

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades
Departamento de Ingeniería Electrónica

**Diseño e implementación de un sistema de control automatizado en un
sistema de pozos de agua utilizando el protocolo Foundation Fieldbus**

Juan Pablo González Guzmán

Guatemala
2004

BIBLIOTECA
DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Diseño e implementación de un sistema de control automatizado en un sistema de pozos de agua utilizando el protocolo Foundation Fieldbus

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades
Departamento de Ingeniería Electrónica

**Diseño e implementación de un sistema de control automatizado en un
sistema de pozos de agua utilizando el protocolo Foundation Fieldbus**

Trabajo de Investigación Presentado por Juan Pablo González Guzmán
para Optar al Grado Académico de Ingeniero Electrónico

Guatemala
2004

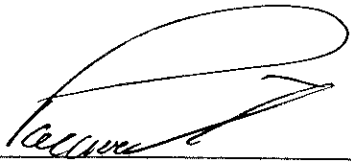
BIBLIOTECA
DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

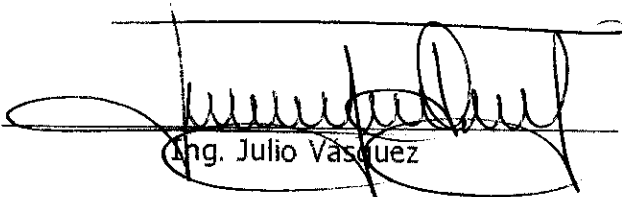
Vo. Bo.

(f) 
Dr. Ing. Manuel Antonio López

Tribunal:

(f) 
Dr. Ing. Manuel Antonio López

(f) 
Ing. Gonzalo Palarea

(f) 
Ing. Julio Vásquez

Fecha Aprobación: 17 de Febrero del 2004

RESUMEN

La industria en el mundo cada vez se ve más necesitada de materia prima así como de tecnología para poder competir eficientemente. Siendo el agua una de las materias primas más importantes dentro de cualquier industria, es necesario implementar programas de desarrollo tecnológico para aprovechar al máximo este recurso natural no renovable. Antes de poder utilizar el agua, es necesario tener un sistema de recolección de la misma. Este trabajo consistió en la implementación del protocolo Foundation Fieldbus, en un sistema de pozos de agua. Con esta implementación se logró tener un control distribuido del proceso; así mismo, se obtuvo mayor información del proceso y del equipo instalado en sí, por medio de gráficos de volumen consumido y tendencias de niveles en los pozos. Toda la información disponible para el operario como para el ingeniero de control, permite una mejor planificación del mantenimiento preventivo. Además, se logró la reducción en el tiempo de respuesta por medio de la implementación de una alarma, que al activarse permite obtener información directamente del transmisor que la haya activado. Todo esto aumentó la confiabilidad del sistema de pozos de agua, asegurando el suministro de agua así como un menor tiempo de paro ante posibles fallas.

CONTENIDO

RESUMEN	VII
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
A. OBJETIVO GENERAL	3
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
III. ANTECEDENTES	5
A. ¿QUÉ ES FOUNDATION FIELDBUS?	5
B. INSTRUMENTACIÓN	6
1. <i>Sensores de presión de diafragma.</i>	6
2. <i>Nivel por burbujeo.</i>	7
3. <i>Sensor de flujo tipo vortex.</i>	8
IV. METODOLOGÍA	11
A. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	11
B. INSTALACIÓN	11
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
VI. CONCLUSIONES	28
VII. RECOMENDACIONES	30
VIII. BIBLIOGRAFÍA	32
IX. APÉNDICE	34
A. NORMA NEMA 4X	34
B. EQUIPO EN POZOS	36
C. INTERFACES HOMBRE MÁQUINA (HMI)	39
D. GLOSARIO	40

LISTA DE CUADROS

Cuadro No. 1 Tipos de cables permitidos y distancias máximas por lazo.....	6
Cuadro No. 2 Métodos de medición de variables del proceso.....	6
Cuadro No. 3 Instrumentación y equipo en cada pozo.....	12
Cuadro No. 4 Características de los pozos de agua.....	13
Cuadro No. 5 Características de la sala de bombeo.....	14
Cuadro No. 6 Instrumentación y equipo en la sala de bombeo.....	14
Cuadro No. 7 Instrumentación analizada.....	16
Cuadro No. 8 Ventajas y desventajas de Step 7 y WinCC.....	19
Cuadro No. 9 Ventajas y desventajas RSLogix 500 e InTouch.....	21
Cuadro No.10 Ventajas y desventajas del System302 y Genesis32.....	22

LISTA DE FIGURAS

Figura No. 1 Jerarquía de red industrial.....	2
Figura No. 2 Sistema de control basado en Foundation Fieldbus.....	5
Figura No. 3 Medición de nivel por burbujeo de un tanque.....	7
Figura No. 4 Requerimientos para correcta instalación de medidor de flujo.....	8
Figura No. 5 Modelo de control de cada pozo.....	15
Figura No. 6 Transmisor de flujo tipo vortex.....	17
Figura No. 7 Sistema propuesto basado en SIMATIC Step 7.....	18
Figura No. 8 Sistema propuesto basado en RSLogix 500.....	20
Figura No. 9 Sistema propuesto basado en el System302.....	22
Figura No. 10 Transmisor de presión certificado FF con indicador.....	24
Figura No. 11 Sistema de control implementado con Foundation Fieldbus.....	25
Figura No. 12 Programa de control de los pozos, en lenguaje LADDER.....	26
Figura No. 13 Plano eléctrico del cableado en los paneles.....	27
Figura No. 14 Instrumentación y equipo en los pozos original.....	36
Figura No. 15 Paneles de control.....	37
Figura No. 16 Diseño de panel de control para los pozos.....	38
Figura No. 17 Diseño de panel de control para sala de bombeo.....	38
Figura No. 18 HMI para Sala de bombeo.....	39
Figura No. 19 HMI para control de los pozos.....	40

I. INTRODUCCIÓN

Los primeros sistemas de control de procesos eran principalmente analógicos, dispositivos sencillos con formatos de señales que eran determinados por la necesidad de una arquitectura con un mínimo número de costosas unidades de procesamiento central (CPU). El hecho de enlazar por medio de una red los distintos dispositivos que forman parte de un Sistema de Control Distribuido (DCS) basado en Controladores Lógicos Programables (PLC), empezó alrededor de los años 80 con el fin de unir las consolas de los operarios con los controladores centrales. Pero el tener redes de comunicaciones digitales en una planta industrial tuvo su inicio a mediados de los años 90 (Berge, 2002:1).

Las redes usadas en automatización tienden a convertirse predominantemente en digitales, esto es, datos transmitidos de forma serial entre dispositivos como flujo de ceros y unos. Las comunicaciones digitales hacen posible la transferencia de información entre dispositivos tales como transmisores, posicionadores de válvulas, controladores y estaciones de trabajo.

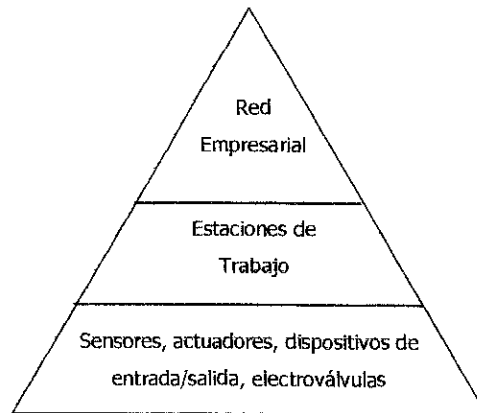
La principal ventaja de las comunicaciones digitales es que se puede comunicar una gran cantidad de información en un mismo medio. Es decir, en vez de un único cable para cada una de las variables, cientos de datos pueden ser comunicados a través de un solo cable. Antes de las comunicaciones digitales, cada dispositivo de campo tenía que ser cableado hasta el controlador central. Los sensores y actuadores no podían más que enviar el valor analógico de la variable de proceso o variable manipulada, a través de una pareja de cables dedicados exclusivamente a cada uno de ellos.

La señal analógica únicamente viajaba en una dirección, del transmisor al controlador o del controlador al transmisor. La aparición de las comunicaciones digitales, hizo posible la transmisión de información de forma bidireccional; esto provoca el traslado de los controladores a paneles montados remotamente, pudiendo no sólo recibir el valor de la variable de proceso sino que enviar datos de configuración a los dispositivos, alarmas, modos de operación, etc.

En la industria existe una pirámide que simboliza la jerarquía en las redes industriales (vid Figura No. 1), la cual tiene tres niveles principales: su parte inferior está compuesta por la red de dispositivos de campo, en un nivel intermedio se encuentran las estaciones de trabajo y en el nivel superior se encuentra la red empresarial (Berge, 2002).

