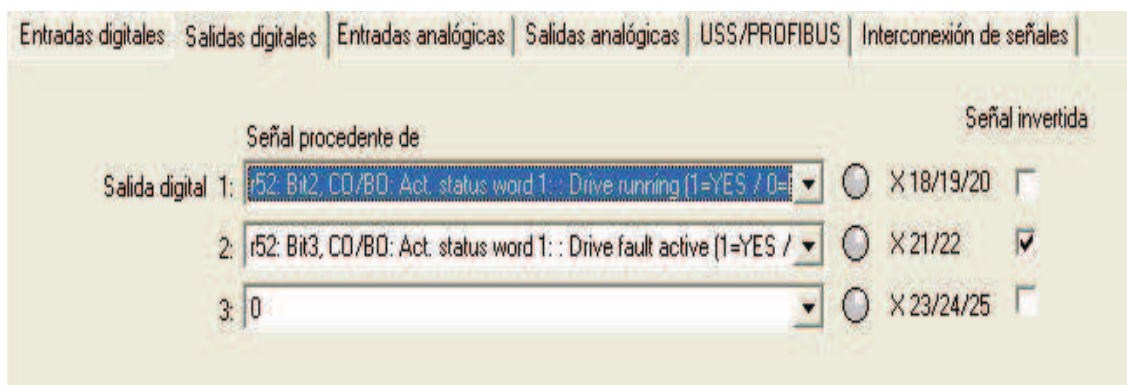


Figura 3.18. Configuración Salidas digitales

Los parámetros involucrados son los siguientes:

- P0731: este parámetro binector controla el funcionamiento del relé de los bornes 18/19/20. Para esto es necesario conectarlo a un binector de salida, que en este caso es el r52.2, que corresponde al bit de Drive Running de la palabra de estado. De esta manera se podrá encender una luz piloto indicando que el variador se encuentra operando.
- P0732: parámetro binector asociado a la salida digital de los bornes 21/22. Este parámetro ha sido asociado al bit 3 del binector de salida r52, que indica falla activa del variador. Como puede observarse esta salida ha sido invertida digitalmente, configurando el parámetro P748 en 1, que corresponde a poner un visto en la casilla junto al borne X21/22.

Entradas analógicas

De la Tabla 3.2 se observa que la entrada analógica 2 es utilizada para la señal del transmisor de presión. La configuración de la señal analógica se realiza tanto a nivel de software como de hardware.

Como se indicó en el capítulo anterior, para indicarle al variador que la señal que ingresa por el canal analógico es de corriente, se debe poner el interruptor del canal en la posición ON¹⁹.

Una vez realizado el paso anterior, se procede a la configuración por software de la entrada analógica, en la que la señal será escalada para generar un valor en tanto por ciento que será utilizado por el regulador PID. La siguiente figura se indica la configuración de la entrada analógica 2.

El interruptor DIP 2 del módulo de bornes debe estar ajustado a OFF.

Convertidor analógico/digital
[2] Unipolar current input (0 to 20 mA)

100.00 %
0.00 %
Banda muerta (+/-)
0.00 %

3.89 V 20.00 V +/- 0.00 V

V. real 83.13 % Referido al valor de referencia

La salida está interconectada con...
Valor real p2264[0], CI: PID feedback, 1st. Command da
13620 dec

Tabla valores ref.

N.º p.	Texto del parámetro	Valor	Unidad
p2000[0]	Reference frequency, 1st. Drive data set (DDS)	60.00	Hz
p2001[0]	Reference voltage, 1st. Drive data set (DDS)	1000	V
p2002[0]	Reference current, 1st. Drive data set (DDS)	50.00	A
p2003[0]	Reference torque, 1st. Drive data set (DDS)	41.16	Nm

Pérdida de señal
Tiempo de retardo 10 ms
Pérdida señal en convertidor A/D
Bit0: Signal lost on ADC 1 (0=NO)
Bit1: Signal lost on ADC 2 (0=NO)

Figura 3.19. Configuración del canal analógico

Los parámetros utilizados son:

- P0757 [1]: valor mínimo en mA del transmisor de corriente. Si bien el transmisor es de 4 a 20 mA, se pudo constatar haciendo uso de la herramienta Starter en conexión en línea que el valor de corriente cuando no existe presión en el sistema es de 3.89 mA.

¹⁹ Puede consultar la Figura 2.18. Interruptores de configuración de entrada analógica

- P0759 [1]: valor máximo del transmisor de presión. Se ha configurado con el valor de 20 mA.
- P0753 [1]: establece un tiempo de filtrado para la señal analógica. Configurado en 300 ms.

El valor escalado se puede visualizar en el conector de salida r754 [1]. Como se puede observar los parámetros en esta configuración utilizaron el índice 1 para indicar que corresponden al canal 2.

También indica la figura que la señal está interconectada mediante BICO con el parámetro P2264 que corresponde a la señal de feedback del regulador PID.

3.1.3.3 Regulador pid

El regulador PID del variador es el encargado de mantener la presión constante del sistema mediante la variación de la velocidad de la bomba. Cada variador hará uso de su propio regulador para calcular el valor de velocidad que debe tener la bomba y mantener la presión en el nivel de operación. La interfaz de Starter permite configurar todas las relaciones BICO para poner en funcionamiento el regulador PID.

El funcionamiento del regulador PID se puede apreciar en la Figura 3.20, en donde se destacan los parámetros de configuración fundamentales:

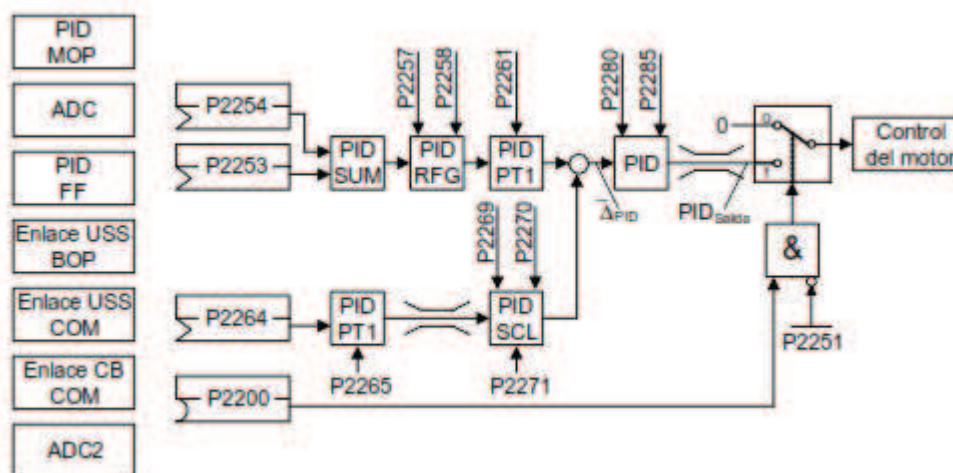


Figura 3.20. Regulador PID

- **P2200: Habilitación de PID.** Este parámetro se ha configurado con el valor de 1, lo que significa que para el primer juego de datos de comando (CDS = 0), el PID está siempre habilitado. La activación de este parámetro desactiva los tiempos de aceleración normales (P1121 y P1120).
- **P2251: Modo PID.** Este parámetro permite configurar con el valor 0 que indica que la salida del regulador PID será utilizada como consigna principal de frecuencia para el variador.
- **P2253: Fuente de consigna de PID principal.** Este conector de entrada se enlaza al parámetro r2250, lo que le permite leer el valor del potenciómetro motorizado de PID, que es un valor porcentual fijo escrito en el parámetro P2240.
- **P2254: Fuente de compensación.** Permite seleccionar una señal cuyo valor será añadido a P2253 para compensar el comportamiento observado. Este parámetro se deja en 0, ya que no se requiere.
- **P2257, P2258:** configuran los tiempos de aceleración y desaceleración de la consigna de PID. Ambos se configuran con el valor de 1 segundo.
- **P2264: Fuente de señal de retroalimentación.** Es un conector de entrada que será conectada al canal analógico 2, en donde a su vez está conectado el transmisor de presión. Para esto se hace la conexión bico con el conector r755[1].
- **P2270:** permite aplicar funciones matemáticas a la señal de retroalimentación. Para este caso no será utilizada, ya que el transmisor de presión entrega una señal lineal. El valor configurado es 0.

- **P2271:** define el tipo de transductor utilizado. Permite alterar el signo de la señal de retroalimentación. Debe ser configurado de tal manera que se produzca la respuesta deseada. Por ejemplo, si el error entre la consigna y la señal medida aumenta, la respuesta esperada es aumentar la salida PID para compensar. Cuando el comportamiento observado es el señalado, se utiliza el valor 0.
- **P2280:** Ganancia Proporcional. El valor configurado es 3.5.
- **P2285:** Tiempo de Integración. El valor configurado es 5.
- **P2291:** límite superior de salida del PID. El valor máximo es 100%.
- **P2292:** límite inferior de salida del PID. El valor mínimo es 40%.

En la Figura 3.21 se observa la activación y configuración del regulador PID antes descrita utilizando el software Starter.

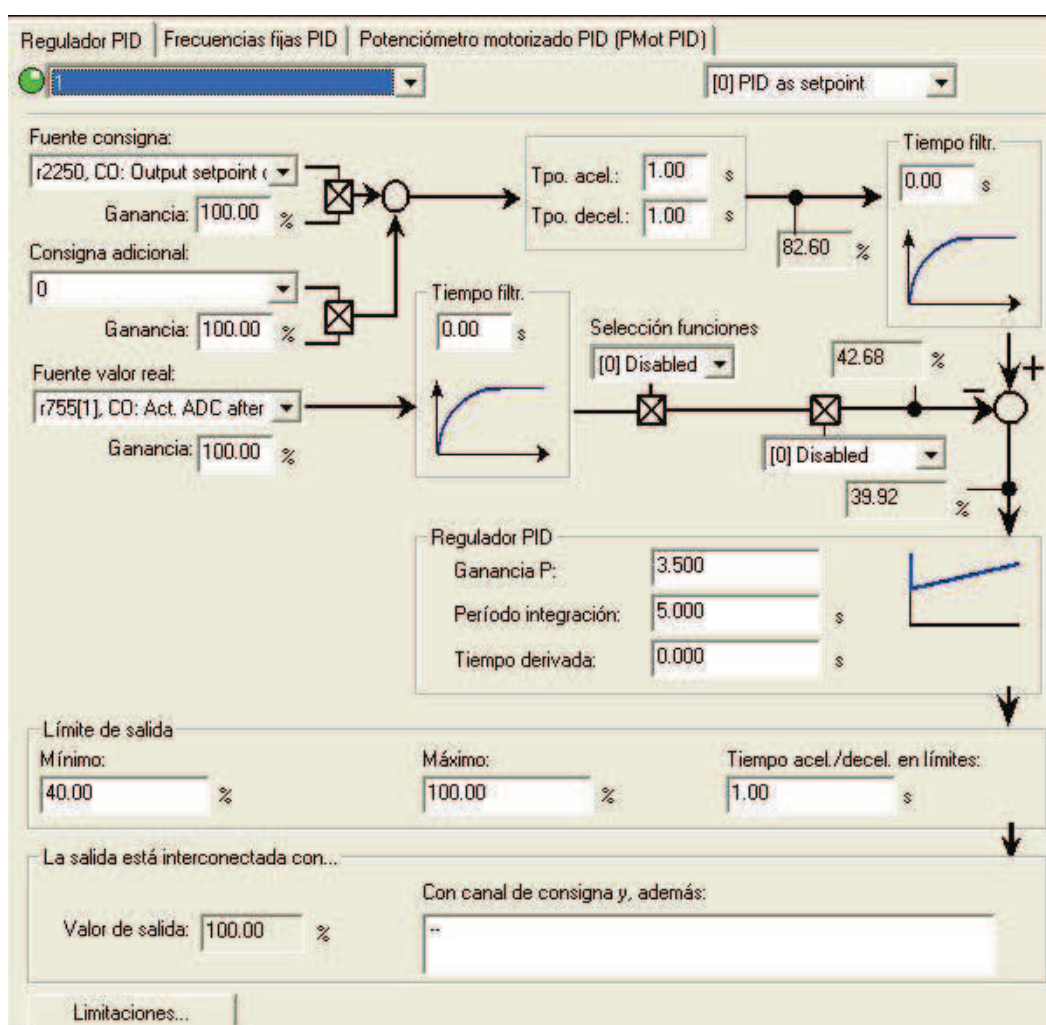


Figura 3.21. Configuración del Regulador PID

Los valores de los parámetros utilizados en la configuración del PID se resumen a continuación:

- P2200 = 1, lo que significa que para el primer juego de datos de comando (CDS = 0), el PID está siempre habilitado.
- P2251= 0. La salida del PID es utilizada como consigna de frecuencia para el variador.
- P2280 = 3.5. Ganancia Proporcional del regulador PID.
- P2285 = 5.0. tiempo de integración del regulador PID
- P2291 = 100.00 %. La salida del regulador PID alcanza hasta el 100%, esto es 60 Hz.
- P2292 = 50.00%. El regulador PID tiene como límite mínimo 50%, esto es 30 Hz.
- P2267 = 100%. Define el límite máximo de la señal de retroalimentación
- P2267 = -200%. Define el límite mínimo para la señal de retroalimentación. Si este valor se pone a 0 y eventualmente el transmisor emite una señal negativa se produce una alarma que indica el desborde del transmisor. Esto normalmente se presenta cuando la presión del manifold está vacía.

Las interconexiones BICO que deben realizarse son las siguientes:

- **P2253 = r2250.** La consigna de PID es el conector de salida que visualiza el valor del potenciómetro motorizado PID. El valor de este potenciómetro se escribe en el parámetro P2240. Para el presente proyecto el valor de P2240 corresponde a la presión que desea el cliente mantener constante. En este caso se trata de 120 psi. Si se escala este valor, para compararlo con el valor escalado previamente para el transmisor de presión en la configuración de la entrada analógica respectiva, se obtiene un valor de 82.6%.

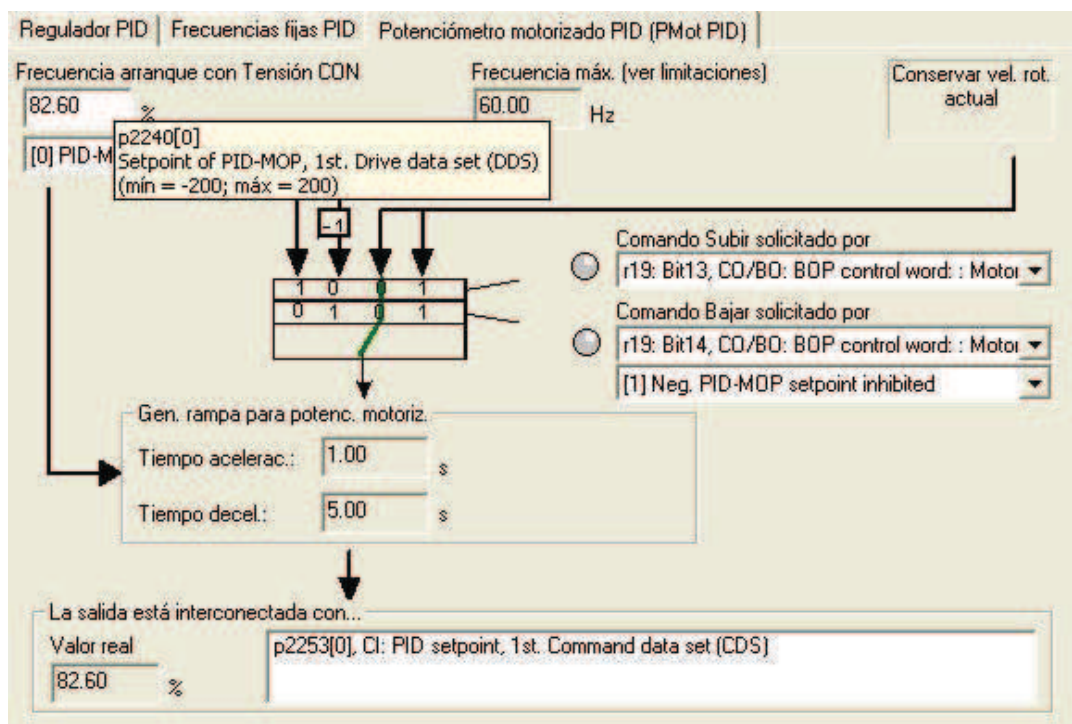


Figura 3.22. Potenciómetro Motorizado

- **P2264 = r755 [1]**. Asigna la salida de conector correspondiente al valor de la entrada analógica del canal 2 escalado al conector de entrada correspondiente a la señal de retroalimentación para el PID.