Se manejan diversos protocolos para el intercambio de información, en la sección de red empresarial el protocolo más utilizado es el protocolo abierto Ethernet. En el nivel de estaciones de trabajo y comunicación con los PLC, existe una serie de protocolos propietarios así como protocolos abiertos. Entre los protocolos abiertos se maneja el RS232, el RS485 y Ethernet. En el nivel inferior de la jerarquía de red industrial, existen varios protocolos, la mayoría propietarios. Pero el problema de utilizar protocolos propietarios es que se depende directamente de un fabricante.

Figura No. 1 Jerarquía de red industrial



Para mantener la integración del sistema, se deben comprar dispositivos de campo de repuesto directamente del proveedor del sistema original, que en muchos casos es el único que tiene las capacidades técnicas para realizar las ampliaciones. Debido a que en este punto el proveedor del sistema no tiene competencia alguna, los repuestos y extras para las ampliaciones pueden ser mucho más caros que los dispositivos originalmente comprados.

Debido a las desventajas que esto conlleva, los expertos de la industria empezaron a trabajar en un estándar para un bus de campo (*fieldbus*) independiente de los fabricantes. Por las necesidades únicas del ambiente de control de procesos, ningún estándar existente para enlazar por red podía ser utilizado. Una nueva tecnología debía ser desarrollada para el estándar y así obtener un bus energizado, seguridad intrínseca y la habilidad de comunicarse a largas distancias utilizando cableado convencional. Además, se buscaba que estos buses de campo estándar fueran basados en protocolos abiertos, es decir, que ningún fabricante tuviera preeminencia sobre otro y que los dispositivos de distintos fabricantes fueran 100% compatibles unos con otros. Es así como nacieron: *Foundation Fieldbus* en 1994 y *PROFIBUS PA* en 1996. Siendo estándares para buses de campo en los cuales los transmisores especificados para uno de los buses no pueden tener comunicación con los transmisores del otro bus.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general.

1. Automatizar un sistema de pozos de agua utilizando el protocolo Foundation Fieldbus.
2. Tener un control del rendimiento y uso adecuado de los recursos.

B. Objetivos específicos.

1. Realizar un análisis previo del estado de las instalaciones.
2. Diseñar un sistema de control y supervisión digital para la extracción de agua en un pozo industrial.
3. Hacer un modelo del sistema de control en diagramas de bloques.
4. Instalar y supervisar la instalación del nuevo sistema de control.
5. Diseñar y desarrollar diagramas eléctricos de control.
6. Diseñar y programar el *software* necesario.
7. Elaborar reportes y documentos necesarios para el mantenimiento y ampliación del sistema.
8. Realizar pruebas de funcionamiento del sistema.

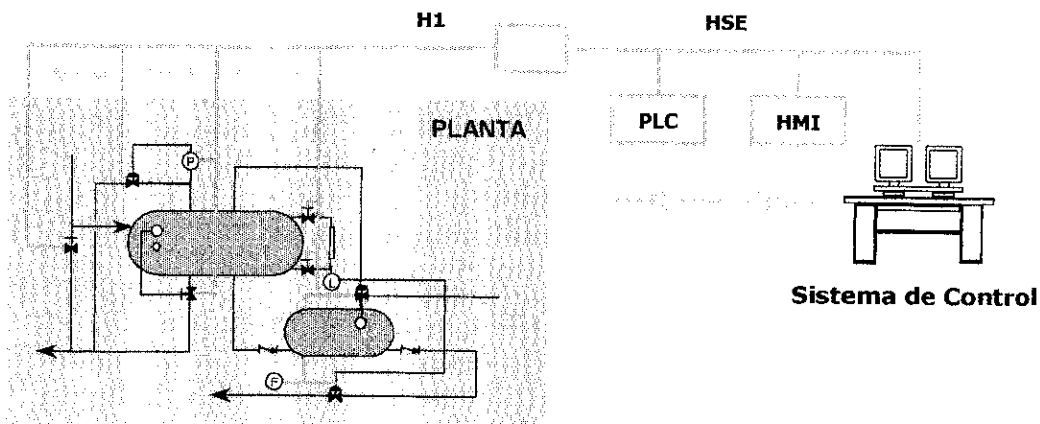
III. ANTECEDENTES

A. ¿Qué es Foundation Fieldbus?

Foundation Fieldbus (FF) es un protocolo estandarizado, subconjunto de los estándares IEC61158 e ISA s50.02, normalizado y regido por la Fieldbus Foundation. FF es la evolución tecnológica hacia las comunicaciones digitales en la instrumentación y control de procesos. Difiere de cualquier otro protocolo de comunicación, porque está diseñado para resolver aplicaciones de control de procesos en vez de solo transmitir los datos de una forma digital. Además, es un sistema de comunicaciones totalmente digital, serial, bidireccional, especificado tanto para el nivel inferior como para el nivel intermedio de la pirámide jerárquica de redes en la industria (Fieldbus Foundation, 2003:10).

Al bus de campo se le conoce como *Foundation Fieldbus H1* y a la interconexión de controladores con estaciones de trabajo, como *Foundation Fieldbus HSE* (Ethernet de Alta Velocidad), (vid Figura No. 2). FF es el único protocolo con la capacidad intrínseca de distribuir el control del proceso en los dispositivos de campo. El interfaz entre H1 y HSE se hace con un dispositivo de enlace, comúnmente conocido como el *Linking Device* (LD).

Figura No. 2 Sistema de control basado en Foundation Fieldbus



Este protocolo garantiza una comunicación transparente para el ingeniero de control entre la estación de trabajo y la planta, el cual tiene una serie de características únicas que lo hacen uno de los protocolos con más auge a nivel mundial.

FF es un protocolo basado en el modelo simplificado OSI de redes, el cual especifica únicamente la capa física, capa de enlace y capa de aplicación (Tanenbaum, 1997:29).

SMAR (2004:1) establece que por sus características de modelo de red, FF es considerado como una red de área local (LAN) para instrumentos utilizados en automatización de procesos con la capacidad intrínseca de poder distribuir el control del proceso dentro de toda la red.

En capa física se especifica también características de FF tales como tipo de medio físico a utilizar, valores de voltaje, corriente, distancias máximas permitidas, entre otros. En la actualidad, como medio físico, está diseñado y especificado este protocolo únicamente para cableado de cobre, principalmente con cable par trenzado y blindado (STP) calibre 18AWG, aunque no es el único. En sí, es utilizar el mismo cable para datos que anteriormente se utilizaba para señales convencionales de 4mA – 20mA, lo que no implicará costos adicionales en el cableado. Para un cable STP 18AWG, la distancia máxima permitida para cada lazo es de 1,900 metros, distancia que varía dependiendo el cable a utilizar (vid Cuadro No. 1).

Cuadro No. 1 Tipos de cables permitidos y distancias máximas por lazo

Pares	Blindaje	Trenzado	Tamaño	Largo	Tipo
Un par	Sí	Sí	0.8mm ² (AWG18)	1,900m	A
Multipar	Sí	Sí	0.32mm ² (AWG22)	1,200m	B
Multipar	No	Sí	0.13mm ² (AWG26)	400m	C
Multipar	Sí	No	1.25mm ² (AWG16)	200m	D

Una característica muy especial de FF es que el bus de campo está diseñado para ser un bus de campo de voltaje, algo muy importante y poco común debido a las pérdidas que se pueden dar en el medio físico. Este bus opera a una velocidad de transmisión de datos de 31.25 Kbps modulados sobre una línea de voltaje que puede estar entre 9v – 32 v DC.

B. Instrumentación

El control de todo proceso en la industria depende principalmente de las variables del proceso tales como presión, nivel, flujo, concentración y temperatura. Todos estos son fenómenos físicos que deben de ser medidos por los instrumentos adecuados (vid Cuadro No. 2).

Cuadro No. 2 Métodos de medición de variables del proceso

Fenómeno a medir	Tipo de sensor o medición
Presión	Sensor de diafragma
Nivel	Nivel por burbujeo
Flujo	Sensor tipo vortex

1. Sensores de presión de diafragma. Este tipo de sensores de presión utilizan un diafragma en el punto de contacto físico con el proceso y lo que miden es la deformación del mismo ante los cambios en la presión. La deformación a escala completa de un solo diafragma está limitada usualmente a 0.002 pulgadas (0.05mm), y la cantidad de deformación varía con la cuarta potencia del diámetro del diafragma. Es por esto, ante el mismo cambio de presión, la deformación del diafragma se incrementa 16 veces si el diámetro se duplica. Un método para aumentar la deformación total es unir varios diafragmas juntos en cápsulas.

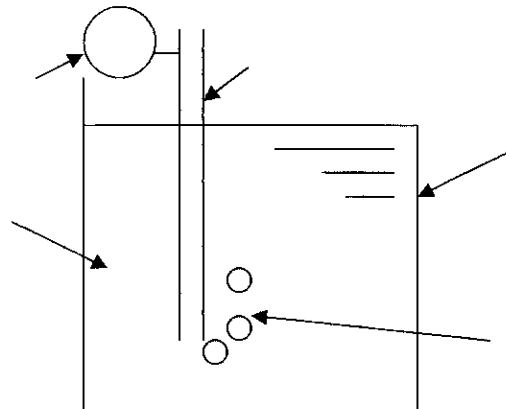
Según Béla Lipták (2003:737) existen cuatro diseños básicos de sensores de diafragma, se pueden catalogar por la referencia de presión que utilizan (vacío total o atmosférica) y por el método para balancear las fuerzas generadas por la presión del proceso (diseño de balanceo de fuerza o diseño de balanceo de movimiento). Cuando la presión atmosférica es utilizada como referencia, la medición es conocida como *gauge pressure*; cuando la referencia de presión es el vacío total (aproximadamente 0.001 mmHg) la medición es llamada presión absoluta. Las unidades que balancean el movimiento son capaces de mover indicadores locales directos (manómetros) pero están sujetas a errores de histéresis, fricción y de banda muerta. Los que balancean las fuerzas usualmente son transmisores de alta precisión pero sin la capacidad de mover manómetros. Esto último puede ser contrarrestado con el uso de sensores electrónicos que tengan la capacidad de desplegar de forma digital los valores de la variable medida.

2. Nivel por burbujeo. Obtener el nivel por el método de burbujeo es una forma confiable y relativamente barata. El funcionamiento de este método es similar a soplar aire dentro de un vaso con agua utilizando una pajilla. Mientras haya más agua en el vaso, más fuerte hay que soplar para poder generar las burbujas dentro del mismo. Si la presión del aire en el tubo sumergido dentro del tanque es mayor que la presión hidrostática del fluido, el aire va a burbujear en el extremo del tubo (vid Figura No. 3).

La presión del aire dentro del tubo sumergido debe ser por lo menos 10 PSI más grande que la mayor presión hidrostática que será medida, y el flujo de aire se mantiene relativamente bajo a 0.132 GPM; esto para reducir al mínimo la caída de presión dentro del tubo sumergido (Lipták, 2003:421).

Con este método se detecta la presión hidrostática del recipiente y se despliega en un lugar más conveniente, la presión de un gas inerte es usada para transportar la información del nivel a esta ubicación. Luego de que el aire llena el tubo sumergido, la presión dentro del mismo igualará la presión hidrostática de la columna del líquido del proceso, y el exceso de aire que sea introducido al tubo burbujeará en el extremo sumergido del mismo.

Figura No. 3 Medición de nivel por burbujeo de un tanque



3. Sensor de flujo tipo vortex. Béla Lipták (2003:385) menciona en su *"Instrument Engineer's Handbook"* que fue Tódor von Kármán quien descubrió que, cuando un obstáculo es colocado en el camino de un fluido que fluye, el fluido es incapaz de permanecer unido a los bordes del obstáculo y se separará alternadamente de un lado y del otro. El fluido en los extremos del obstáculo sumergido se desprenderá formando remolinos y vórtices. Von Kármán se dio cuenta de que la distancia entre vórtices es constante, independientemente de la velocidad del flujo. Relacionándolo con la ondulación de una bandera ante la presencia del viento, lo que von Kármán descubrió es que los intervalos entre vórtices es constante y que es una función del diámetro del asta de la bandera. De esa forma, mientras más rápido sea el viento, más rápido se formarán los vórtices y más rápido ondeará la bandera, pero sin cambiar su longitud de onda.

Más tarde, Strouhal determinó que mientras el número de Reynolds del fluido esté entre 20,000 y 7,000,000 la razón entre el ancho del obstáculo y el intervalo de los vórtices será de 0.17. Este número es llamado el número de Strouhal (Lipták, 2003:385).

Ecuación No. 1 Determinación del flujo utilizando un sensor tipo vortex

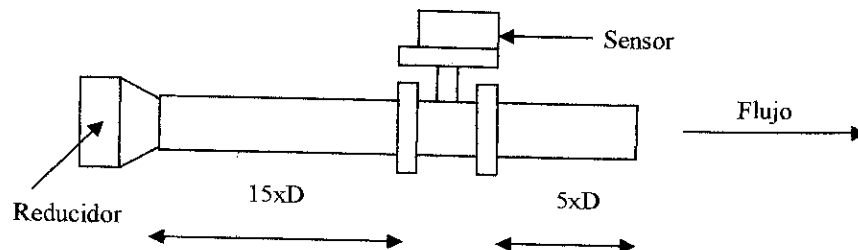
$$flujo = \frac{(f \times d)}{0.17}$$

Por lo tanto, si es sabido el ancho del obstáculo (d) y se tiene un detector que es suficientemente sensible para contar los vórtices y determinar la frecuencia de los mismos (f), se puede medir la velocidad del fluido de cualquier sustancia utilizando la ecuación No. 1.

Para construir un medidor de flujo basado en el principio de Kármán, el fabricante usualmente selecciona el ancho del obstáculo tal que sea $\frac{1}{4}$ del diámetro de la tubería. Mientras la obstrucción no esté corroída o recubierta y el número de Reynolds sea lo suficientemente grande para producir vórtices, y el sensor sea lo suficientemente sensible para detectarlos, el resultado es un sensor de flujo que es sensible a la velocidad del flujo e insensible a la naturaleza del medio (líquido, gas o vapor), la densidad, la viscosidad, la temperatura, la presión, entre otros (Lipták, 2003:386).

Los requerimientos para una correcta instalación del medidor de flujo para una sección recta de tubería sin turbulencia se pueden apreciar en la Figura No. 4, donde D es el diámetro de la tubería.

Figura No. 4 Requerimientos para correcta instalación de medidor de flujo



Las ventajas de los medidores de flujo tipo vortex incluyen: su uso independientemente si el fluido es un líquido, un gas o vapor; son independientes de los efectos de la viscosidad, densidad, presión y temperatura; bajo costo de instalación para tamaños pequeños, buena precisión y linealidad sin necesitar de calibración; poseen un rango amplio; bajo mantenimiento utilizando repuestos simples, accesibles e intercambiables.

Desventajas, no son aplicables en medios sucios, abrasivos, demasiado viscosos, con sólidos en suspensión o con mezcla de fluidos (gas con gotas de líquido, líquido con burbujas de gas). Así mismo, donde el número de Reynolds esté por debajo de 20,000; los materiales de construcción son limitados (acero inoxidable y plástico), la caída de presión es alta y se requieren de secciones rectas y largas de tubería tanto antes como después del medidor.

IV. METODOLOGÍA

A. Diseño del sistema de control

Para el diseño del sistema de control, fue necesario:

1. Realizar una inspección visual del área.
2. Hacer un inventario de los equipos previamente instalados tanto en los pozos como en la Sala de bombeo, tomando en cuenta las características eléctricas de los mismos.
3. Con la ayuda de los operarios e ingenieros del área, estudiar a fondo el funcionamiento y control manual que se tenía de los pozos y de la Sala de bombeo.
4. Determinar los puntos críticos en los pozos y en la Sala de bombeo.
5. Analizar la instrumentación e infraestructura ya existente en el área, para aprovechar al máximo el presupuesto asignado.
6. Analizar distintas soluciones al problema, tanto en instrumentación como en buses de campo para el control.
7. Analizar las ventajas y desventajas entre las distintas soluciones.

B. Instalación

Luego de que se tomó la decisión de implementar el sistema de control utilizando el protocolo Foundation Fieldbus, era necesario instalar el equipo nuevo. Para eso se realizó lo siguiente:

1. Cotizar y comprar el material y equipo adicional que se utilizó.
2. Diseñar los paneles de control.
3. Armar e instalar paneles de control así como todos los equipos y accesorios necesarios para el correcto funcionamiento del sistema de control.
4. Realizar las modificaciones en la infraestructura del área, para la correcta instalación del sistema de control automático.
5. Instalar los transmisores en su ubicación correspondiente.
6. Cablear cada uno de los instrumentos hacia el panel de control.
7. Cablear las señales, analógicas y digitales, necesarias para el correcto funcionamiento de los pozos y de la Sala de bombeo.
8. Realizar las conexiones eléctricas para la alimentación de los equipos e instrumentos.
9. Desarrollar el software para controlar el sistema de control automático.
10. Implementar y probar el sistema de control automático.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Uno de los objetivos de este trabajo era tener un control del rendimiento y uso adecuado de los recursos, con el fin de aprovecharlos lo más posible sin abusar de los mismos; esto, para evitar consecuencias que luego pudieran repercutir en la calidad del agua y en el sistema de niveles de mantos freáticos. Para lograr esto, se hizo un estudio detallado del área donde se ubicaban los pozos instalados, tomando en cuenta todos los factores involucrados, desde instrumentación existente hasta capacitación del personal que operaría los pozos.

El sistema de pozos de agua donde se implementó el sistema de control automatizado constaba de dos pozos de extracción de agua, desde los cuales se bombeaba el agua a un depósito subterráneo ubicado en el área de la sala de bombeo.