Los valores de las ganancias Proporcional e Integral son obtenidos usando la función de auto - sintonización del variador Micromaster 440. Para esto se pone el parámetro P2350 en 1 y se da un pulso de arranque al variador. Inmediatamente, el variador indicará una alarma relacionada con la auto - sintonización. Una vez terminada se obtiene un juego de datos con los que se puede empezar a optimizar manualmente la respuesta del regulador PID.

3.2 PROGRAMACION DEL PLC

El desarrollo de los primeros PLCs empezó en la década de 1970. Desde ahí en adelante la tecnología, capacidades y características de los mismos han venido evolucionando, permitiendo acoplarse a las exigencias cambiantes de la industria. Cada vez se dispone de equipos más rápidos y capaces de integrar una gran cantidad de señales digitales y analógicas. Así mismo, las

capacidades de comunicación de los PLCs son cada vez más abiertas integrando buses de campo estándares. El software de programación de los mismos también ha sido mejorado permitiendo la integración de reguladores PID, reguladores difusos y funciones matemáticas complejas.

3.2.1 LOGOSOFT

El PLC utilizado para llevar a cabo las tareas de control del sistema es el PLC Logo de Siemens. El entorno de programación para dicho PLC se conoce como Siemens Logosoft Comfort.

Logosoft es un entorno gráfico de programación sobre la base de Java. Permite la programación, configuración, simulación y diagnóstico en línea del programa. No todas las versiones de PLCs Logo soportan todas las funcionalidades actuales del entorno de programación. No obstante se puede determinar en línea la versión del PLC Logo utilizado y las funciones que están disponibles para el mismo.

Los programas en Logosoft se pueden escribir en 2 lenguajes a saber: Kop y FUP. El primero permite la programación mediante un esquema de contactos similar al lenguaje ladder comúnmente utilizado entre los autómatas programables. El segundo es un diagrama de funciones similar al lenguaje FBD.

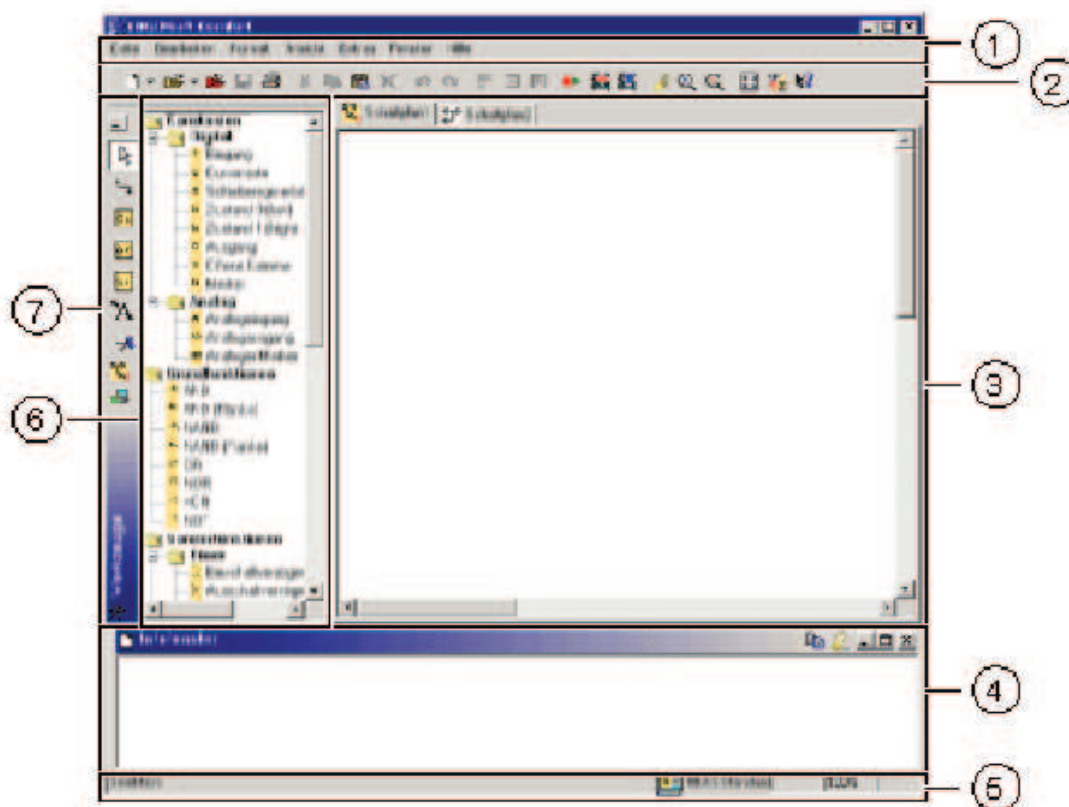


Figura 3.23. Entorno de Programación Logosoft

En la Figura 3.23 se muestra el entorno de programación del Logosoft. Entre las principales partes se tiene:

1. Barras de menús:
2. Barra de herramientas estándar: se encuentran opciones de propósito general como subir programa, descargar programa, start/stop programa, cambiar de KOP a FUP, opciones de alineación etc.
3. Interfaz de programación: es el área de trabajo en la que se escribe el programa.
4. Ventana de información: se indica estado de procesos o errores en el programa.
5. Barra de estado: Indica la versión del PLC.
6. Constantes, conectores, funciones básicas y especiales.
7. Barra de herramientas: contiene botones relacionados a tareas de programación tales como: conectar, ver conectores, ver funciones

especiales, insertar comentarios, iniciar simulación, conexión en línea, etc.

Para realizar la descarga del programa al PLC se requiere de un cable de programación USB similar al que se Figura 3.24:



Figura 3.24. Cable de Programación Logo USB

3.2.1.1 Conectores y marcas

El término conector se utiliza para designar todas las conexiones y estados del PLC Logo. Se entienden por tanto como conectores, las entradas y salidas digitales o analógicas. En la siguiente tabla se indica los conectores que el sistema de PLCs Logo dispone:

Conectores	LOGO! Basic / Pure		DM	AM	AM2AQ
Entradas	LOGO! 230RC/RCo, LOGO! 24 RC/RCo	Dos grupos: I1...I4 e I5...I8	I9...I24	A1...A18	Ninguna
	LOGO! 12/24RC/RCo, LOGO! 24/24o	I1,I2, I3-I6, I7, I8 AI3,AI4...AI1, AI2	I9 ... I24	A15...A18	
Salidas	Q1...Q4		Q5...Q16	Ninguna	AQ1, AQ2
lo	Señales lógicas '0' (off)				
hi	Señales lógicas '1' (on)				
x	Conexión existente no utilizada				

Tabla 3.3. Conectores del PLC Logo.

Los conectores de entrada digital se identifican por la letra I seguida de un número que va del 1 al 24, que corresponde al total de expansión que puede tener el PLC Logo. Por su parte, los conectores de entrada analógica se designan por las letras AI seguidas de un número que va del 1 al 8. Las salidas digitales están designadas por la letra Q, seguida de un número entre el 1 al 16 y las salidas analógicas por las letras AQ. De estas últimas para un sistema Logo cualquiera sólo pueden existir hasta 2, por lo que la numeración está entre el 1 y el 2. La numeración de las distintas entradas y salidas se hace en función del orden de montaje de los módulos. Adicionalmente, también se consideran conectores las teclas de función F1 a F4 del panel Logo TD, los cursores C1 a C4 del panel frontal del PLC.

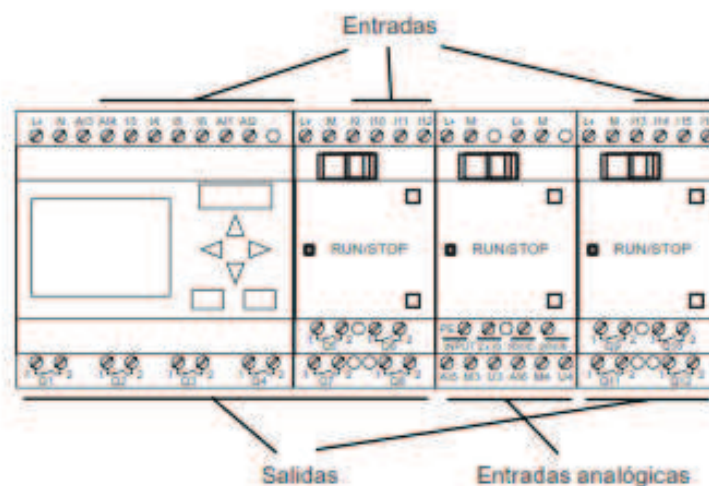


Figura 3.25. PLC Logo y varios módulos.

Las marcas son salidas virtuales que devuelven el valor de sus entradas. Sirven como bloques de memoria, ya que su valor no se modifica dentro del mismo ciclo de programa, por tanto tiene siempre la señal del ciclo anterior. Logo dispone de 27 marcas digitales y 6 analógicas. Existen marcas con funciones especiales pre-asignadas, como la Marca M26 que controla la retro-iluminación del panel Logo Td.

Las constantes, por su parte, son señales siempre 1 o 0, pueden ser usadas para habilitar funciones que deban estar siempre en funcionamiento.

3.2.2 CONFIGURACIÓN DEL PLC

La configuración de entradas – salidas del PLC logo está determinada por la posición que ocupan los diferentes módulos al ser montados. Para el presente proyecto, el logo utilizado es de la serie 12/24RC, versión 6. La distribución de conectores es la indicada en la siguiente tabla:

	Entradas Digitales	Función	Salidas Digitales	Función
PLC 6ED1052-1MD00-0BA6	I1	Manual Bomba1	Q1	Encendido Bomba1
	I2	Automático Bomba1	Q2	Reserva
	I3	Manual Bomba2	Q3	Encendido Bomba2
	I4	Automático Bomba2	Q4	Reserva
	I5	Señal de bomba1 vacío		
	I6	Señal de bomba2 vacío		
	I7	Nivel de agua en cisterna 1		
	I8	Nivel de agua en cisterna 2		
DM8 6ED1055-1MB00-0BA1	I9	Falla Variador 1	Q5	Reset Fallas Variadores
	I10	Falla Variador 2	Q6	Ventilador 1
	I11	Sin Conexión	Q7	Ventilador 2
	I12	Sin Conexión	Q8	Sin Conexión
AM2 6ED1055-1MA00-0BA0	Entradas Analógicas	Función		
	A13	Transmisor de presión		

Tabla 3.4. Mapa de Entradas/Salidas Digitales/Análogas del PLC

El módulo analógico interpreta la señal eléctrica de corriente de sensor haciendo una conversión Análoga Digital. Por defecto, Logo transformará de manera interna los valores de 4 a 20 mA del transmisor en valores enteros de 200 a 1000. Este valor se conoce como valor normalizado y puede ser visualizado en la pantalla de Logo o mediante el software.

Para poder visualizar y trabajar con un valor proporcional al medido por el transmisor de presión, se requiere transformar el valor normalizado obtenido internamente por el PLC. Para esto, los bloques de funciones analógicas permiten aplicar un valor de ganancia y offset al valor normalizado, de la siguiente manera:

$$Valor_{analógico} = valor_{normalizado} * Gain + Offset \quad \text{Ec. 3.1}$$

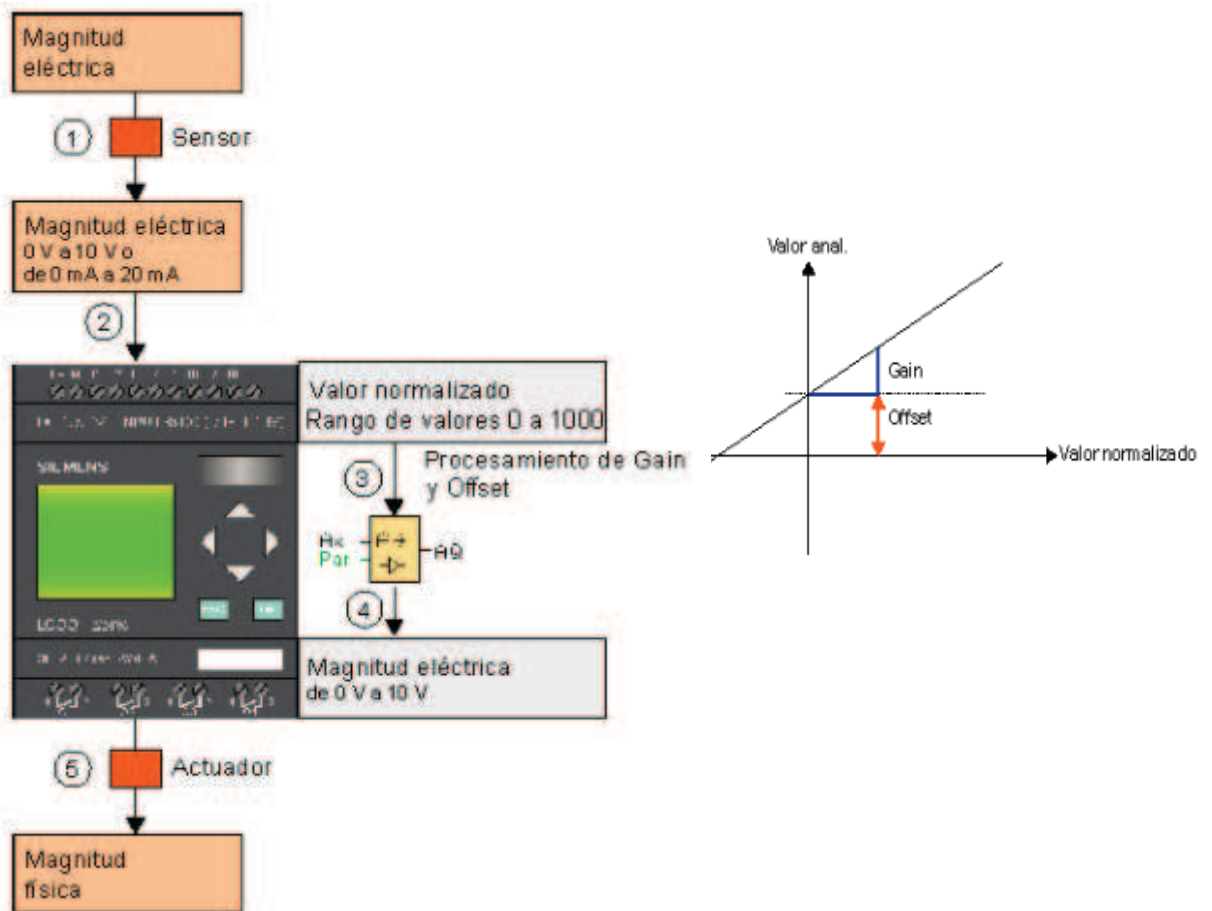


Figura 3.26. Proceso de conversión Análoga Digital del Logo.