Para un mejor control del proceso, los pozos contaban con una serie de instrumentos y equipo previamente instalados (vid Cuadro No. 3). Algunos de los instrumentos estaban únicamente instalados, sin depender el control del proceso de las mediciones que se realizaban; instrumentos como los transmisores de presión no se encontraban cableados y no tenían función alguna. Esto representó un gasto inicial para la empresa que no le trajo ningún beneficio, ya que casi toda la instrumentación instalada se cambió por la adecuada y actualizada.

Cuadro No. 3 Instrumentación y equipo en cada pozo

Cantidad	Descripción
1	Bomba con motor.
1	Panel de control.
1	Transmisor de presión (PT) de agua de descarga.
1	Transmisor de flujo (FT) tipo vortex.
1	Transmisor de presión para monitorear el nivel (LT) con el método por burbujeo.
1	Interruptor de flujo en la tubería de agua de lubricación.
1	Interruptor de presión como seguridad por bajo nivel de agua en el pozo.
1	Sistema de seguridad por temperatura del motor marca <i>Thermasentry</i> .
1	Válvula solenoide para el sistema de agua de lubricación.
1	Válvula solenoide para el sistema de cloración del agua.
1	Sistema de cloración de agua.
1	Arrancador para el motor de la bomba.
1	Variador de velocidad para el Pozo B.

Existía cierto control, principalmente manual y no se contaba de método alguno de medición de las distintas variables que intervienen en el proceso. El procedimiento de arrancar bombas, abrir válvulas, controlar presiones, realizar mediciones de concentración de cloro al agua, etc., dependía directamente del operario, tanto de su atención como de su responsabilidad. El procedimiento que se realizaba para la operación manual de los pozos era el siguiente:

- i. El operario abría manualmente la válvula de lubricación del eje por cinco minutos.

- ii. Luego de transcurrido este tiempo, cerraba la válvula de lubricación y arrancaba la bomba presionando el botón de arranque (START) del arrancador.
- iii. El operario abría la válvula de inyección de cloro para clorar el agua.
- iv. En caso de ser necesario la extracción de agua desde los dos pozos, luego de arrancar el primero se dirigía al segundo, a cinco minutos de distancia a pie, y realizar los pasos i, ii y iii nuevamente.
- v. Realizados los pasos anteriores, el operario se dirigía a la sala de bombeo, localizada a 10 minutos a pie del pozo, para medir de forma visual y subjetiva el nivel de agua en el depósito subterráneo (no se contaba con indicación alguna del nivel).

El funcionamiento del sistema de pozos dependía mucho de la habilidad, experiencia y responsabilidad del operario. Así mismo, en ninguno de los pasos anteriores él podía ser capaz de detectar fallas y tomar las medidas correctivas necesarias. Lo cual, no garantizaba el suministro de agua hacia las instalaciones principales. De aquí la necesidad de instalar un sistema de control automatizado, con el cual se pudiera llevar un control adecuado de las distintas variables del proceso así como reaccionar de la forma más adecuada ante fallas detectadas.

Todos los pozos tenían sus características individuales (vid Cuadro No. 4 y Figura No. 14 en Anexos), por esta razón era necesario que éstos tuvieran parámetros y accesorios que garantizaran la funcionalidad correcta de los mismos. Los pozos contaban con distintos sistemas de seguridad, pero principalmente contaban con el interruptor de presión del nivel por burbujeo y el sistema *Thermasentry* (que ya viene diseñado y calibrado de fábrica específicamente para cada motor), como seguridad por altas temperaturas en el motor. Estos, son independientes de los parámetros de seguridad que nos proporcionarán los transmisores.

El interruptor de nivel funcionaba con el sistema de nivel por burbujeo con que cuenta cada pozo. Dado el caso que éste se activara, el pozo detenía su funcionamiento inmediatamente, esto se podía deber por dos razones: bajo nivel de agua en el pozo o mala alimentación de aire comprimido.

Cuadro No. 4 Características de los pozos de agua

Pozo	Característica	Valor
A	Profundidad	1000 pies
	Profundidad de la bomba	698 pies
	Tubo de aire	688 pies
	Nivel estático	455 pies
	Flujo de bombeo	560 GPM
	Presión de descarga	3 bar
B	Profundidad	900 pies
	Profundidad de la bomba	690 pies
	Tubo de aire	680 pies
	Nivel estático	No hay datos
	Flujo de bombeo	880 GPM
	Presión de descarga	3.5 bar

La temperatura del motor se media con sensores de temperatura conocidos como *Resistance Temperature Detectors* (RTD) instalados en los devanados del motor y en la cámara de aceite de lubricación. Dichos RTD's se activan en caso alguna de estas partes del motor sobrepasara el rango de seguridad prefijado en la fábrica; al activarse, el sistema *Thermasentry* envía una señal digital de 120VAC.

De la misma forma que los pozos, la sala de bombeo contaba con una serie de instrumentos y equipo instalados para garantizar el almacenamiento adecuado del agua así como del suministro de la misma, requerida para las instalaciones principales. Las características de la sala de bombeo se pueden apreciar en los Cuadros No. 5 y No. 6.

Cuadro No. 5 Características de la sala de bombeo

Característica	Valor
Altura del depósito	2 metros
Capacidad del depósito	1000 m ³
Flujo de bombeo	1100 GPM
Presión de descarga	20 bar
Presión de aire	20 psi

Los controles de seguridad, tanto en los pozos como en la sala de bombas, son controles para proteger físicamente las bombas de agua. Ya que por el tipo de bombas utilizadas las mismas no tienen que ser operadas ante la ausencia de agua. Es decir, si bombearan aire, las bombas, los motores e inclusive los pozos pueden resultar dañados, representando pérdidas económicas incalculables.

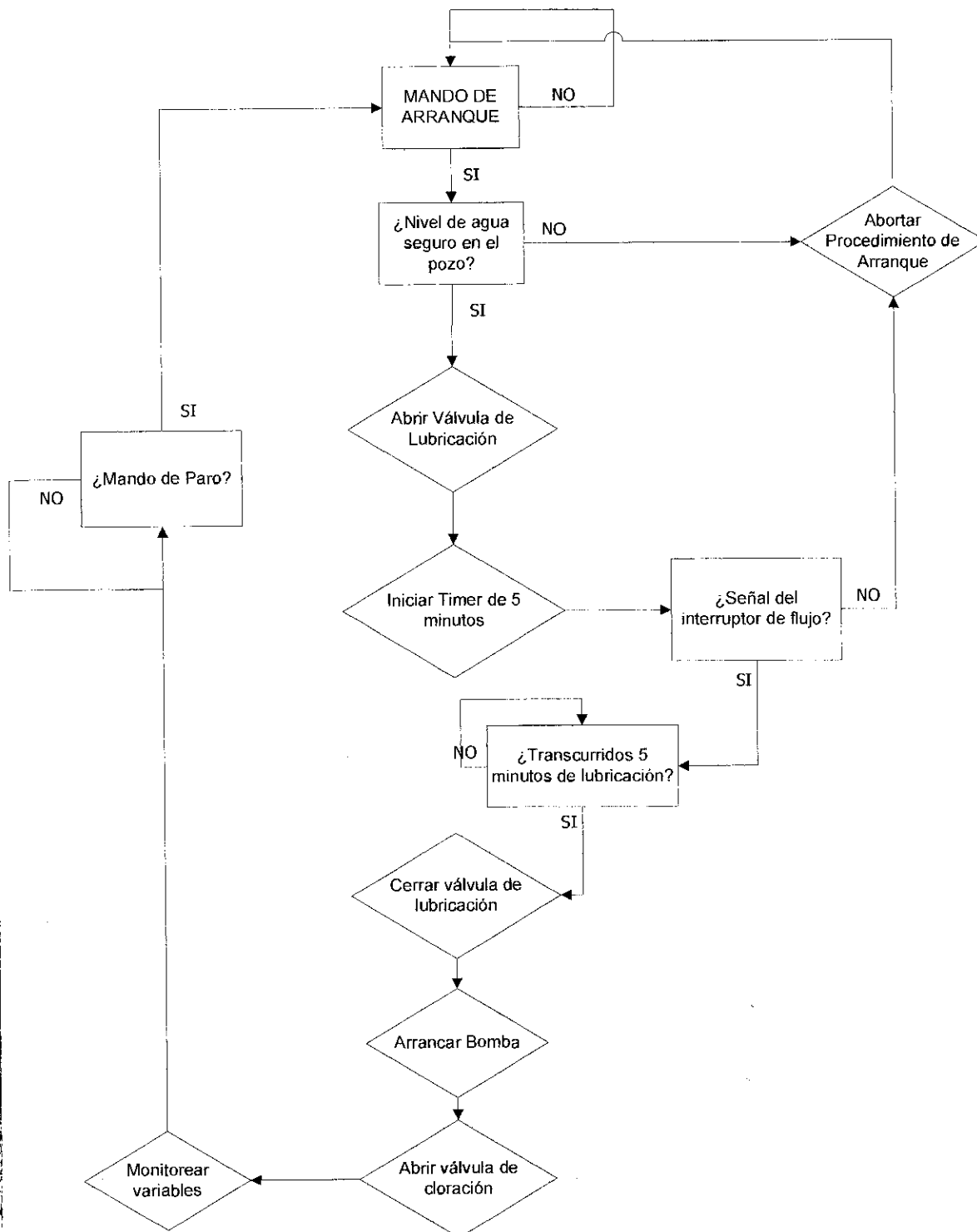
Por esta razón se contaban con dos controles de seguridad en la sala de bombas, el primero comandado por el controlador *Multilin* de los motores y el segundo por un guarda nivel. El *Multilin* se encargaba de supervisar el comportamiento eléctrico de los motores, sobrecargas, cortos circuitos, desbalance en las líneas, entre otros. Al momento de alterarse alguno de estos valores, automáticamente detenía el funcionamiento de los motores. Si el nivel en el depósito subterráneo es menor al de seguridad deseado, se detenía el funcionamiento de las bombas; esto último se lograba con el guardanivel instalado.

Cuadro No. 6 Instrumentación y equipo en la sala de bombeo

Cantidad	Descripción
3	Bombas con sus motores.
1	Sistema Hidroneumático para distribución de agua.
1	Compresor de aire.
1	Campana de golpe de ariete.
2	Sensores de nivel en la campana de golpe de ariete.
1	Transmisor de presión para la tubería de descarga de agua.
1	Guarda nivel como seguridad redundante del nivel de agua en el depósito subterráneo.
1	Sistema de arrancadores <i>Multilin-General Electric</i> para las bombas y alimentación eléctrica para los pozos.
1	Panel de control.

Se diseñó un modelo del sistema de control para cada pozo, por medio de diagramas de bloques (vid Figura No. 5), el cual es valadero tanto para la operación manual o remota del pozo representando este modelo toda la lógica que debe llevar la operación del mismo.

Figura No. 5 Modelo de control de cada pozo



Un aspecto muy importante a tomar en cuenta en la operación de los pozos son las seguridades; como ya se mencionó, la importancia de controlar los valores críticos del proceso se debe a que ante una seguridad violada y no tomada en cuenta, se pueden ocasionar daños tanto en la infraestructura como en la seguridad del operario. Es por esto, que la violación de cualquiera de los parámetros de seguridad, debía generar una alarma la cual tenía que ser visible con una luz de alarma sobre el panel de control del pozo y en el *Human Machine Interface* (HMI) en la sala de bombeo.

Para garantizar el suministro de agua, controlando las diferentes variables del proceso y controles de seguridad del mismo, fue necesario estudiar diferentes soluciones al problema. Estas soluciones comprendían dos partes, instrumentación por un lado y el sistema de control por el otro (*i.e. software, hardware* adicional, ingeniería y computadoras). Al analizar cada una de las soluciones propuestas, era necesario estar dentro del presupuesto asignado como dentro de las expectativas y objetivos del trabajo.

Sin sensores es imposible tener una medición del fenómeno físico del proceso, y sin estas mediciones no es posible tomar las decisiones adecuadas para controlarlo. Por esto, esta parte del trabajo requirió varias horas de análisis detallado de las especificaciones de cada instrumento, así como de los beneficios y desventajas de implementarlos. Como se puede apreciar en el Cuadro No. 7, se tomaron en consideración varias marcas para cada una de las variables del proceso.

Cuadro No. 7 Instrumentación analizada

Variable del Proceso	Marca	Certificado FF
Nivel	AMETEK	NO
	Endress & Hauser	SI
	Barksdale	NO
Cloro Residual	Rosemount	SI
	Foxboro	SI
	Analytical Technology	NO
	Endress & Hauser	SI
	ProMinent	NO
	Yokogawa	SI
Flujo	Rosemount	SI
	Foxboro	SI
	Endress & Hauser	SI
	Yokogawa	SI
	Sierra Instruments	NO
Presión	Rosemount	SI
	Foxboro	SI
	SMAR	SI
	ABB	SI
	Endress & Hauser	SI
	Yokogawa	SI
	SIEMENS	NO

En el cuadro No. 7 se puede observar que para la variable de proceso NIVEL, existían tres fabricantes que ofrecían diferentes soluciones para esta medición, AMETEK y Endress & Hauser, ofrecieron el uso de sondas de nivel, las cuales miden la presión hidrostática y basándose en esta presión, se determinaba el nivel de agua dentro

el pozo. Tomando en cuenta que 1 bar = 10.21 metros de columna de agua, la medición de presión fácilmente se podía convertir a un valor de nivel dentro del pozo. Cuando se construyeron los pozos, se tenía previsto la instalación de estas sondas, pero por su alto costo fueron descartadas y la seguridad por nivel de agua dentro del pozo recayó en instrumentos como el interruptor de presión por nivel y las lecturas de presión por el transmisor de presión para el nivel por burbujeo.

Las características de los instrumentos analizados para una medición en particular, debían de cumplir con la norma NEMA 4X (vid Apéndice) y ser lo más homogéneos posibles. Esto último, para poder hacer una comparación justa y equitativa entre los mismos. La calidad de los instrumentos era innegable, teniéndose posibles soluciones de empresas europeas, asiáticas, norteamericanas y brasileñas.

Todos los instrumentos que se adquirieron tenían pantalla *Liquid Cristal Display* (LCD) para poder visualizar los datos que dicho transmisor estaba midiendo así como para su configuración en el lugar de instalación. El requerimiento de la norma NEMA 4X para los instrumentos de campo, era necesaria ya que el área donde fueron instalados es excesivamente húmeda y existía riesgo de que los mismos entrasen en contacto con agua, por las características del proceso.

La medición de cloro residual posiblemente fue de la que mayor variedad de instrumentación se tenía, yendo desde analizadores amperométricos sencillos pero eficaces como los ProMinent, hasta llegar a los de Rosemount que contaban con cuatro sensores, uno para determinación de cloro residual, dos para compensación por pH y uno para compensación por temperatura. Algunos requerían de solución reguladora para funcionar adecuadamente, factor no deseado ya que se consumía usualmente en un mes, lo cual requería de una constante adquisición de solución al fabricante y de calibración.

Las ofertas para los transmisores de flujo fueron todas utilizando el de tipo vortex. Ya se contaba con un transmisor de flujo marca Foxboro instalado en la tubería de descarga de cada pozo (vid Figura No. 6); sin embargo, este transmisor no estaba en operación y su señal de salida era de tren de pulsos. Una solución analizada fue propuesta por el mismo fabricante, el cual, vendía una actualización del *hardware* interno con lo cual se convertía en un transmisor certificado FF y podía ser integrado al bus sin inconvenientes.

**Figura No. 6 Transmisor de flujo tipo vortex
(Cortesía de Foxboro)**



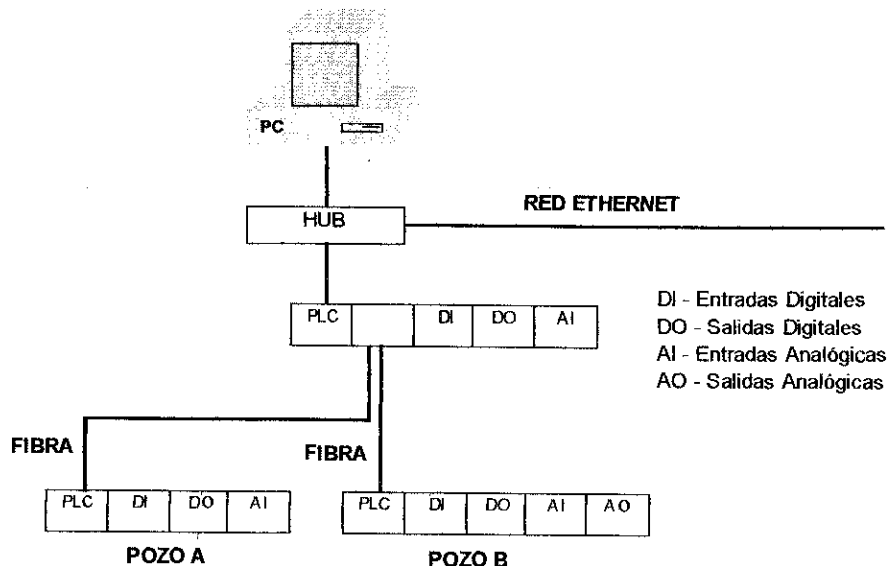
Se buscó que los instrumentos fueran fáciles de usar, con el menor mantenimiento posible y preferiblemente que cumplieran con el estándar FF. En caso de que no cumplieran con el estándar, y dieran su medición en el estándar de 4 – 20 mA, se utilizaría el convertidor de corriente a FF IF302 para poder integrar la medición al bus digital.