Dado que el transmisor de presión convierte una señal de 0 a 150 psi en una salida de corriente de 4 a 20 mA, para poder indicar dicho valor en unidades de ingeniería (PSI) se realiza el ajuste del valor normalizado (200 a 1000), mediante la Ec. 3.1. o utilizando el asistente de configuración del bloque de función análoga. En cualquier caso, se debe recordar que Logo utiliza únicamente valores enteros para sus cálculos de ahí que se obtienen los siguientes valores:

$$Gain = 0.18$$

$$Offset = -36$$

Para cuando el valor normalizado es de 1000, se obtiene reemplazando en Ec. 3.1.

$$1000 * 0.18 - 36 = 144$$

En la Figura 3.27 se muestra la configuración del conmutador analógico de valor umbral utilizado en el programa del PLC. El valor analógico obtenido de acuerdo a los parámetros indicados es el que se utiliza para indicar en la pantalla de Texto (Logo TD), el valor de presión actual del sistema.

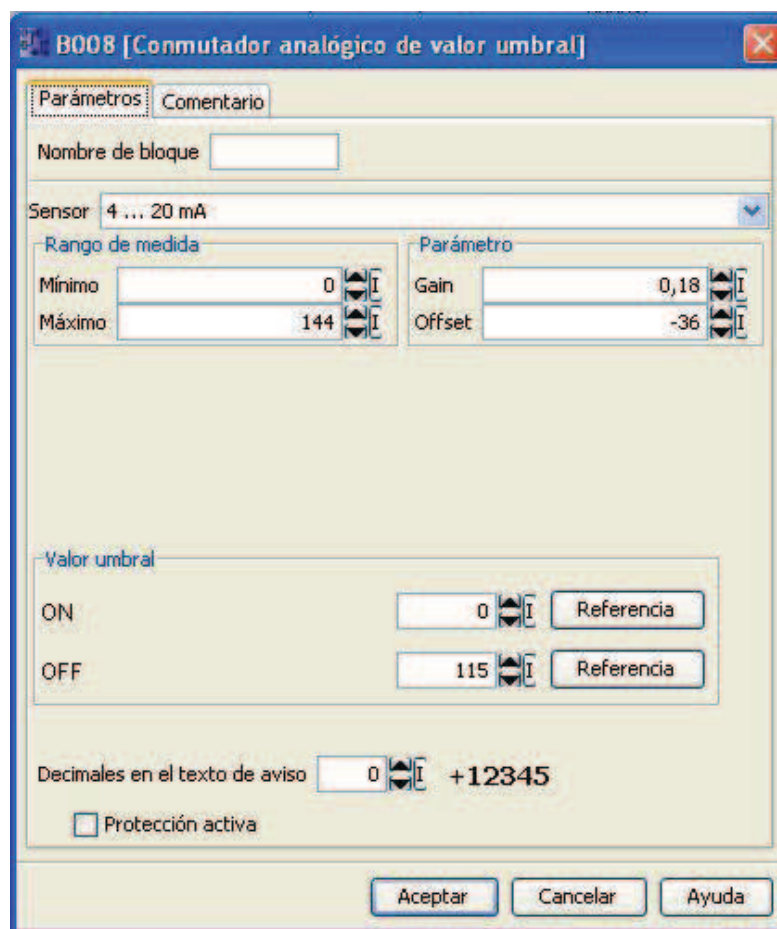


Figura 3.27. Configuración Valor analógico del transmisor

El rango de medida queda en los valores indicados en la figura, debido a que LOGO realiza cálculos aritméticos enteros únicamente. Por tanto no acepta como valor máximo el de 150. Esta es una limitación propia del equipo.

3.2.3 PROGRAMA Y DIAGRAMA DE FLUJO

El PLC está encargado de coordinar el funcionamiento de los variadores del sistema de presión constante. Las diferentes acciones que el PLC decida se toman en función del estado actual del sistema. Para esto, se utiliza la señal del transmisor de presión, la señal del Liqtec para conocer el nivel de líquido en el cabezal de la bomba y la señal de un flotador para conocer el nivel de líquido de la cisterna de alimentación.

Con el juego de señales antes indicadas, el PLC puede activar la bomba principal para la operación normal del sistema. Si la bomba principal, su variador o nivel de líquido en reservorio fallaran, se debe encender la bomba auxiliar.

Cuando existe despresurización excesiva en el sistema debida al consumo, será necesario encender ambas bombas para poder compensar el consumo excesivo por parte de la planta. De igual manera, si se activa alguna señal de protección de bomba, quedará operando la bomba que no tenga dicho problema.

En caso de que la presión del sistema suba más de 125 psi, se desconectarán las bombas inmediatamente y serán reactivadas cuando la demanda de agua sea requerida nuevamente.

En la Figura 3.28 se indica el diagrama de flujo antes descrito.

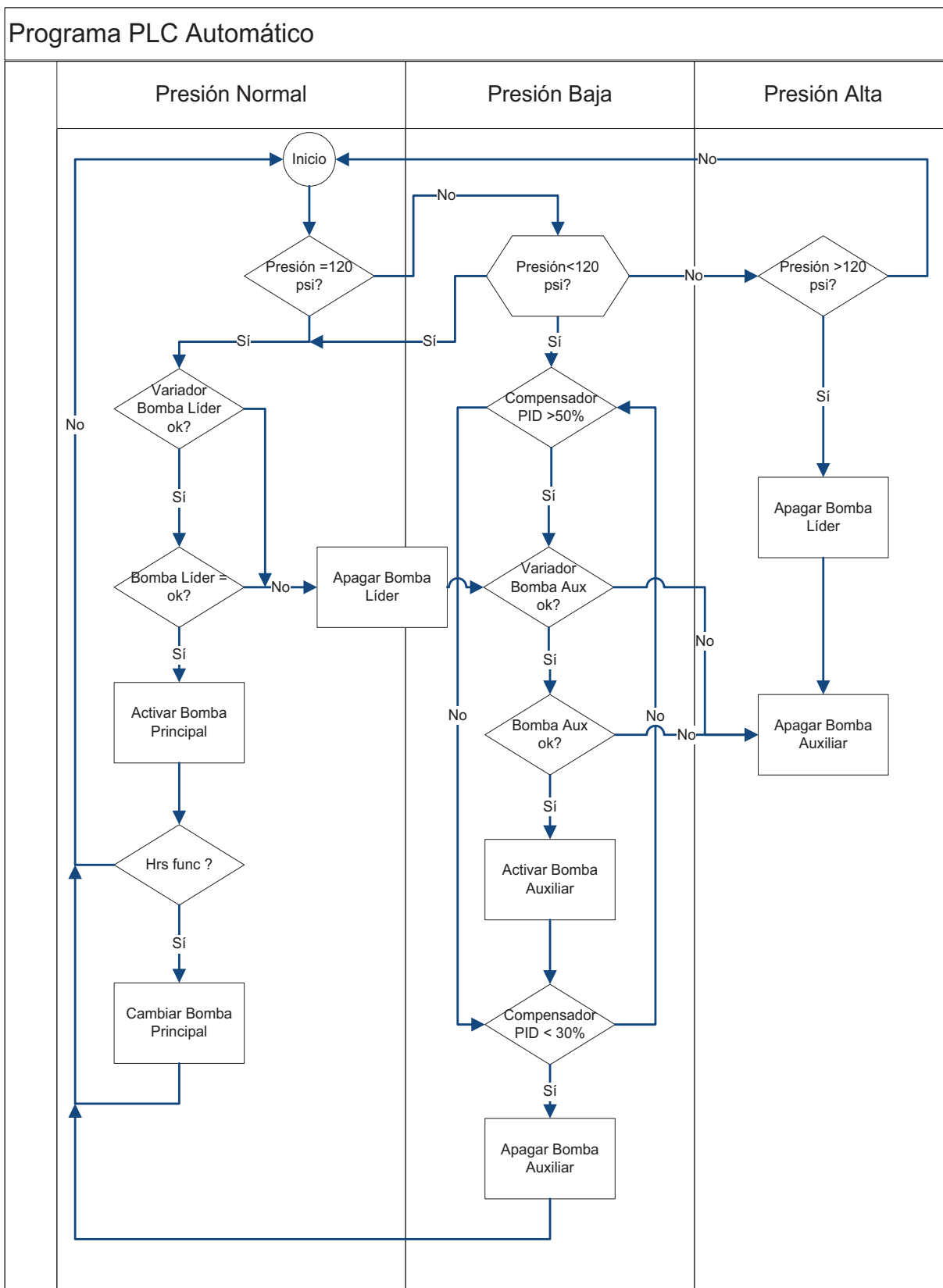


Figura 3.28. Diagrama de Flujo PLC

El encendido y apagado de la bomba auxiliar debido a cambios en la presión del sistema se obtiene revisando el valor de compensación calculado por el bloque B050 (regulador proporcional – integral). La consigna fija tiene un valor de 115 psi, y la señal de retroalimentación está conectada al transmisor de presión del sistema en la entrada analógica AI3. Los valores usados para las ganancias y proporcional son los valores que por defecto tiene el Logo.

La salida del bloque regulador PI produce un valor de 0 a 1000 que se puede conectar a una salida analógica, convirtiendo la señal en un valor de 0 a 10 Vdc. En el caso particular del programa, la señal no se conecta a ninguna salida analógica, sino que es comparada. Cuando el valor de la salida del bloque B050 es mayor que 50%, se encenderá la bomba auxiliar. Ésta permanecerá encendida hasta que el valor disminuya a menos de 30%. La ventaja principal de utilizar el regulador PI es que permite encender la bomba auxiliar de manera dinámica atendiendo al requerimiento de la planta. De esta manera la bomba auxiliar se enciende atendiendo despresurizaciones de 20 psi cuando mucho, manteniendo la presión constante y sacando de operación la bomba auxiliar de manera dinámica previniendo cavitación cuando la presión es mantenida con una sola bomba.

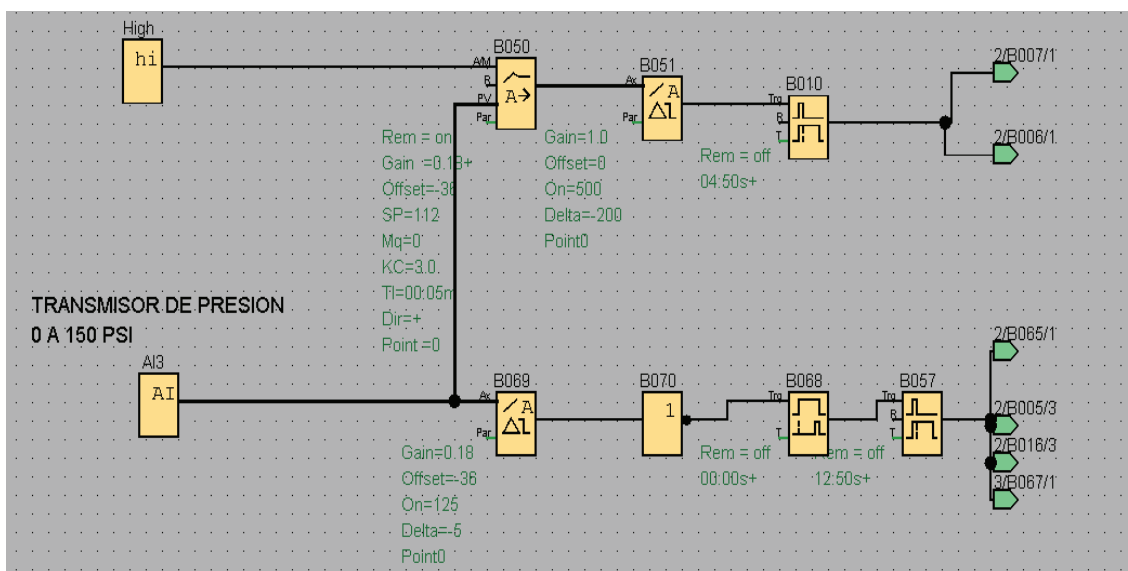


Figura 3.29. Activación de Bomba Auxiliar

El programa realizado utiliza el lenguaje FUP con los bloques de funciones especiales para cumplir con los requisitos del programa. Por ejemplo, para llevar a cabo la conmutación semanal de las bombas se utiliza el bloque de función conocido como temporizador semanal. Este bloque se configura para dar una salida tipo pulso cada domingo a las 22:30 hrs. La salida se utiliza para cambiar el valor de tres contadores. Dependiendo del valor se activará la bomba 1 o 2 y el ciclo se repite al resetear los contadores.

En la Figura 3.30 se puede ver parte del código implementado en el PLC.

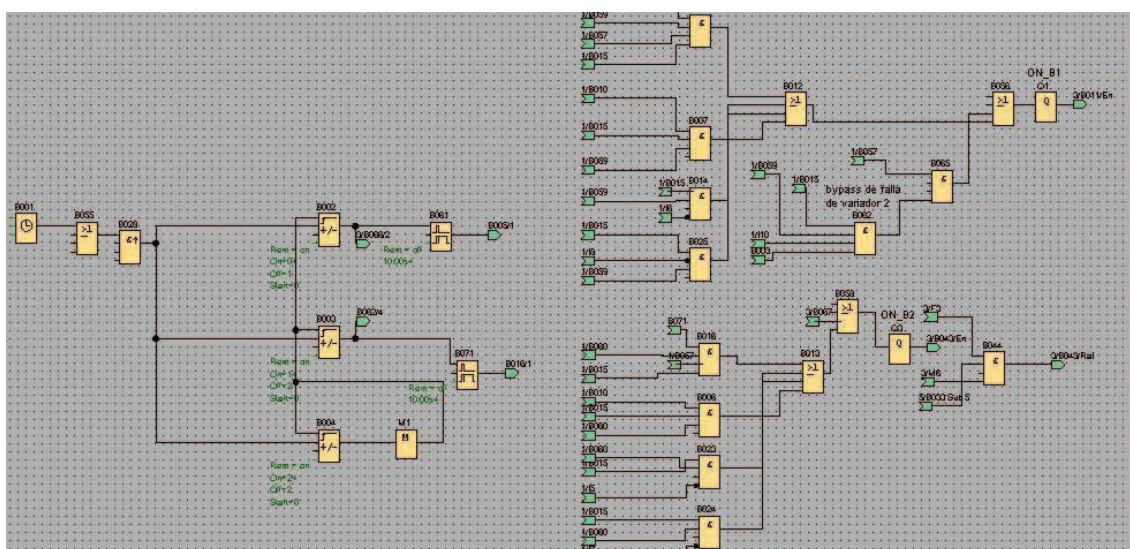


Figura 3.30. Parte del programa implementado en el PLC

El código indicado tiene relación con el funcionamiento alternado de los variadores y la respuesta a eventos de fallas mecánicas y eléctricas del sistema.

3.2.4 CONFIGURACIÓN PANEL DE TEXTO

Para facilitar la visualización del estado del sistema así como los eventos de alarma y falla del mismo, se instala el Panel Logo TD. Si bien este panel permite visualizar textos definidos previamente en el programa, se lleva a cabo una programación en el Logosoft para facilitar el avance entre varias pantallas. De esta manera se definen 6 pantallas de sistema. Las teclas F1 a F4 que

integra el panel se utilizan de la siguiente manera para integrar activamente al Panel como dispositivo de entrada:

F1: Tecla de retroceso. Retorna a la pantalla anterior

F2: Tecla de avance. Ir a la siguiente pantalla

F3: Resetear contador de horas de mantenimiento.

F4: Reset de fallas del variador. Permite resetear desde el panel la ocurrencia de una falla del variador.