Para determinar el mejor sistema de control para resolver el problema, fue necesario el estudio detallado de los requerimientos de comunicación de la PC, comunicación hacia los dispositivos de campo, al controlador central, disponibilidad del equipo (tiempo de entrega), soporte técnico por parte del fabricante, costo de instalación, entre otros.

Dada la experiencia del personal en el uso del *software* de Siemens, Simatic Step 7, se planteó como solución viable implementar el sistema de control utilizando este *software* junto con el *software* propietario WinCC para la realización de los HMI. Siemens no maneja el concepto de un bus de campo utilizando el protocolo estándar FF, sino que ofrece soluciones a través de Profibus DP o soluciones con el protocolo de 4 – 20 mA; dicho en otra forma, su equipo no tiene la capacidad de comunicación con el bus digital FF, tanto PLC como instrumentos de campo.

Con esta limitante, la solución que se planteó al problema fue de colocar un PLC de la serie 200 en cada pozo y un PLC de la serie 300 en la sala de bombas. Los PLC de los pozos se comunicarían a la sala de bombas a través de un enlace de fibra óptica (vid Figura No. 7); es decir, se agregaría un transductor de fibra a cobre en cada uno de los puntos. Con este enlace de fibra, sería posible la visualización de las distintas variables del proceso que los instrumentos en cada pozo estuvieran midiendo.

Figura No. 7 Sistema propuesto basado en SIMATIC Step 7



Dada la poca oferta de instrumentación con el protocolo Profibus, se descartaron instrumentos con dicha comunicación. De esta manera, fue necesario tomar en cuenta instrumentos de campo que tuvieran la capacidad de comunicación con el protocolo de 4 – 20 mA. Instrumentos, que enviarían su señal a tarjetas de entrada y salida analógica instaladas en cada uno de los PLC. Como el arranque y paro de las bombas, así como la serie de luces piloto ubicadas en los paneles, son señales digitales, se contaría también con tarjetas de entrada y salida digitales en los PLC.

Para poder descargar el programa a los PLC se utilizaría un módulo de comunicación ethernet en el PLC de la sala de bombas, el cual se comunicaría con la computadora a través de la red ethernet de la empresa. El PLC de la sala de bombeo, sería el encargado de retransmitir la parte del programa que debía de residir en los PLC de la serie 200 instalados en los pozos. La configuración de los HMI para el operario de turno, se realizaría con el software de Siemens, WinCC.

Todo sistema de control tiene sus ventajas y desventajas (vid Cuadro No. 8). La propuesta planteada en base al software y hardware de Siemens resultaba de las más económicas y con ventajas de más peso que las desventajas, pero no era congruente con la idea de incursionar en el área de los buses de campo inteligentes.

Cuadro No. 8 Ventajas y desventajas de Step 7 y WinCC

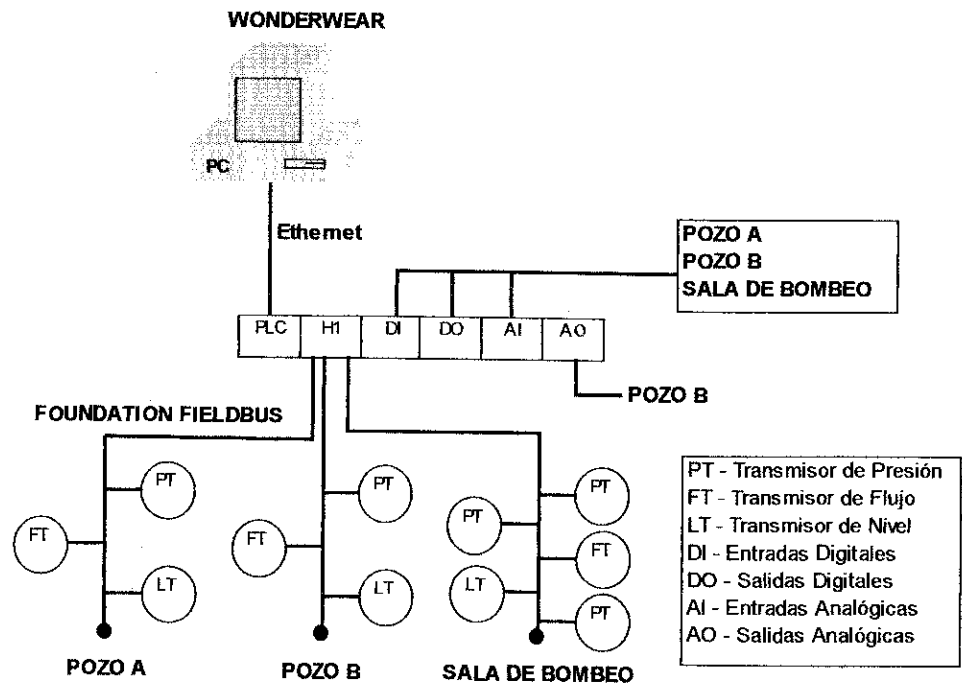
Ventajas	Conocimiento del lenguaje de programación Step 7 y WinCC.
	Confiable del fabricante.
	Solución bastante económica al problema.
	Existencia de licencias del software en la empresa.
	Ante falla de la comunicación hacia los pozos, estos podían seguir operando independientemente.
	Soporte técnico en menos de 24 horas en el país.
Desventajas	Instrumentación y equipo no poseen capacidad de comunicación bajo el protocolo estándar FF.
	Tiempo de entrega del equipo, instrumentación y repuestos muy largo. De 10 a 12 semanas.
	Costo de instalación se incrementaría ya que sería necesario cablear cada instrumento a cada tarjeta del PLC.
	Equipos e instrumentos propietarios, no compatibles con otras marcas.

Otra solución propuesta fue un sistema híbrido, combinación de señales de 4 – 20 mA analizadas a la vieja usanza, combinadas con instrumentos certificados FF. Este sistema híbrido propuesto, era parte de una solución basada en productos Allen Bradley. Este fabricante tenía una presencia fuerte dentro de la empresa, se poseían licencias del programa RSLogix 500 para configuración del sistema de control lo cual le representaría a la empresa una reducción considerable en el costo de las mismas.

Se contempló utilizar un PLC de la serie ControlLogix; este PLC es modular, es decir, tiene la capacidad de ampliación por medio del uso de tarjetas adicionales. Se proponía el uso de una tarjeta con capacidad de comunicación H1 (FF) para la instrumentación certificada FF instalada en cada pozo y en la sala de bombeo, aunque no se conocía de la capacidad del PLC de manejar los bloques de función sobre los cuales se basa FF.

Se utilizaría un solo lazo del bus para cada pozo así como la sala de bombeo; es decir, se implementa un sistema híbrido entre un sistema convencional con capacidades de FF. Ante la falta de módulos Allen Bradley para entradas y salidas analógicas sobre FF, era necesario cablear cada señal analógica desde los pozos hasta la sala de bombeo donde se tendría una serie de tarjetas de entradas y salidas analógicas y digitales para las mismas (vid Figura No. 8).

Figura No. 8 Sistema propuesto basado en RSLogix 500



El PLC de Allen Bradley tendría una tarjeta de comunicación Ethernet para su configuración y comunicación hacia la estación de trabajo, en la cual se configuraría todo el sistema de control así como el HMI. Se proponía diseñar los HMI utilizando el *software* InTouch de Wonderware, este *software* es no propietario de Allen Bradley y era necesaria la adquisición de sus licencias. Las ventajas y desventajas de la implementación de este sistema basado en *software* y *hardware* Allen Bradley se aprecian en el Cuadro No.9.

El modelo que se diseñó sobre Allen Bradley resultó con desventajas de mucho peso, como el hecho de que era necesario cablear cada una de las señales analógicas y digitales de los pozos, hacia la Sala de bombeo. Siendo la mano de obra uno de los rubros más caros en la instalación del equipo; adicionalmente, el personal con

representación de Allen Bradley en Guatemala, no poseía los conocimientos necesarios para proporcionar soporte técnico ante cualquier falla del sistema.

Cuadro No. 9 Ventajas y desventajas RSLogix 500 e InTouch

Ventajas	Conocimiento del lenguaje de programación RSLogix 500
	Confiabilidad del fabricante.
	Existencia de licencias del <i>software</i> en la empresa.
	Soporte técnico en menos de 24 horas en el país.
	Uso parcial de las capacidades del bus digital FF.
	Uso de <i>software</i> no propietario para el diseño de los HMI.
Desventajas	El costo de la instalación se incrementaría ya que sería necesario cablear todas las señales discretas y analógicas desde cada pozo hacia las tarjetas de entradas y salidas en el PLC ubicado en la sala de bombeo.
	Se ignoraba capacidad del PLC de manejar los bloques de función de FF para la instrumentación certificada.
	Ningún conocimiento de los representantes de Allen Bradley en Guatemala del uso de FF con sus productos.

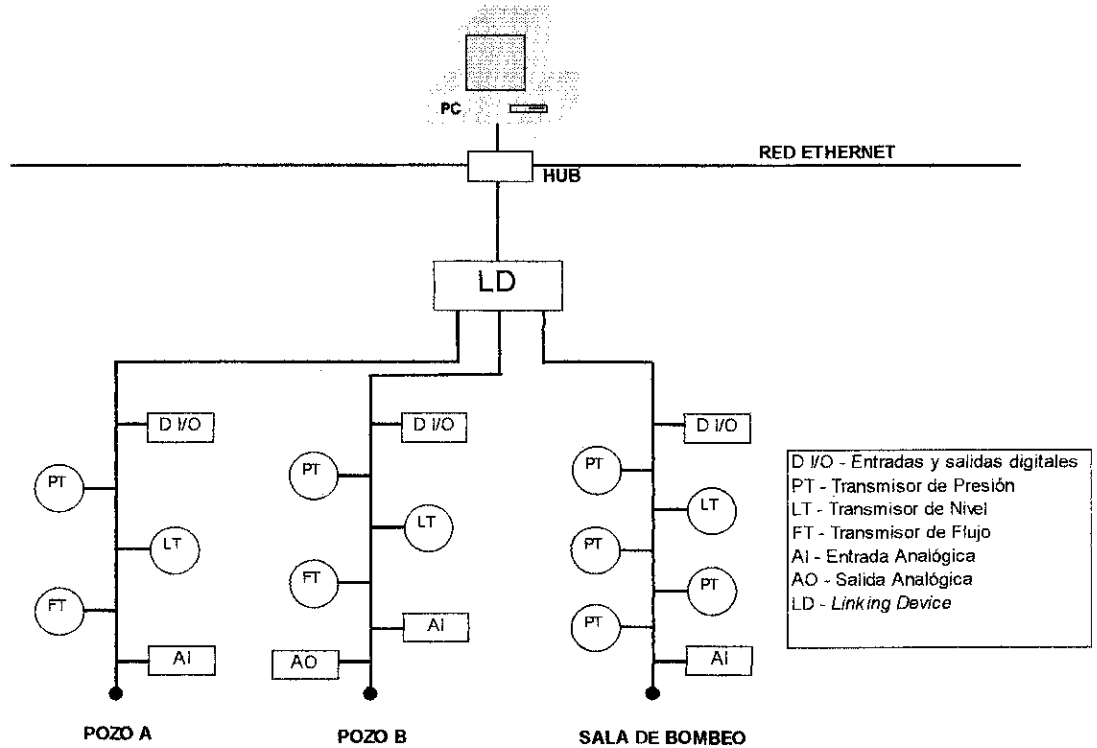
La última propuesta que se tomó en cuenta para mejorar el funcionamiento del sistema de pozos de agua por medio de un sistema de control automático fue utilizar el sistema de control System302 de Smar. Este sistema era completamente compatible con el protocolo estándar Foundation Fieldbus y se proponía utilizar un solo lazo del bus para controlar cada pozo y la sala de bombas.

Entre el equipo ofrecido por el fabricante, existían módulos de entradas y salidas digitales con capacidad de comunicación FF así como convertidores de señales de corriente a FF. Esto reduciría considerablemente el costo de la instalación ya que las señales discretas y analógicas podían ser procesadas en cada pozo y no sería necesario cablearlas a tarjetas de entradas y salidas en la sala de bombeo (vid Figura No. 9).

De igual forma, se mantendría el control independiente de cada pozo, ante cualquier falla en la sala de bombeo. Como ya se mencionó, estos módulos no sólo tenían la capacidad de servir como interfase entre las señales convencionales con el bus digital, sino además, tenían la capacidad de tener sus propios bloques de función, poder llevar el control del proceso y funcionar como maestro en las comunicaciones.

Las licencias para la configuración del sistema de control debían ser adquiridas por la empresa, ya que por ser un sistema basado totalmente en FF, y siendo su posible primera instalación en el área centroamericana, no se poseía licencia alguna. Para la configuración de los HMI se utilizaría el *software* Genesis32 de Iconics, del cual ya se poseía licencia y únicamente era requerida una actualización a la última versión existente en el mercado. Este *software* estaba certificado para trabajar con servidores de datos OPC, lo cual permitía estar trabajando totalmente con protocolos abiertos no propietarios.

Figura No. 9 Sistema propuesto basado en el System302



La propuesta del fabricante apuntaba a poder controlar independientemente cada pozo de si existía o no comunicación digital hacia los mismos. Esto se lograría utilizando la capacidad de maestro que todos los transmisores poseían. Al utilizar las capacidades de FF tanto en su arquitectura como en su funcionamiento, la mejora al sistema de pozos de agua podía ser certificada FF. Sus ventajas y desventajas se pueden apreciar en el Cuadro No. 10.

Cuadro No.10 Ventajas y desventajas del System302 y Genesis32

Ventajas	Uso al máximo de las características y capacidades de FF.
	Sistema totalmente distribuido en el campo.
	Es posible mantener el funcionamiento de los pozos ante una falla en la comunicación hacia los mismos.
	Soporte técnico en menos de 24 horas en el país.
	Reducción de costos en la instalación.
	Sistema robusto para futuras ampliaciones y mejoras.
	Sistema de control y HMI basado en protocolos abiertos.
Desventajas	Adquirir únicamente actualización de licencias del <i>software</i> para configuración de los HMI.
	Poco conocimiento en el área centroamericana del funcionamiento y configuración de sistemas de control basados en FF.
	Es necesario adquirir licencias nuevas para el sistema de control

Para la solución utilizada para controlar de forma automática el sistema de pozos de agua, se hizo un análisis profundo, científico y económico de cada una de las propuestas, tomando en cuenta factores tan variados tales como tiempo de entrega del equipo, confiabilidad, costos (el presupuesto asignado era de los principales limitantes), instalación del equipo, soporte técnico, entre otros. En esta etapa se hicieron tablas comparativas por cada una de las soluciones propuestas, analizándose al más mínimo detalle para determinar la mejor solución a implementar (relación costo beneficio).

En el análisis de la instrumentación, se descartó la medición de nivel por sonda como medida redundante del nivel de agua en el pozo por el alto costo de las mismas. Así mismo, se descartó la adquisición de nuevos transmisores de flujo, al utilizar la actualización de *hardware* ofrecida por la empresa Foxboro para que los ya existentes, tuvieran comunicación y total compatibilidad con el sistema de control basado en FF. Esta actualización, junto con la eliminación de las sondas de nivel, representó un ahorro aproximado de US\$17,000.00 el cual se aprovechó en otras áreas del proyecto.

En el análisis del cloro residual, la instrumentación que nos proveía de la mejor relación costo beneficio fue la de los analizadores de cloro marca ProMinent. En este punto influyó mucho el factor económico, ya que el mejor analizador amperométrico de cloro era ofrecido por la empresa Rosemount, pero la diferencia de US\$2,500.00 por cada analizador resultó ser una característica excluyente.

El analizador de cloro de la empresa Rosemount era el mejor que se podía instalar ya que utilizaba cuatro sondas para dar su lectura. Utilizaba una sonda para analizar la concentración de cloro, dos sondas para la compensación por pH y una sonda adicional para la compensación por temperatura. Esto, en comparación de la sonda de concentración de cloro y la sonda de compensación por temperatura del analizador de ProMinent, resultan considerables las diferencias. Pero como se mencionó, la diferencia económica resultó de mayor peso en esta medición no tan crítica.

Dado que la comunicación de los analizadores de cloro está basada en el protocolo de 4 – 20 mA, se adquirió un convertidor de corriente a FF marca SMAR por cada pozo para contar con su respectiva lectura en el bus digital.

La medición de cloro no es tan crítica, ya que no es el único punto donde se purifica el agua a utilizar por la empresa. La inyección de cloro gaseoso se hace como una primera medida para purificar el agua, pasando luego al proceso de tratamiento del agua para su acondicionamiento dependiendo de su uso.

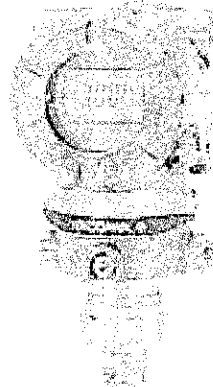
Se mencionó con anterioridad que estos pozos fueron construidos, instalando en su momento diversos instrumentos de medición, muchos de los cuales nunca fueron cableados o si quiera probados. Entre estos instrumentos instalados sin previo análisis, estaban los transmisores de presión y los transmisores de flujo. Se tuvo la suerte que los transmisores de flujo Foxboro previamente instalados, estaban correctamente dimensionados e instalados (cumpliendo los requerimientos de la Figura No. 4), por lo cual la instalación de la actualización de *hardware* resultó viable.