La configuración principal del funcionamiento del display de texto se la realiza ingresando a Archivo/Configuración de display de texto, en el Logosoft. En la Figura 3.31 se muestra los parámetros de configuración.

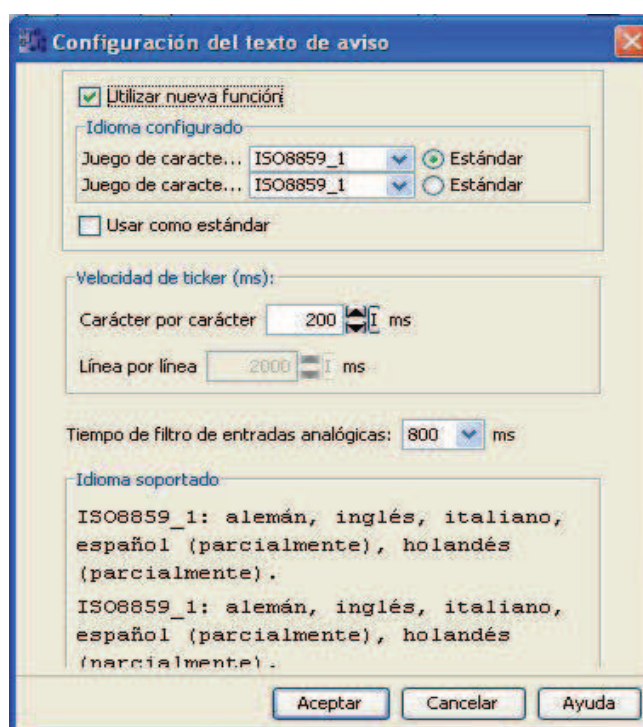


Figura 3.31. Configuración Básica Logo TD

Las versiones 6 en adelante permiten la utilización de nuevas funciones de texto tales como: gráficos de barra, desplazamiento de caracteres, entre otras.

Para el diseño de los mensajes de texto se utiliza el bloque de función llamado texto de aviso. Los atributos principales de este bloque de función se exponen en la Figura 3.32.

Conexión	Descripción
Entrada En	Al cambiar de 0 a 1 el estado en la entrada En (Enable) se inicia la visualización del texto de aviso.
Entrada P	P es la prioridad del texto de aviso. 0 es la prioridad más baja y 127 la más alta. Ack: Acuse del texto del aviso
Parámetros	<p>Text: Entrada del texto de aviso</p> <p>Par: Parámetro o valor real de otra función ya programada que puede visualizarse de forma numérica o en un diagrama de barras (consulte "Parámetros o valores reales visualizables")</p> <p>Time: Visualización de la hora continuamente actualizada</p> <p>Date: Visualización de la fecha continuamente actualizada</p> <p>EnTime: Visualización de la hora de cambio de estado de 0 a 1 en la entrada En</p> <p>EnDate: Visualización de la fecha de cambio de estado de 0 a 1 en la entrada En</p> <p>Nombres de estado de E/S: Visualización del nombre de un estado de entrada o salida digital, p. ej. "On" u "Off"</p> <p>Entrada analógica: Indicación del valor de la entrada analógica que debe visualizarse en el texto de aviso y actualizarse conforme al tiempo analógico</p>
Salida Q	Q permanece activada mientras está pendiente el texto de aviso.

Figura 3.32. Atributos del texto de aviso

Al hacer doble clic en el bloque aparece la ventana indicada en la Figura 3.33. En la parte denominada texto de aviso es en donde se escribe la información a mostrar en pantalla. Como puede observarse, se dispone de 4 líneas de 24 caracteres. En la pantalla se visualiza únicamente 12 caracteres. Para visualizar información adicional escrita en los 12 caracteres del lado derecho, se puede activar la configuración del ticker, que permite reemplazar cada uno de los caracteres o líneas de manera cíclica según la velocidad definida en la configuración del texto de aviso.

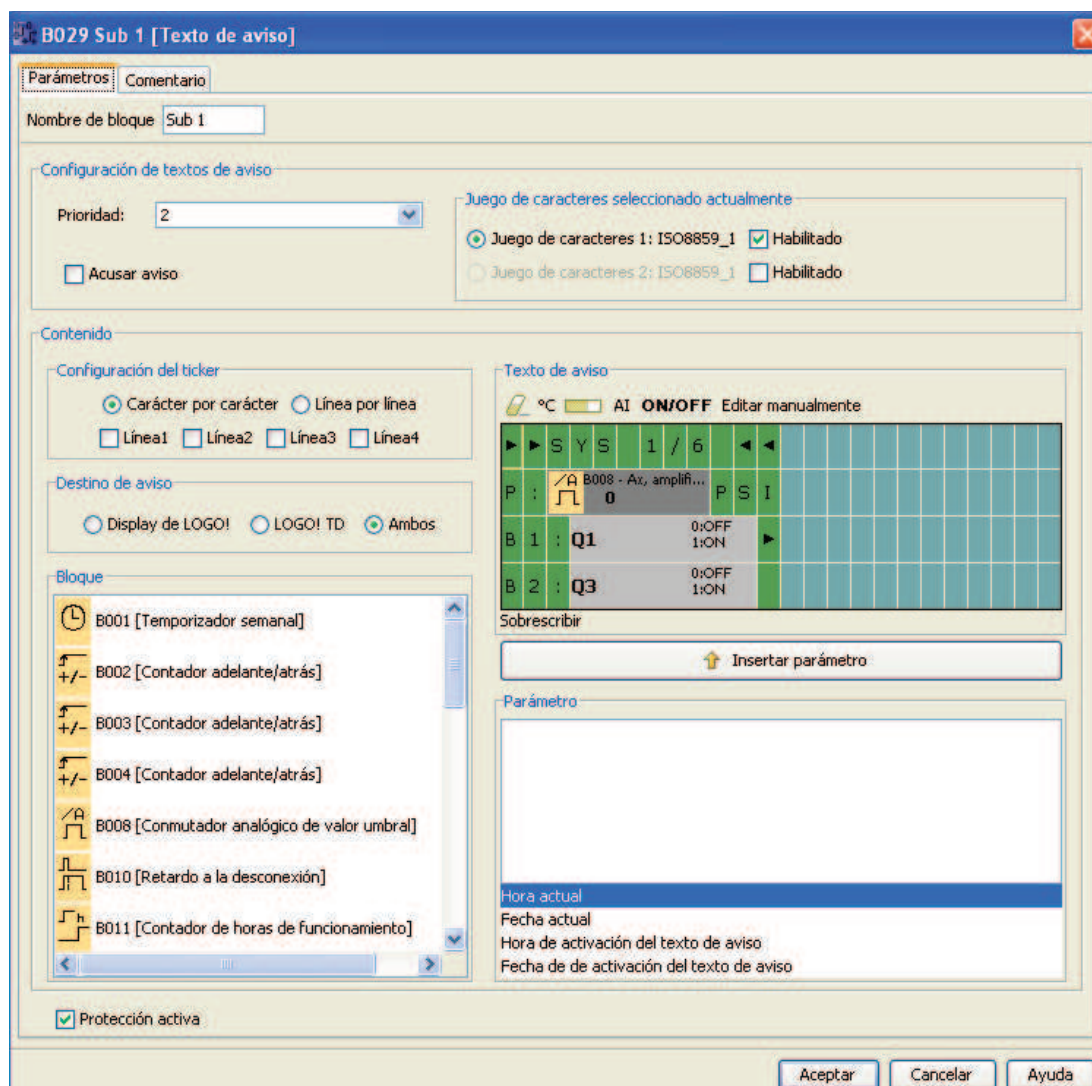


Figura 3.33. Texto de aviso

Para indicar la información que contiene un bloque de función, se selecciona el bloque correspondiente del área Bloque. Por ejemplo, en la Figura 3.33 se utiliza el valor analógico calculado por la función de conmutador analógico B008, para indicar la presión actual del sistema.

También se puede indicar el estado de entradas o salidas digitales. Para lo cual se hace clic en el botón ON/OFF en la parte superior del área de escritura.

Los mensajes de texto disponen de valores de prioridad, lo que permite configurar mensajes de alarma, los mismos que al activarse deben ser

visualizados por encima del mensaje de texto actual. La prioridad más alta se designa con el valor 30 y con 0 la prioridad más baja.

Se configuraron para el proyecto 6 pantallas de estado de la siguiente manera:

1. Pantalla inicial. Indica la fecha y hora actuales:

P	A	S	T	E	U	R	I	Z	A	D
Q	U	I	T	O						
M	o		0	0	:	0	5			▶
2	0	1	2	-	1	1	-	1	2	

Figura 3.34. Pantalla inicial

2. Pantalla de Estado: Indica la presión del sistema y el estado de las bombas funcionando:

▶	▶	S	Y	S		1	/	6		◀	◀	
P	:					1	2	0		P	S	I
B	1	:	O	N								▶
B	2	:	O	F	F							

Figura 3.35. Pantalla 1

3. Nivel de agua en la cisterna: indica si la cisterna de toma de agua no se encuentra vacía.

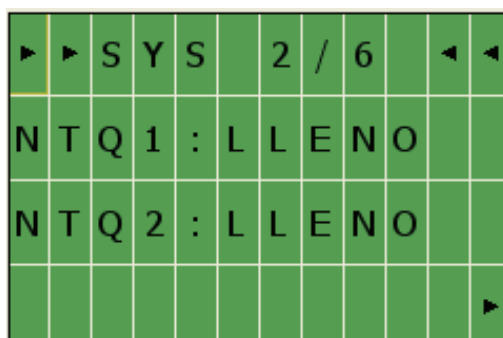


Figura 3.36. Pantalla 2

4. Nivel de agua en la bomba: mediante el dispositivo Liqtec, se conoce si la bomba está debidamente cebada y no hay ingreso de aire a la misma.

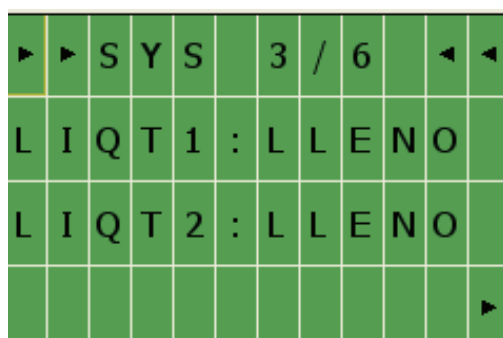


Figura 3.37. Pantalla 3

5. Horas de funcionamiento del sistema: Permite ver el número de horas operando el sistema desde última transición de bombas.

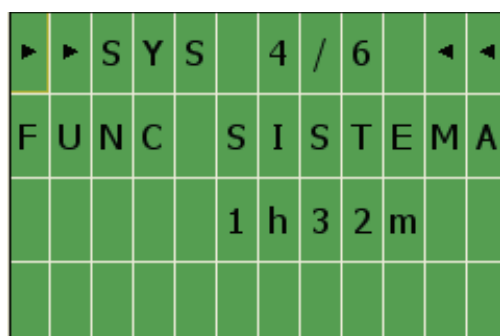


Figura 3.38. Pantalla 4.

6. Mantenimiento preventivo de bombas: Indica el tiempo restante para hacer un mantenimiento de 5000 hrs. También indica el tiempo de funcionamiento total de las bombas.

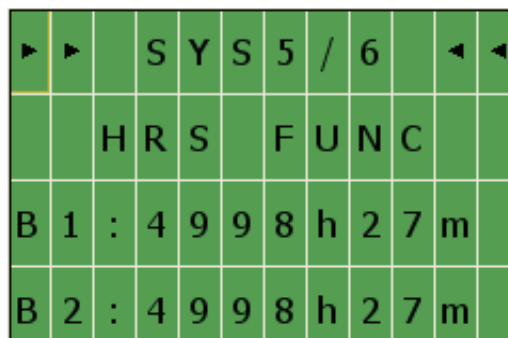


Figura 3.39. Pantalla 5.

Los mensajes de alarma y falla son disparados con las prioridades más altas según los eventos la activación de las mismas mediante sus entradas digitales correspondientes.

En la Figura 3.40 se observa parte del código utilizado para la transición entre pantallas de sistema.

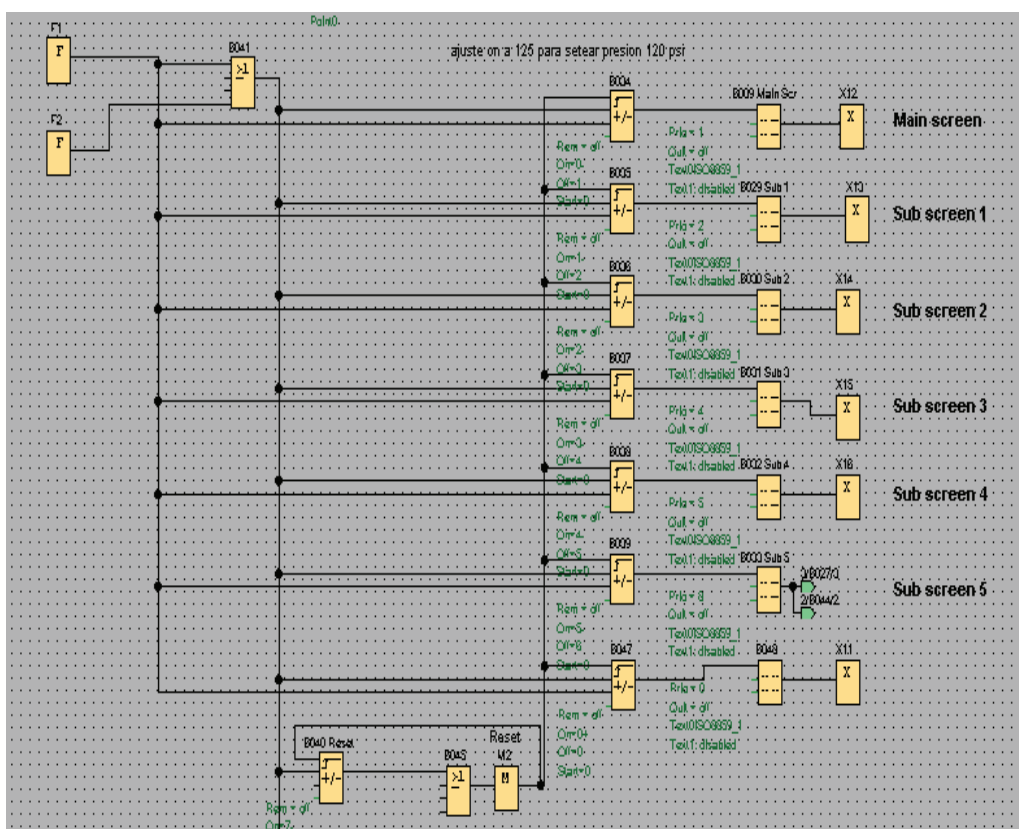


Figura 3.40. Código de manipulación de pantallas de sistema

CAPÍTULO 4 PRUEBAS Y RESULTADOS

Dado que el tablero elaborado es un sistema que combina la electrónica de potencia de los variadores de frecuencia, para actuar sobre las bombas instaladas, con el mando dictado por el PLC, que coordina el funcionamiento general del sistema, es necesario realizar un proceso de pruebas que va desde la verificación de conexiones eléctricas hasta la respuesta dinámica del sistema frente a perturbaciones.

En el diagrama de flujo indicado en la Figura 4.1 se puede observar un resumen esquemático de las pruebas realizadas al tablero. En general las pruebas son divididas en 3 partes:

- Pruebas Generales Eléctricas
- Pruebas Lógicas
- Pruebas de Desempeño Dinámico

4.1 PRUEBAS GENERALES ELÉCTRICAS

Con el Tablero ensamblado se procede a realizar la conexión de la alimentación trifásica principal, la misma que será conectada al interruptor termomagnético principal del tablero. Se toman lecturas de los valores de tensión trifásica. El voltaje medido es de 218 Vac, que está dentro del rango.

Se procede ahora a verificar el estado de los fusibles rápidos así como de los fusibles de control. Los fusibles rápidos se instalan en los seccionadores trifásicos mientras que los fusibles de control se instalan en sus respectivas borneras portafusibles y se procede a energizar el tablero. Se constata los niveles de tensión en potencia y control. La tensión de control obtenida mediante la fuente es estable con un valor de 24VDC. También se verifica el encendido normal de los variadores y el PLC. No existen fusibles quemados ni cortocircuitos. Se configura, finalmente, los niveles de vigilancia del supervisor de tensión instalado en 200 Vac para desconexión por bajo voltaje y 240 por sobrevoltaje.

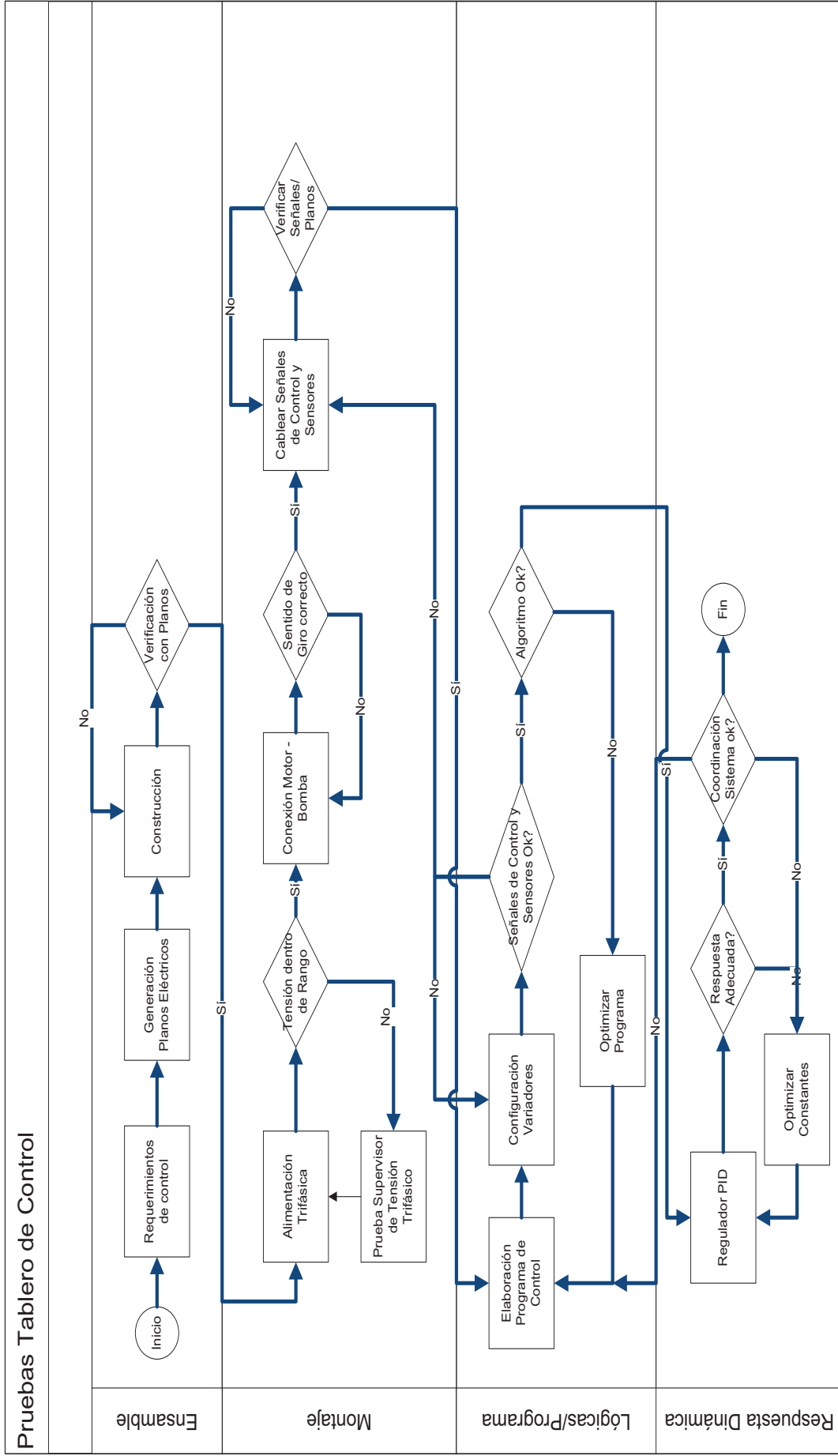


Figura 4.1.1. Diagrama de Flujo de Pruebas.

Nuevamente se desconecta el tablero, para realizar la conexión segura de los cables motor - variador. Se verifica que el diámetro del cable utilizado por los motores sea el adecuado. Para esto se puede utilizar como referencia la información proporcionada por el fabricante del variador, quien indica que se puede utilizar como máximo un cable 2 AWG y como mínimo cable 8 AWG. También se verifica que la longitud del cable esté dentro del rango permitido para operación sin reactancia de salida. La longitud motor variador es menor a 100 m.

Se revisa la conexión eléctrica en los motores de las bombas de acuerdo a la información indicada por el fabricante de las mismas. Esta información se indica en la Figura 4.2.

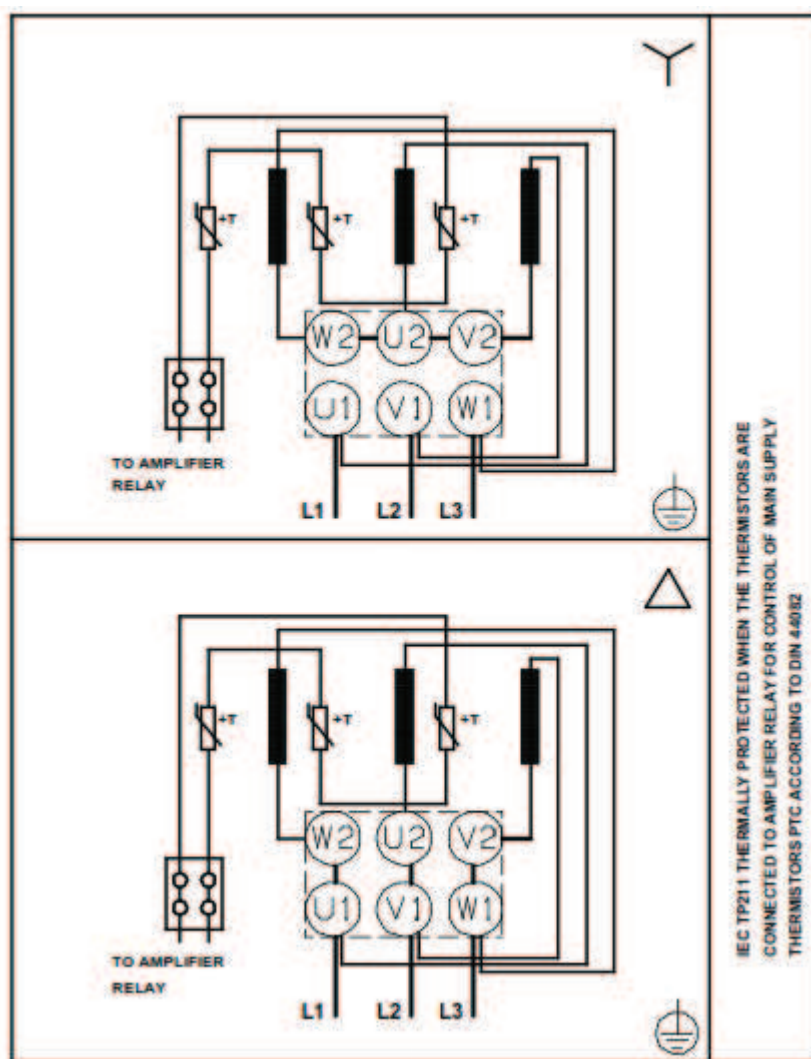


Figura 4.2. Conexión Eléctrica Motor Bomba

Dado que la operación de los motores se realiza a 220 Vac, la conexión es en Delta. En esta etapa se aprovecha para verificar la instalación del conductor de Tierra tanto para el motor como para el variador.

Se procede a energizar el tablero para establecer la conexión de programación del variador a través de Starter. Se Verifica que los parámetros del motor coincidan con los datos de placa del mismo y se hace girar al motor a una frecuencia lo suficientemente baja para poder apreciar a simple vista el sentido de giro de la aspa del ventilador y así poder revisar que el sentido de giro de las bombas sea el correcto. Se corrige el cableado de las bombas para asegurar el giro en el sentido correcto.

Ahora se identifican y conectan en sus respectivas borneras, las señales externas de control tales como: nivel bajo de cisterna, nivel bajo de líquido en la bomba, paro de emergencia auxiliar, y transmisor de presión. Se verifica la conexión en serie del transmisor de presión hacia los 2 variadores y el PLC. El valor transmitido debe ser visible en cada uno de los dispositivos sin mayor atenuación de la señal. Para terminar se revisa nuevamente las interconexiones del tablero, verificando el cableado correcto y respuesta de las entradas/ salidas digitales y analógicas tanto del variador como del PLC: Dicha verificación se la realiza con el multímetro y con la ayuda de las herramientas de diagnóstico del PLC y del variador.

Como resultado de las pruebas eléctricas, se puede concluir que el tablero se encuentra en condiciones apropiadas para el funcionamiento. Al operar los variadores con carga, los interruptores termomagnéticos no se disparan y las corrientes observadas son cerca a los valores nominales. El sentido de giro de las bombas es el correcto y el sistema se presuriza. Hubo un inconveniente con el dimensionamiento de unos fusibles de protección para los liqtec y tuvieron que ser sustituidos porque el valor era muy bajo. Los niveles de voltaje son aceptables, y la operación eléctrica de los diferentes equipos es la esperada.

4.2 PRUEBAS LÓGICAS O DE PROGRAMA

De acuerdo al diagrama de flujo de programa establecido en el subcapítulo 3.2.3, se procede a realizar la programación del PLC. El diagrama sirve de guía para cumplir con los requerimientos de funcionamiento del sistema de manera organizada.

En la Tabla 4.1 se resume el comportamiento esperado por parte del PLC frente a eventos como despresurización, sobrepresión y fallas posibles del sistema mecánico como son: bomba en vacío y nivel insuficiente de líquido en la cisterna o pozo. El valor de 1 corresponde a Encendido y el valor 0 a apagado. Las señales externas fueron cableadas de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 2.12.

		Variables de Entrada														Variables de Salida			Sistema
A13	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	Q1	Q3							
Presión	Manual Bomba1	Automático Bomba1	Manual Bomba2	Automático Bomba2	Nivel Bajo Bomba1	Nivel Bajo Bomba2	Nivel Bajo Cisterna 1	Nivel Bajo Cisterna2	Falla Variador 1	Falla Variador2	Variador 1	Variador 2							
x	x	x	x	x	0	0	0	0	1	1	0	off	off	Inoperable					
Automático	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	off	on	Falla Variador 1 activa						
	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	on	off	Falla Variador 2 activa						
	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	off	on	Nivel bajo bomba 1						
	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	on	off	Nivel bajo bomba 2						
	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	off	on	Cisterna 1 baja						
	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	on	off	Cisterna 2 baja						
Sobrepresión	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	off	off	Estado Normal						
Normal	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	on/off	on/off	Alternado						
X	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	on	off	Manual						
X	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	off	on	Manual						
X	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	on	on	Manual						

Tabla 4.1. Tabla de Observación del PLC

Para verificar el funcionamiento del programa del PLC se simula el comportamiento del PLC con el software LogoSoft, aplicando las condiciones indicadas en la tabla. Luego se procede a verificar el comportamiento de manera física generando las condiciones de funcionamiento apropiadas alternando el estado de las entradas digitales y analógicas.

Por ejemplo, en la Figura 4.3 se indica el comportamiento esperado del PLC frente a la condición de despresurización del sistema debido a decebamiento de la bomba 1. Las condiciones iniciales de la simulación son: bomba 1 líder y presión menor a 120 psi.



Figura 4.3. Simulación PLC

Al decebarse la bomba 1, debe arrancar inmediatamente la bomba 2, para mantener la presión constante. La bomba 1 no puede ingresar hasta que sea cebada correctamente previniendo daños en la misma por operación en seco. Naturalmente, debe observarse que para condiciones de sobredemanda de caudal, el funcionamiento de una sola bomba no puede ser suficiente.

Como resultado de las pruebas, el programa de control escrito en el PLC cumple con los requerimientos indicados en la Tabla 4.1. Se verifica el funcionamiento correcto en la coordinación de bombas cuando se dan

procesos de lavado, que demandan mucho caudal por parte del sistema, manteniendo éste la presión constante. El arranque de la bomba auxiliar en casos de falla de la bomba principal también ha sido verificado con éxito.

4.3 RESPUESTA DINÁMICA

La evaluación de la respuesta del PID se realiza de manera práctica partiendo de los valores calculados por el sistema de autosintonización del variador. Esta optimización de parámetros se hizo inicialmente regulando el caudal de retorno de líquido por medio de una válvula de mariposa.

La respuesta de los variadores a los cambios de la presión del sistema depende de la configuración de dicha señal. Así por ejemplo, valores bajos o nulos del tiempo de filtrado del canal analógico pueden originar que transitorios muy rápidos (10ms o menos) de la señal e incluso ruido pongan en falla al equipo. Esto se debe a que un cambio en la señal de realimentación puede obligar a frenar el motor sobrecargando el bus de DC disparando una falla en el variador. Este tipo de falla se elimina al poner un adecuado tiempo de filtro en la señal analógica, permitiendo una operación estable del variador.

Para evaluar la respuesta PID del variador se utiliza el programa Starter, en donde se declara una tabla de observación de señales de interés. Sin embargo, el tiempo de registro de variables es normalmente mayor a 1 segundo debido a que dicho tiempo ofrece el programa para la observación de variables en línea por medio de la comunicación serial. Los datos obtenidos mediante esta tabla fueron los siguientes:

Tiempo	Feedback	Feedback	Error PID	Valor de Salida de PID	Frecuencia de Salida	Corriente de Salida Variador	Valor de consigna
s	%	mA	%	%	Hz	A	%
Parámetro	r2272	r752[1]	r2273	r2294	r24	r27	r2260
0	81,8359	17,1450	0,3723	95,4590	57,9900	16,9100	82,5988
2	82,8125	17,1066	-0,2136	96,9482	58,2200	17,2000	82,5988
9	17,2363	6,2952	65,8508	100,0000	11,4205	3,2550	82,5988
17	7,0313	4,5357	75,5676	100,0000	1,9579	8,1439	82,5988
26	22,2160	7,4400	60,3820	50,0000	29,9900	6,6060	82,5988
34	33,3984	9,8300	48,4192	69,2870	41,4599	11,3631	82,5988
42	70,7031	15,4839	12,4817	94,4275	55,6823	15,5191	82,5988
51	80,8594	16,5787	1,1536	90,7227	55,2569	14,7504	82,5988
59	82,2266	16,8320	-0,4089	88,5986	54,5866	12,7324	82,5988
67	79,8800	16,9500	2,5208	97,6013	58,4360	17,4410	82,5988
75	81,8359	17,1457	0,7629	99,1089	58,9404	17,9695	82,5988
84	82,6172	17,1848	0,1770	98,7122	58,9593	17,8254	82,5988
92	82,8125	17,1652	-0,2136	97,7478	58,5598	17,6332	82,5988
99	82,6172	17,1652	-0,0183	97,8149	58,6898	17,6332	82,5988
108	82,4219	17,2043	-0,0183	97,8272	58,7300	17,6813	82,5988
116	82,6172	17,1848	-0,0183	97,8272	58,7081	17,5852	82,5988

Tabla 4.2. Tabla de observación realizada en Starter

La Tabla 4.2 corresponde a los datos observados mediante comunicación serial en el variador 1 de la bomba 1 frente a una despresurización del sistema.

Con estos datos es posible realizar curvas que permiten observar el desempeño del variador 1 frente una pérdida de presión del sistema. Los datos fueron tomados con el sistema funcionando, apagando los variadores durante unos pocos segundos para permitir la caída de presión en el sistema.

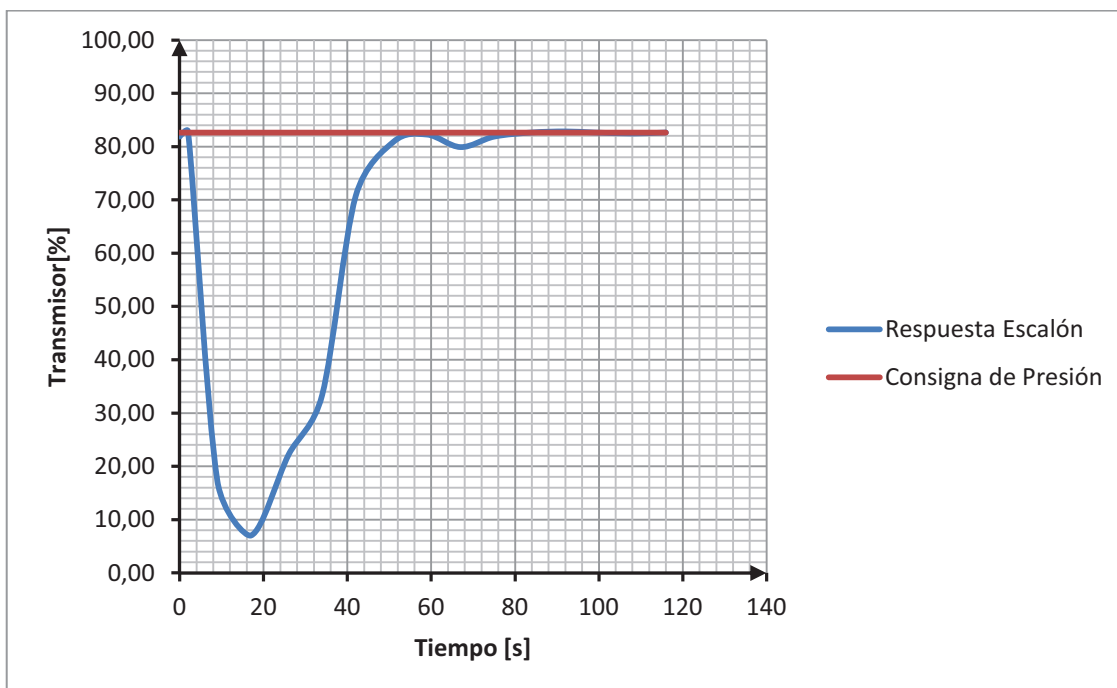


Figura 4.4. Respuesta escalón del variador 1

Como puede observarse en la Figura 4.4, la respuesta no tiene sobre pico y con el paso del tiempo, el error se reduce a 0. Esto es, la presión del sistema se ha recuperado y está constante. El tiempo de respuesta también es adecuado para el sistema, ya que se recupera el nivel de presión y las máquinas homogenizadora y pasteurizadora no sienten ningún inconveniente durante la pérdida de presión.

Para evaluar la respuesta dinámica tanto de la bomba 1 como la 2 se utiliza el PLC. Mediante la observación en línea del bloque B050, bloque de regulación PI, utilizado para integrar la bomba auxiliar en caso de despresurización, se puede obtener la siguiente respuesta escalón a una transición de pérdida de presión.

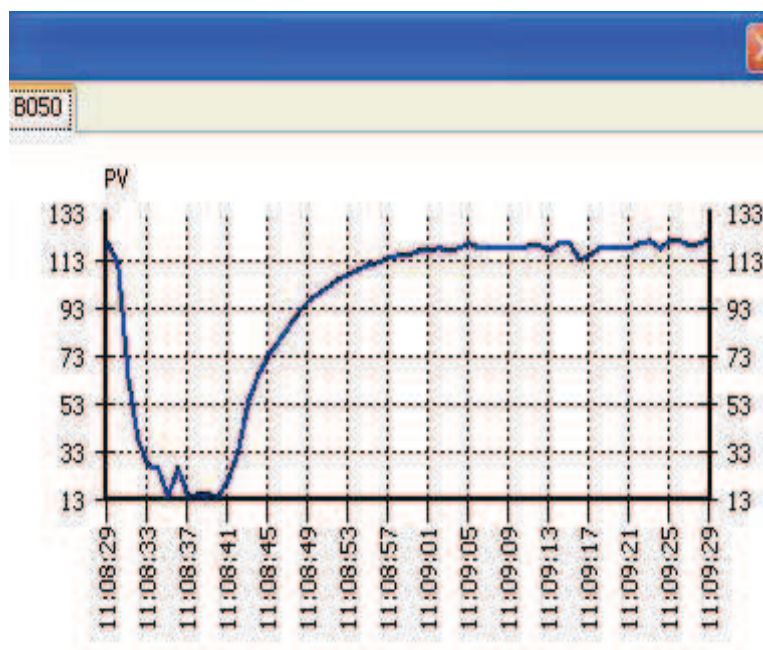


Figura 4.5. Respuesta Escalón Sistema

La Figura 4.5 muestra la reacción del sistema en modo automático frente a la despresurización del sistema. Esta es la respuesta obtenida al encender automáticamente y con éxito tanto la bomba 1 y 2 para compensar el error de presión. El gráfico indica el valor de presión medido por el transmisor en unidades de ingeniería (psi). De esta figura se puede observar que el tiempo de recuperación del sistema es de aproximadamente 24 segundos, con ausencia de sobre pico que es adecuado para la operación del sistema.

La respuesta dinámica del sistema también se verifica durante los procesos de lavado, y se comprueba que el sistema recupera la presión en un tiempo adecuado y supe de suficiente caudal a las máquinas.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El sistema programado y configurado permite mantener la presión constante para el consumo de agua de la máquina pasteurizadora y homogenizadora, con un tiempo de recuperación adecuado para las necesidades de la planta.
- El sistema integra elementos mecánicos (bombas) así como elementos electrónicos (tablero de control) por lo que el funcionamiento adecuado del mismo depende del correcto estado operativo de sus partes.
- El programa del PLC cumple con los objetivos propuestos de alternancia y seguridad de bombas, por lo que el sistema tiene suficiente robustez frente a eventos de parada.
- En caso de falla de una bomba o un variador en momentos de alta demanda, la presión no puede ser sostenida por una sola bomba por mucho tiempo.
- Las pérdidas de fricción en el sistema no son significativas y se dispone de suficiente altura de aspiración para el funcionamiento normal de las bombas.
- Si bien una incorrecta configuración/programación de los variadores de frecuencia puede llevar al apareamiento de fallas en los mismos, normalmente se debe descartar cualquier falla de origen electro-mecánico.
- El variador de frecuencia es un equipo que no sólo permite el control de un motor asíncrono trifásico, sino que adicionalmente dispone de sistemas de vigilancia que cuidan tanto al motor como al bus de DC.

- La configuración y programación de un variador de frecuencia haciendo uso de la herramienta de software permite acortar los tiempos de puesta en marcha al disponer de información útil en pantalla, conociendo el estado actual del sistema, así como disponer de un respaldo informático de la programación del sistema.
- La utilización del software de configuración Starter permite adicionalmente reducir el riesgo de errores al momento de la puesta en marcha del accionamiento.
- El correcto funcionamiento de un sistema motor – variador reside fundamentalmente en el correcto dimensionamiento de las partes eléctricas y mecánicas del mismo. Una bomba mal dimensionada puede dar lugar al apareamiento de fallas que pueden ser detectadas por el variador.
- Se debe considerar los parámetros ambientales a la hora de dimensionar los variadores de frecuencia, ya que existe depreciación de la corriente de salida de los mismos en función de la altura, temperatura y frecuencia de pulsación.
- El voltaje de alimentación a los variadores de frecuencia ha de ser lo más constante posible. Cambios o interrupciones bruscas en el suministro eléctrico pueden afectar la correcta operación del variador, identificando dichos eventos con fallas.
- Daños eléctricos en el motor, como cortocircuitos y fatiga del aislamiento, pueden afectar negativamente al variador e inclusive dañarlo.

- El sistema de visualización instalado permite de manera fácil conocer la presión actual del sistema y los equipos activos al operador.
- Los sistemas de automatización con PLC permiten facilitar las tareas de control de un sistema, al permitir codificar la secuencia lógica de operación del mismo así como indicar al operador su estado haciendo uso de interfaces adecuadas.
- Se debe observar que los variadores instalados así como el PLC son equipos de IP20, por lo que deben estar protegidos del polvo y el agua.
- Es recomendable que las señales de los cables motor - variador y las señales de control e instrumentación se encuentren convenientemente separadas, ya que los variadores pueden emitir interferencias electromagnéticas que pueden afectar la operación normal del controlador.
- Las operaciones del autómeta son más flexibles cuanto éste sea más avanzado. No obstante, esto encarece los costos de fabricación del tablero.
- La utilización de variadores de frecuencia en los sistemas de bombeo permite una operación eficiente del mismo al hacer un uso adecuado de la energía demanda al regular la velocidad de la bomba.
- Se debe considerar la curva de operación de la bomba para garantizar un funcionamiento estable del sistema y evitar problemas de cavitación.
- La programación BICO permite acoplar el variador a las tareas más exigentes. Se requiere un conocimiento y experiencia en el manejo de variadores Micromaster y su arquitectura.

- Por los resultados logrados, se concluye que los objetivos planteados por el proyecto han sido cumplidos. El sistema presenta un nivel de presión constante durante operación y una activación conveniente de la bomba auxiliar para suplir con el caudal requerido por las máquinas Homogenizadora y de UHT instaladas en la Pasteurizadora Quito.

5.2 RECOMENDACIONES

- Ante una falla se recomienda revisar en primer lugar causas de origen mecánico y eléctrico.
- Es recomendable trabajar con motores de aislamiento clase F debido a que los picos altos de voltaje que emite el variador desgastan de manera rápida el aislamiento de motores de clase inferior, acelerando el deterioro de los mismos.
- Se recomienda el uso de cables apantallados para las señales de control e instrumentación ya que ayudan a mitigar los efectos adversos de las interferencias electromagnéticas generadas por otros equipos.
- Se recomienda realizar el mantenimiento preventivo del motor eléctrico de las bombas para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema variador – motor.
- Es recomendable realizar el mantenimiento mecánico de la bomba para asegurar un funcionamiento adecuado de la misma y sustituirla convenientemente cuando su vida útil haya sido consumida.
- Se debe revisar cada 6 meses el estado del transmisor de presión ya que su continuo contacto con el agua deteriora el asiento del mismo, lo que lo vuelve con el pasar del tiempo insensible a los cambios de presión. De ser el caso se debe sustituir el transmisor de presión o

instalar filtros, especialmente si existen partículas en suspensión con el líquido.

- Es aconsejable revisar los filtros de aire de los ventiladores instalados en el tablero, cada cierto tiempo. Recordar que los variadores requieren de un flujo de aire para enfriar el calentamiento producido por la conmutación de la etapa de potencia.
- No se debe obstruir los sistemas de ventilación de los variadores con herramientas, papeles u otros objetos.
- Realizar una limpieza con aire seco del interior de los variadores para evitar la acumulación de polvo en la parte interna del mismo. Esto puede producir recalentamiento de los equipos de potencia y su deterioro.
- No se debe manipular directamente los terminales DCP y DCN, ya que estos tienen aproximadamente 300 VDC para la alimentación de 220 Vac.
- Se debe revisar que el funcionamiento de las válvulas check y de pie sea adecuado y el esperado. Una válvula en mal estado puede comprometer el funcionamiento adecuado del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIBROS:

- EUROPUMP and Hydraulic Institute, “Variable Speed Pumping: A guide to successful applications”, Elsevier Advanced Technology 2004, Oxford, UK.
- BARNES Malcom, “Practical speed drives and Power electronics”, Elsevier 2003, Oxford UK.
- BERGER Hans, “Automating with Simatic”, Siemens 2008.
- INDUSTRIAL ELECTRONICS SERIES, “The Power Electronics Handbook”, CRC Press 2002, USA.

Manuales:

- GRUNDFOS, “Manual de Bombeo de la Industria”, Grundfos 2004, .
- PEERLESS Pump Company, “System Analysis for pumping equipment selection”, Peerless Pump Company 2005, Indianapolis, Indiana.
- BROWN Martin, “Siemens Standard Drives Application Handbook”, Siemens Standard Drives 1997, Congleton.
- SIEMENS, “Micromaster 440 0.12 kW – 250 kW Instrucciones de Uso”, Siemens 2006.
- SIEMENS, “Micromaster 440 Lista de Parámetros”, Siemens 2006.
- SIEMENS, “Logo Manual del Producto”, Siemens 2008.
- SIEMENS, “PI closed loop control for MM420 and MM440”, Siemens 2007.
- GRUNDFOS, “LiqTec 200 240 Installation and operating instructions”, Grundfos 2004.

Tesis:

Vega, Alex, “Diseño e implementación de un sistema de control de variadores para obtener presión de agua constante en un edificio de la Universidad Simón Bolívar”, EPN, Quito 2011

Internet:

- <http://highered.mcgraw-hill.com/sites/dl/free/0073529265/686179/Chapter5.pdf>
- <http://web2.clarkson.edu/projects/subramanian/ch301/notes/bernoulli.pdf>
- <http://www.reliance.com/prodserv/standriv/appnotes/d7737.pdf>
- http://www.engineeringtoolbox.com/pump-head-pressure-d_663.html
- http://www.engineeringtoolbox.com/fluid-density-temperature-pressure-d_309.html
- <http://www.chem.mtu.edu/~fmorriso/cm310/pump.pdf>
- http://www.docs.hvacpartners.com/idc/groups/public/documents/marketing/wp_varfreqdrive.pdf

ANEXOS

ANEXO A

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS BOMBAS

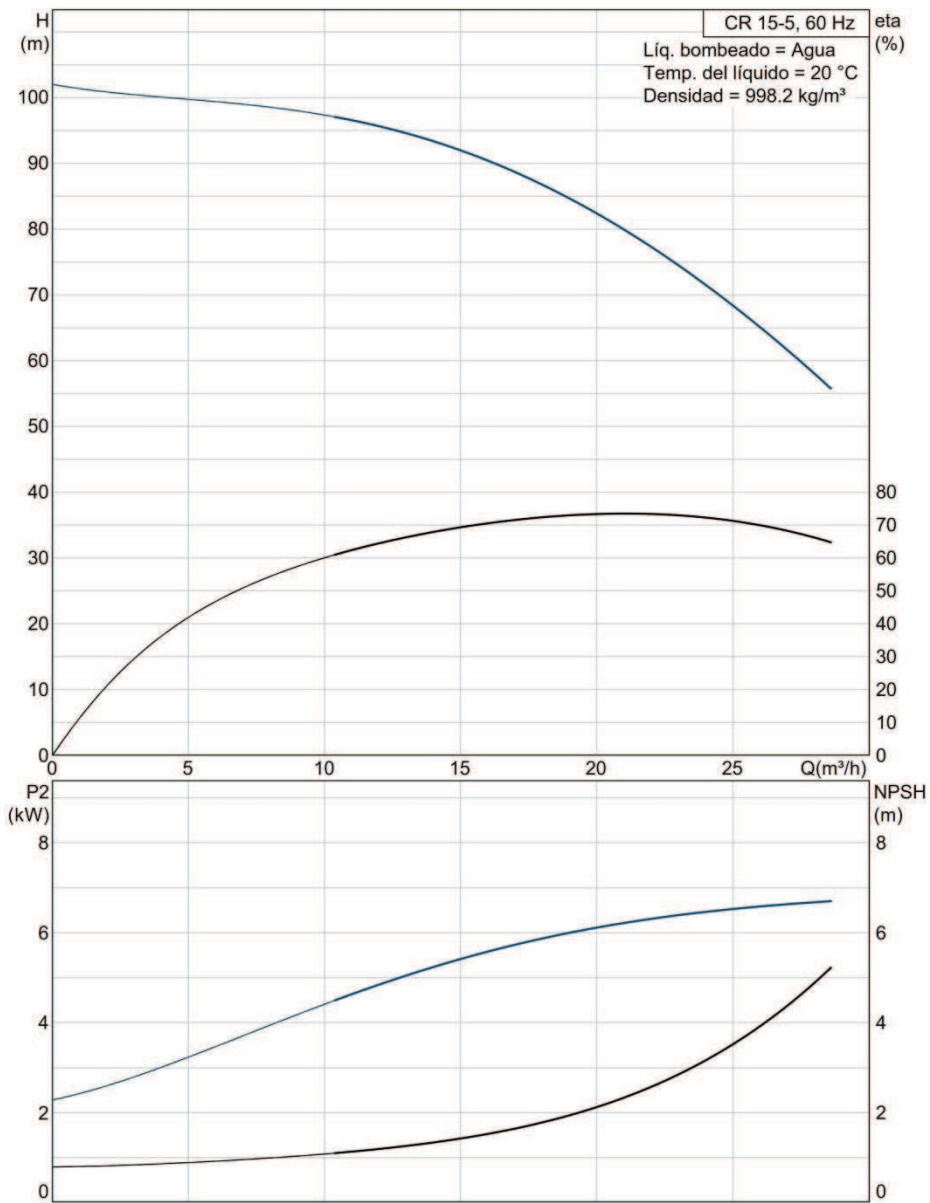
Posición	Contar	Descripción	Precio unit
	1	<p>CR 15-5 A-F-A-E-HQQE</p>  <p>Advierta! la foto puede diferir del actual producto</p> <p>Código: 96503822 Bomba centrífuga vertical, no autocebante, multicelular, en línea para instalación en sistemas de tuberías o montaje en una cimentación.</p> <p>La bomba tiene las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Impulsores y cámaras intermedias de Acero inoxidable DIN W.-Nr. DIN W.-Nr. 1.4301. - Cabezal y base de la bomba de Fundición. - Longitud de montaje del cierre según DIN 24960. - Transmisión de energía mediante acoplamiento ranurado de fundición. - Conexión de tubería mediante bridas DIN. <p>El motor es un motor CA 3-fásico.</p> <p>Líquido: Líquido bombeado: Agua Rango de temperatura del líquido: -20 .. 120 °C Temp. líquido: 20 °C Densidad: 998.2 kg/m³</p> <p>Técnico: Velocidad para datos de bomba: 3525 rpm Caudal nominal: 20.5 m³/h Altura nominal: 81.1 m Cierre: HQQE Homologaciones en placa: CE</p> <p>Materiales: Cuerpo hidráulico: Fundición EN-JL1030 ASTM A48-30 B Impulsor: Acero inoxidable DIN W.-Nr. 1.4301 AISI 304</p> <p>Instalación: Temperatura ambiental máxima: 60 °C Presión máxima a la temp. declarada: 16 bar / 120 °C</p>	Bajo pedido



Empresa: INASEL
Creado Por: LENIN FALCONI
Teléfono: -
Fax: -
Datos: -

Posición	Contar	Descripción	Precio unit
		16 bar / -20 °C Tipo de brida: DIN Diámetro de conexiones: DN 50 Presión: PN 16 Tamaño de la brida del motor: FF265 Datos eléctricos: Tipo de motor: 132SB IE Efficiency class: IE2 - IE3 Número de polos: 2 Potencia nominal - P2: 7.5 kW Potencia (P2) requerida por la bomba: 7.5 kW 7.5 kW Frecuencia de alimentación: 60 Hz Tensión nominal: 3 x 220-277 D/380-480 Y V Corriente nominal: 24,6-20,8/14,2-12,0 A Intensidad de arranque: 680-1050 % Cos phi - Factor de potencia: 0,90-0,82 Velocidad nominal: 3490-3530 rpm IE efficiency: IE2 89,5% - IE3 90,2% Grado de protección (IEC 34-5): 55 (Protect. water jets/dust) Clase de aislamiento (IEC 85): F Otros: Peso neto: 102 kg Peso bruto: 124 kg Volumen: 0.43 m3	

96503822 CR 15-5 60 Hz

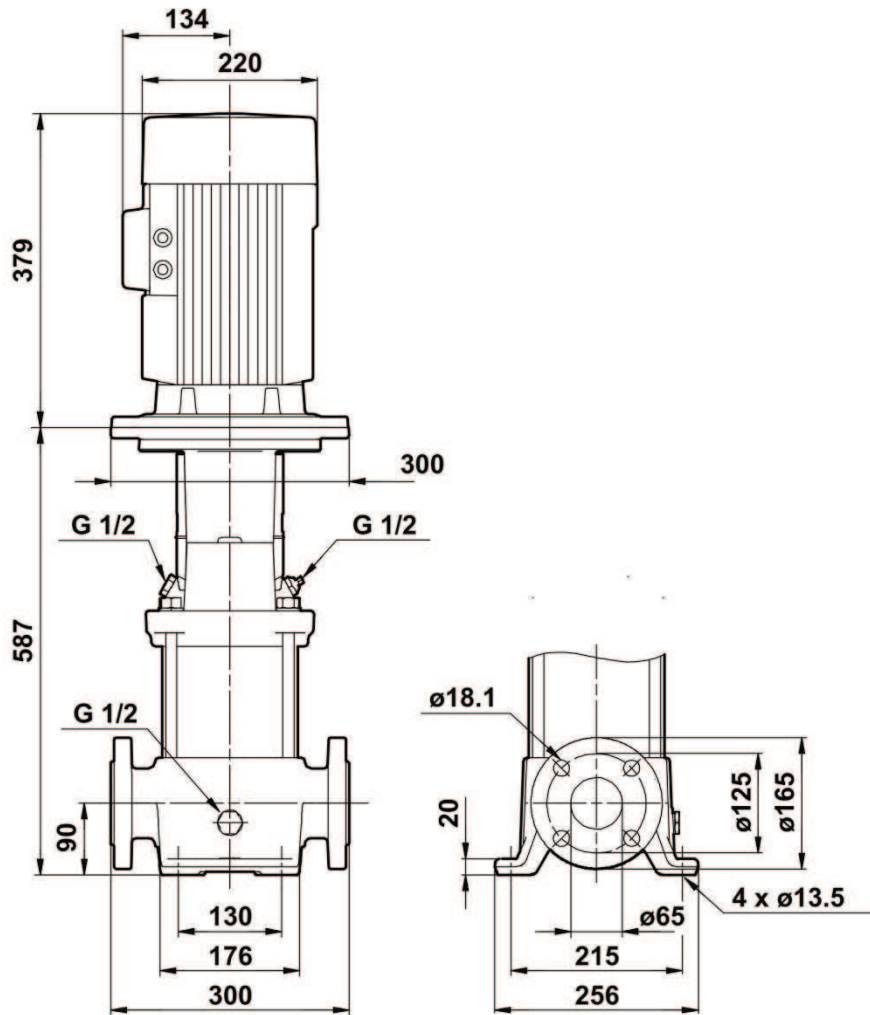




Empresa: INASEL
Creado Por: LENIN FALCONI
Teléfono: -
Fax: -
Datos: -

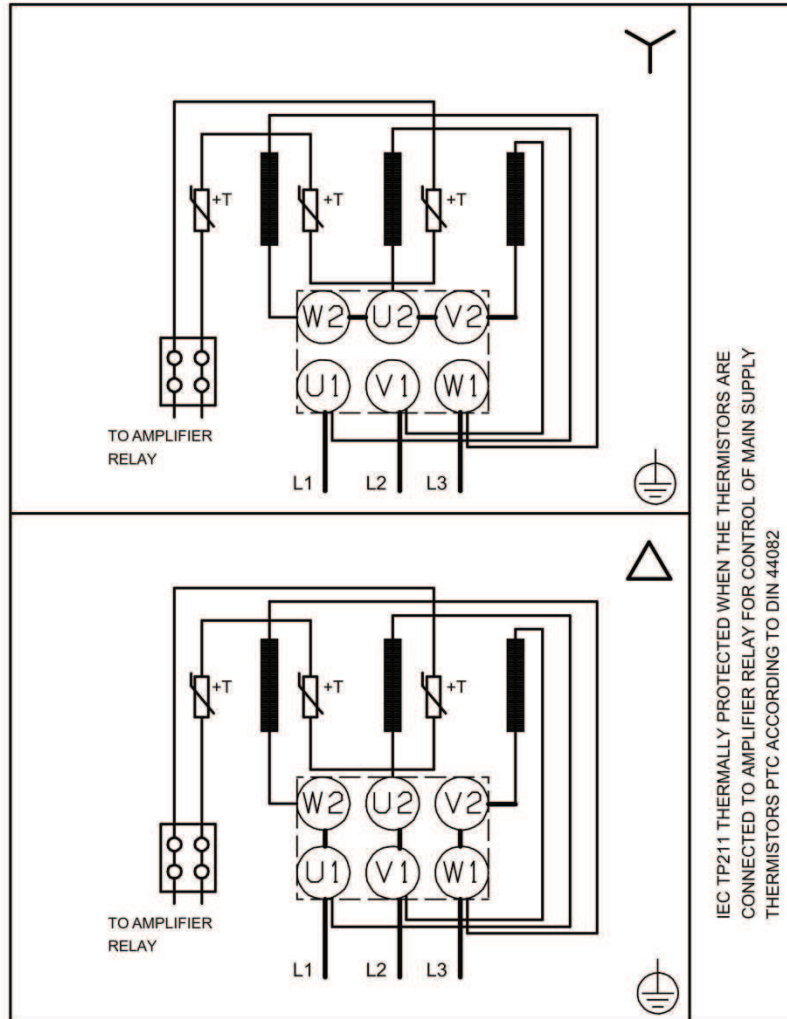
Descripción	Valor
Peso bruto:	124 kg
Volumen:	0.43 m3

96503822 CR 15-5 60 Hz



Nota: Todas las unidades están en [mm] a menos que se establezcan otras.

96503822 CR 15-5 60 Hz



IEC TP211 THERMALLY PROTECTED WHEN THE THERMISTORS ARE
 CONNECTED TO AMPLIFIER RELAY FOR CONTROL OF MAIN SUPPLY
 THERMISTORS PTC ACCORDING TO DIN 44082

¡Nota! Uds en [mm] a menos que otras estén expresadas



Empresa: INASEL
Creado Por: LENIN FALCONI
Teléfono: -
Fax: -
Datos: -

Dados da encomenda:

CR 15-5 A-F-A-E-HQQE

Cantidad: 1

Código prod.: 96503822

Total: Precio bajo pedido

ANEXO B

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PLC LOGO

SIEMENS

hoja de datos del producto

6ED1052-1MD00-0BA6


LOGO!12/24RC,MOD. LOGICO,DISPL. AL/E/S:
12/24V DC/RELE,
8ED (4EA)/4SD, MEM. 200 BLOQUES,
AMPLIABLE MODULARMENTE

Diseño/montaje	
Montaje	sobre perfil normalizado de 35 mm, 4 módulos de ancho
Tensión de alimentación	
12 V DC	Sí
24 V DC	Sí
Rango admisible, límite inferior (DC)	10,8 V
Rango admisible, límite superior (DC)	28,8 V
Hora	
Programadores horario.	
Number of time switches / integrated / maximum	
Cantidad	8
Reserva de marcha	80 h
Entradas digitales	

Cantidad/entradas binarias	8 ; de ellas, 4 aptas como E analógicas (0 a 10 V)
Salidas digitales	
Número/salidas binarias	4 ; Relé
Funcionalidad/resistencia a cortocircuitos	No ; requiere protección externa
Salidas de relé	
Poder de corte de los contactos	
con carga inductiva, máx.	3 A
Poder de corte/contactos/con carga resistiva/máximo	10 A
CEM	
Emisión de radiointerferencias según EN 55 011	
Emisión de perturbaciones radioeléctricas según EN 55 011 (clase B)	Sí
Grado de protección y clase de protección	
IP20	Sí
Normas, homologaciones, certificados	
Homologación CSA	Sí
Homologación UL	Sí
Homologación FM	Sí
Homologaciones navales	Sí
Desarrollado según IEC 61131	Sí
según VDE 0631	Sí
Condiciones ambientales	
Temperatura de empleo	
mín.	0 °C
máx.	55 °C
Dimensiones	
Anchura	72 mm
Altura	90 mm
Profundidad	55 mm
Última actualización	02-nov-2012

SIEMENS

hoja de datos del producto

6ED1055-1MB00-0BA1


LOGO! DM8 12/24R MOD. AMPLIAC.,
AL/E/S: 12, 24V/12V/24V/RELE, 2 MOD.,
4 ED/ 4 SD

Diseño/montaje	
Montaje	sobre perfil normalizado de 35 mm, 2 módulos de ancho
Tensión de alimentación	
12 V DC	Sí
24 V DC	Sí
Rango admisible, límite inferior (DC)	10,8 V
Rango admisible, límite superior (DC)	28,8 V
Entradas digitales	
Cantidad/entradas binarias	4
Tensión de entrada	
Tipo de tensión de entrada	DC
Salidas digitales	
Número/salidas binarias	4 ; Relé

Funcionalidad/resistencia a cortocircuitos	No ; requiere protección externa
Intensidad de salida	
para señal "1" valor nominal	5 A
Salidas de relé	
Poder de corte de los contactos	
con carga inductiva, máx.	3 A
Poder de corte/contactos/con carga resistiva/máximo	5 A
CEM	
Emisión de radiointerferencias según EN 55 011	
Emisión de perturbaciones radioeléctricas según EN 55 011 (clase B)	Sí
Grado de protección y clase de protección	
IP20	Sí
Normas, homologaciones, certificados	
Homologación CSA	Sí
Homologación UL	Sí
Homologación FM	Sí
Homologaciones navales	Sí
Desarrollado según IEC 61131	Sí
según VDE 0631	Sí
Condiciones ambientales	
Temperatura de empleo	
mín.	0 °C
máx.	55 °C
Dimensiones	
Anchura	36 mm ; 2 mód.
Altura	90 mm
Profundidad	55 mm
Última actualización	02-nov-2012

SIEMENS

hoja de datos del producto

6ED1055-1MA00-0BA0


LOGO! AM2 MOD. AMPLIACION,
AL: DC 12/24V, 2 EA, 0 - 10V O 0 - 20MA

Diseño/montaje	
Montaje	sobre perfil normalizado de 35 mm, 2 módulos de ancho
Tensión de alimentación	
12 V DC	Sí
24 V DC	Sí
Entradas analógicas	
Nº de entradas analógicas	2
Rangos de entrada	
Tensión	Sí
Intensidad	Sí
Rangos de entrada (valores nominales), tensiones	
0 a +10 V	Sí
Rangos de entrada (valores nominales), intensidades	

0 a 20 mA	Si
CEM	
Emisión de radiointerferencias según EN 55 011	
Emisión de perturbaciones radioeléctricas según EN 55 011 (clase B)	Si
Grado de protección y clase de protección	
IP20	Si
Normas, homologaciones, certificados	
Homologación CSA	Si
Homologación UL	Si
Homologación FM	Si
Homologaciones navales	Si
Desarrollado según IEC 61131	Si
según VDE 0631	Si
Condiciones ambientales	
Temperatura de empleo	
mín.	0 °C
máx.	55 °C
Dimensiones	
Anchura	36 mm
Altura	90 mm
Profundidad	55 mm
Última actualización	02-nov-2012

ANEXO C

CARACTERÍSTICAS DE LOS VARIADORES

Característica	Especificación
Salidas de relé	3, parametrizable 30 V DC / 5 A (carga resistiva), 250 V AC 2 A (carga inductiva)
Salida analógica	2, parametrizable (0 a 20 mA)
Interface serie	RS-485, opcionales RS-232
Compatibilidad electromagnética	Tamaños constructivos: A hasta C: como accesorio se puede suministrar un filtro EMV, norma EN55011, clase A o B A hasta F: se puede suministrar un convertidor con filtro integrado de clase A FX y GX: Con el filtro EMV (se puede suministrar como accesorio) se cumplen los valores límite de EN 55011, clase A para emisiones de interferencias guiadas (se necesita un conmutador estrangulador de corriente)
Frenado	frenado por inyección de corriente continua frenado combinado frenado dinámico Tamaños constructivos A hasta F con estrangulador integrado Tamaños constructivos FX y GX con freno externo
Grado de protección	IP20
Margen de temperatura	Tamaños constructivos A hasta F: -10 °C a +50 °C (14 °F a 122 °F) (CT) -10 °C a +40 °C (14 °F a 104 °F) (VT) Tamaños constructivos FX y GX: 0 °C a +40 °C (32 °F a 104 °F), a 55 °C (131 °F) con reducción de la potencia; véase la Figura 2-2
Temperatura de almacenamiento	-40 °C a +70 °C (-40 °F a 158 °F)
Humedad relativa	< 95 % (sin condensación)
Altitud de operación (sin reducción de potencia)	Tamaños constructivos A hasta F hasta 1000 m sobre el nivel del mar FX y GX hasta 2000 m sobre el nivel del mar
Características de protección	Mínima tensión, sobretensión, sobrecarga, defecto a tierra, cortocircuito, protección basculante, protección de bloqueo del motor, sobretemperatura en motor, sobretemperatura en convertidor, bloqueo de parámetros
Normas	Tamaños constructivos A hasta F UL, cUL, CE, C-tick FX y GX UL, cUL, CE
Marcado CE	de acuerdo con las directivas europeas "Baja tensión" 73/23/CEE y "Compatibilidad electromagnética" 89/336/CEE

SIEMENS

hoja de datos del producto

6SE6440-2UC27-5DA1

nombre del producto

Micromaster 4



MICROMASTER 4 Familie

MICROMASTER 440 SIN FILTRO 3AC200-240V +10/-10% 47-63HZ PAR RES. CONSTANTE 7,5 KW SOBRECARGA 150% 60S, 200% 3S PAR RES. CUADRATICO 11 KW 520 X 275 X 245 (AL X A X P) GRADO DE PROTECCION IP20 TEMP. AMBIENTE -10+50 GRD C SIN PANEL AOP/BOP

Tensión de entrada	230 V
Tensión de salida / máxima	240 V
Tensión de salida / mínima	0 V
factor de potencia	0,95
Rendimiento eta	96
Formato	D
Clase de protección IP	MICROMASTER 440
Condiciones ambientales / temperatura ambiente en servicio	-10° a +40°C (VT) / 50°C (CT)
filtro / [nicht versorgt - Klasse A] / [nicht versorgt - 1AC]	FALSE
clase / de regulación	Vector, FCC, Linear - V/f
Altura	0,52 m
Anchura	0,275 m
Profundidad	0,245 m

 Date:
29.11.2012

 subject to modifications
© Copyright Siemens AG 2012

peso	16 kg
letzte Änderung:	05-nov-2012

ANEXO D

CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN

Medida de presión

Transmisores para requisitos básicos

SITRANS P220 para presión relativa

2

Síntesis



El transmisor de presión SITRANS P220 mide la presión relativa de líquidos, gases y vapores.

- Célula de medida de acero inoxidable, completamente soldada
- Rangos de medida de 2,5 a 600 bar (36,3 a 8702 psi) relativos
- Para aplicaciones de alta presión y técnica frigorífica

Beneficios

- Alta precisión de medida
- Caja de acero inoxidable robusta
- Alta resistencia a la sobrecarga
- Para fluidos corrosivos y no corrosivos
- Para medir la presión de gases, líquidos y vapores
- Construcción compacta
- Sin junta

Gama de aplicación

El transmisor de presión SITRANS P220 para presión relativa se utiliza en los siguientes sectores industriales:

- Fabricación de maquinaria
- Construcción naval
- Energía
- Química
- Abastecimiento de agua

Diseño

Estructura del aparato sin protección contra explosiones

El transmisor de presión está formado por una célula de medida piezorresistiva con membrana, montado en una caja de acero inoxidable. Puede conectarse eléctricamente con un conector conforme a EN 175301-803-A (IP65), un conector redondo M12 (IP67), un cable (IP67) o un pasacables rápido (IP67). La señal de salida asciende a 4 a 20 mA o 0 a 10 V.

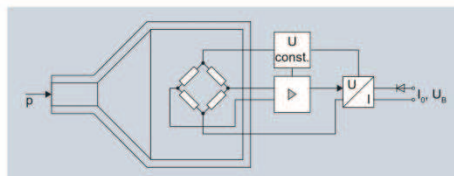
Estructura del aparato con protección contra explosiones

El transmisor de presión está formado por una célula de medida piezorresistiva con membrana, montado en una caja de acero inoxidable. Puede conectarse eléctricamente con un conector conforme a EN 175301-803-A (IP65) o un conector redondo M12 (IP67). La señal de salida asciende a 4 a 20 mA.

Funciones

El transmisor de presión mide la presión relativa y el nivel de líquidos y gases.

Modo de operación



Transmisores de presión SITRANS P220 (7MF1567-...), diagrama de función

La célula de medida de acero inoxidable dispone de un puente de resistencias de película gruesa, al cual se transmite la presión de servicio p a través de una membrana de acero inoxidable.

La tensión de salida de la célula de medida se conduce al amplificador y se transforma en una corriente de salida de 4 a 20 mA o en una tensión de salida de 0 a 10 V CC.

La corriente y la tensión de salida son linealmente proporcionales a la presión de entrada.

Medida de presión

Transmisores para requisitos básicos

SITRANS P220
para presión relativa

2

Datos técnicos

Campo de aplicaciones	
Medición de la presión relativa	Líquidos, gases y vapores
Modo de operación	
Principio de medición	Célula de medida piezorresistiva (membrana de acero inoxidable)
Magnitud de medida	Presión relativa
Entrada	
Rango de medida	
• Presión relativa	
- métrico	2,5 ... 600 bar (36 ... 8700 psi)
- Rango de medida para EE.UU.	30 ... 8700 psi
Salida	
Señal de corriente	4 ... 20 mA
• Carga	($U_B - 10 \text{ V}$)/0,02 A
• Alimentación auxiliar U_B	7 ... 33 V CC (10 ... 30 V para Ex)
Señal de tensión	0 ... 10 V CC
• Carga	$\geq 10 \text{ k}\Omega$
• Alimentación auxiliar U_B	12 ... 33 V CC
• Consumo de corriente	< 7 mA at 10 k Ω
Característica	lineal creciente
Precisión de medida	
Desviación de medida en caso de ajuste de punto límite, incl. histéresis y repetibilidad	• típica: 0,25 % del valor final • máxima: 0,5 % del valor final
Tiempo de respuesta transitoria T_{99}	< 5 ms
Estabilidad a largo plazo	
• Inicio de medida y alcance de medida	0,25 % del valor final/año
Influencia de la temperatura ambiente	
• Inicio de medida y alcance de medida	0,25 %/10 K del valor final
• Influencia alimentación auxiliar	0,005 %/V
Condiciones de montaje	
• Temperatura de proceso	-30 ... +120 °C (-22 ... +248 °F)
• Temperatura ambiente	-25 ... +85 °C (-13 ... +185 °F)
• Temperatura de almacenamiento	-50 ... +100 °C (-58 ... +212 °F)
• Grado de protección según IEC 60529	• IP 65 con conector según EN 175301-803-A • IP 67 con conector M12 • IP 67 con cable • IP 67 con pasacables rápido
Compatibilidad electromagnética	• según EN 61326-1/-2/-3 • según NAMUR NE21, solo para aparatos ATEX y con una desviación de valor medido máx. $\leq 1\%$
Construcción mecánica	
Peso	aprox. 0,090 kg (0,198 lb)
Conexiones al proceso	ver planos dimensionales
Electrical connections	• Conector según EN 175301-803-A forma A con entrada de cable M16x1,5 o ½-14 NPT o PG 11 • Conector M12 • Cable de 2 o 3 hilos (0,5 mm ²) ($\pm 5,4 \text{ mm}$) • Pasacables rápido
Material de las piezas en contacto con el fluido	

• Célula de medida	Acero inoxidable, n° de mat. 1.4016
• Conexión al proceso	Acero inoxidable, n° de material 1.4404 (SST 316 L)
Material de las piezas sin contacto con el fluido	
• Cajas	Acero inoxidable, n° de material 1.4404 (SST 316 L)
• Caja enchufable	Plástico
• Cable	PVC
Certificados y homologaciones	
Clasificación según la Directiva de aparatos de presión (97/23/CE)	Para gases del Grupo de fluidos 1 y líquidos del Grupo de fluidos 1; cumple los requisitos según el artículo 3, apartado 3 (prácticas de la buena ingeniería)
Lloyds Register of Shipping (LR)	solicitado
Germanischer Lloyd Register of Shipping (GL)	solicitado
American Bureau of Shipping (ABS)	solicitado
Bureau Veritas (BV)	solicitado
Det Norske Veritas (DNV)	solicitado
Homologación para agua potable (ACS)	solicitado
GOST	solicitado
Protección contra explosiones	
Seguridad intrínseca "i" (solo para salida de corriente)	Ex II 1/2 G Ex ia IIC T4 Ga/Gb Ex II 1/2 D Ex ia IIC T125 °C Da/Db
Certificado de homologación CE	SEV 10 ATEX 0146
Conexión a circuitos óhmicos con seguridad intrínseca certificados con los valores máximos:	$U_i \leq 30 \text{ V DC}$; $I_i \leq 100 \text{ mA}$; $P_i \leq 0,75 \text{ W}$
Inductancia y capacidad internas efectivas para versiones con conectores según EN 175301-803-A y M12	$L_i = 0 \text{ nH}$; $C_i = 0 \text{ nF}$

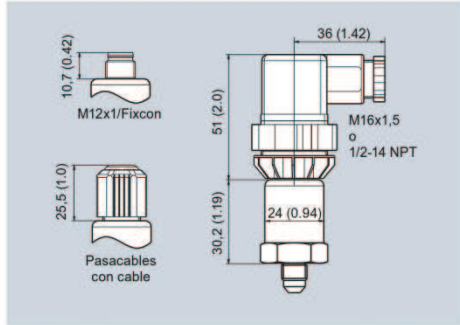
Medida de presión

Transmisores para requisitos básicos

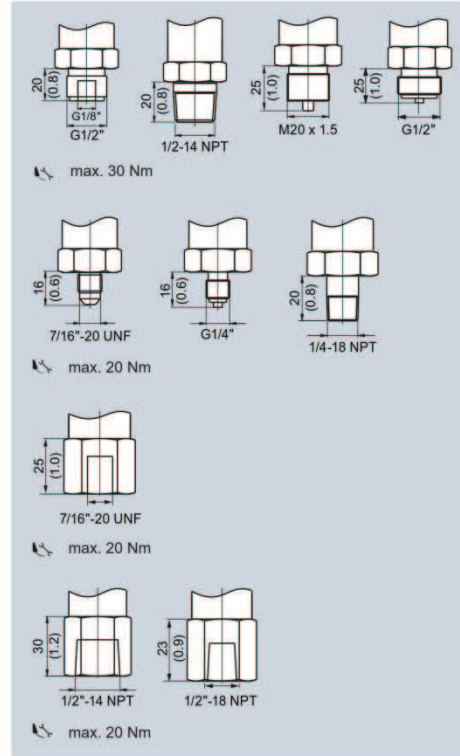
SITRANS P220
para presión relativa

Croquis acotados

2



SITRANS P220, conexiones eléctricas, medidas en mm (pulgadas)



SITRANS P220, conexiones al proceso, medidas en mm (pulgadas)

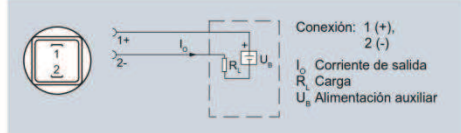
Medida de presión

Transmisores para requisitos básicos

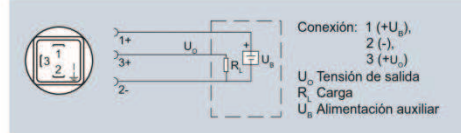
SITRANS P220
para presión relativa

2

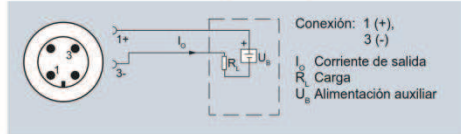
Diagramas de circuitos



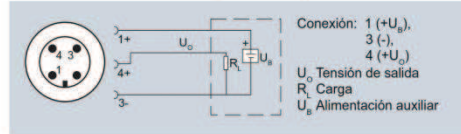
Conexión con salida de corriente y conector según EN 175301



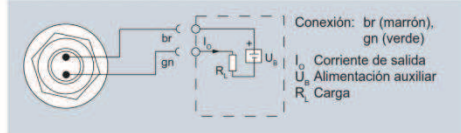
Conexión con salida de tensión y conector según EN 175301



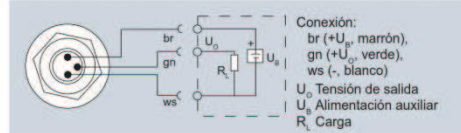
Conexión con salida de corriente y conector M12x1



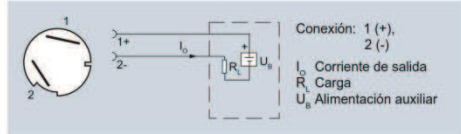
Conexión con salida de tensión y conector M12x1



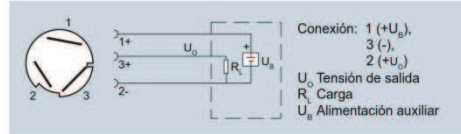
Conexión con salida de corriente y cable



Conexión con salida de tensión y cable



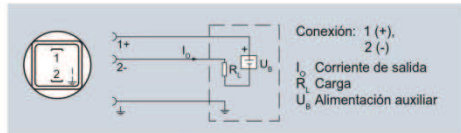
Conexión con salida de corriente y pasacables rápido



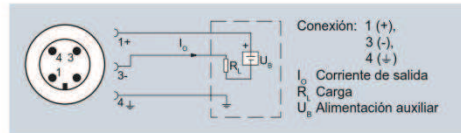
Conexión con salida de tensión y pasacables rápido

Versión de aparato con protección contra explosiones: 4 a 20 mA

La conexión de puesta a tierra está conectada de forma conductora con la caja del transmisor



Conexión con salida de corriente y conector según EN 175301 (Ex)



Conexión con salida de corriente y conector M12x1 (Ex)