No fue así el caso de los transmisores de presión. Se tenían transmisores de presión Foxboro previamente instalados pero no poseían pantallas a través de las cuales se pudiera ver el valor medido y poseían comunicación de 4 – 20mA, lo cual fue un factor adicional para su remoción. Para solucionar este problema, se determinó que los mejores transmisores de presión (relación costo beneficio) eran los Yokogawa. Estos transmisores, sí poseían

capacidad de comunicación sobre FF y poseían pantallas para visualización de las mediciones y botones para configuración en el lugar de instalación (vid Figura No. 10). Se tuvo el cuidado de dimensionarlos acorde a las características del proceso, presiones, conexión a la tubería, tipo de sensor, temperatura del agua y condiciones ambientales fueron meticulosamente estudiadas para dimensionar correctamente estos dispositivos.

Figura No. 10 Transmisor de presión certificado FF con indicador.

(Cortesía de Yokogawa)



Adicionalmente, fue necesaria la adquisición de nuevos paneles de control, los cuales también debían de cumplir con la norma NEMA 4X para impedir el ingreso de agua y humedad. Se adquirieron paneles marca Rittal en dos tamaños, de 800x600x300mm para los pozos y de 1200x750x350mm para la Sala de bombeo.

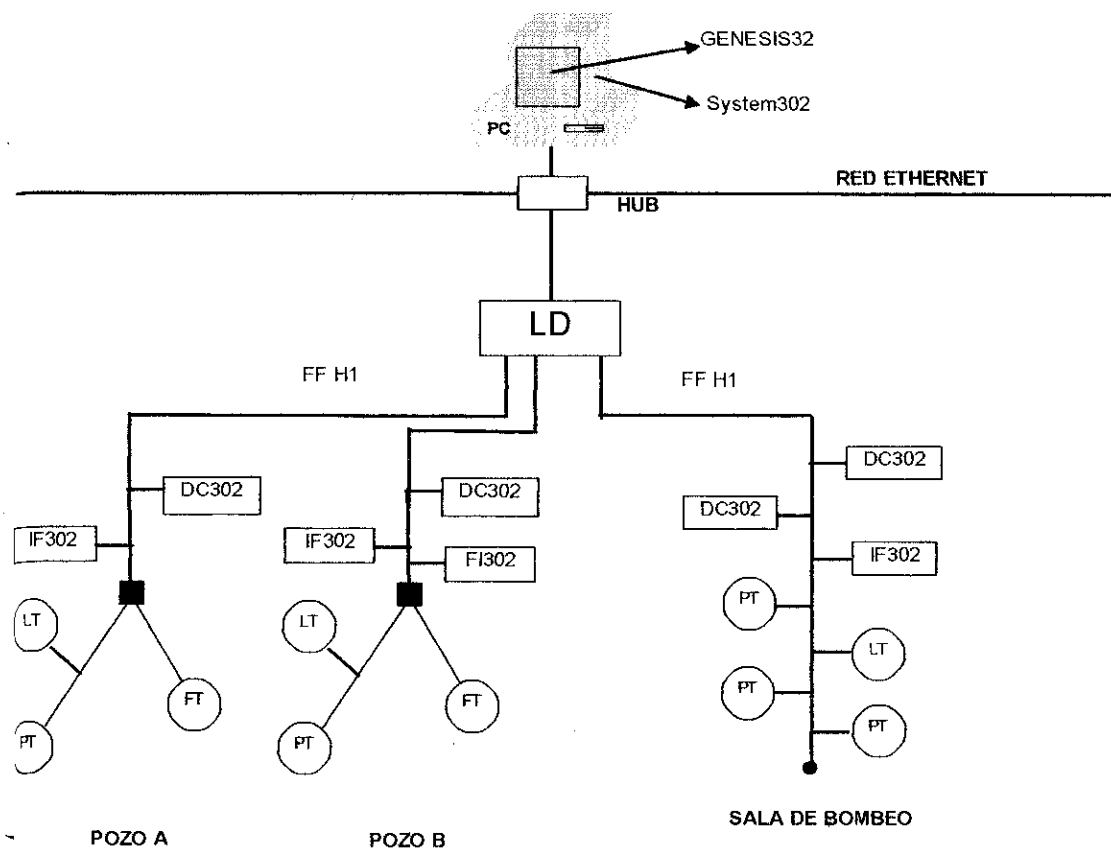
Entre los elementos necesarios para la correcta implementación del sistema de control que debían ir instalados dentro de los paneles, estaban relés, canaleta, fuente de poder, supresor de sobrecargas, fusibles, bomeras, módulos para entradas y salidas digitales, el convertidor de corriente a FF, botoneras, terminales para cables, identificadores para cables, luces piloto, entre otras (vid Figuras No. 15, 16, y 17 en Anexos). Para su construcción y diseño, se utilizaron los mejores procedimientos y normas que se utilizan en la industria, llevando el orden, limpieza, claridad y seguridad, necesarios para facilitar el cableado entre dispositivos así como para facilitar la búsqueda ante posibles fallas.

Se mencionó con anterioridad que en el estudio previo realizado en el área, se tomó en cuenta la infraestructura ya existente. Para no asignar fondos a grandes remodelaciones de tubería eléctrica, tubería de señal, montaje de paneles y equipo, se acomodó el sistema de control que se instaló, a la infraestructura ya existente y de esta forma se optimizaron los recursos.

De esta manera, se tomó la decisión de implementar un sistema de control automático para los pozos, basado en la propuesta de SMAR con su System302 y HMI con GENESIS32, acoplándolo a la infraestructura ya existente en la medida de lo posible (vid Figura No. 11). Dada la infraestructura existente y la facilidad de cablear los convertidores y transmisores con la tubería ya instalada, fue que se tomó la decisión de utilizar el sistema completamente basado en Foundation™ Fieldbus pero utilizando una topología tipo *daisy chain* para la

la de bombeo y combinación de *daisy chain* con tipo árbol para los dos pozos. De esta manera se logró optimizar el cableado y el tiempo de puesta en marcha.

Figura No. 11 Sistema de control implementado con Foundation Fieldbus

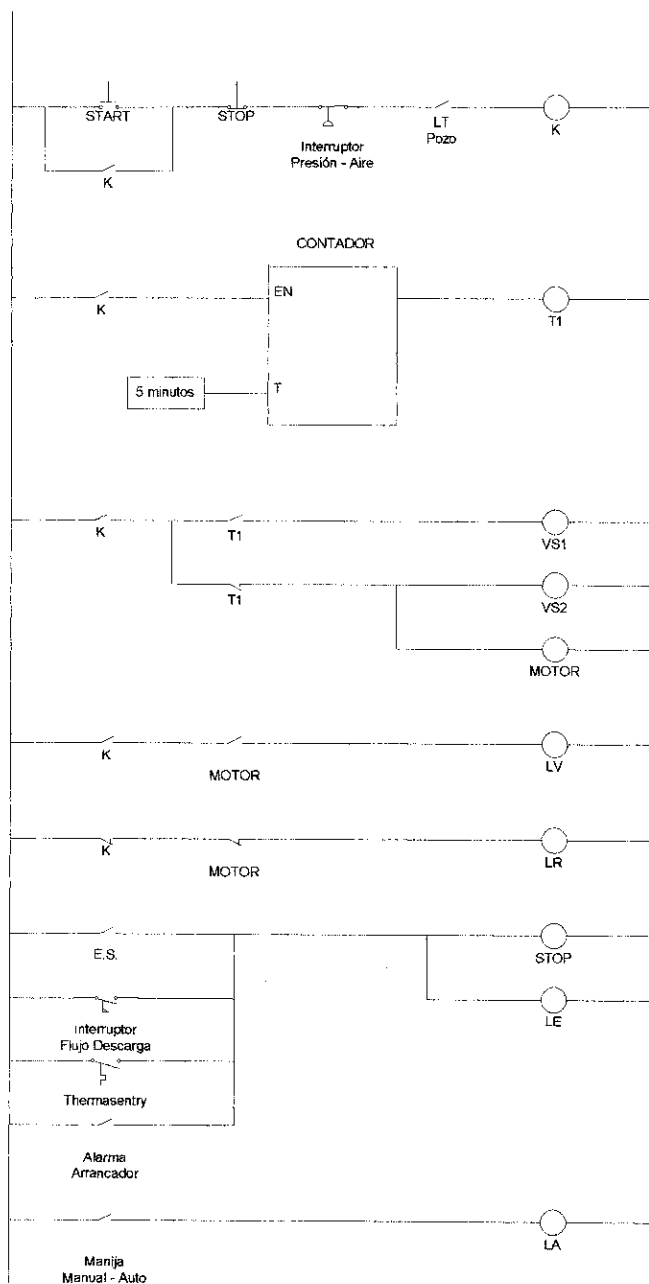


El programa de *software* para controlar automáticamente los pozos, se basó en el modelo de control de cada pozo (vid Figura No. 5).

Utilizando como base este modelo, se desarrolló el programa en lenguaje LADDER, comentado de la forma más clara posible (vid Figura No. 12).

Este lenguaje es el lenguaje universal de programación en la industria, el cual está diseñado para que cualquier técnico electricista, ingeniero eléctrico o ingeniero electrónico, pueda entender el funcionamiento de todo el sistema, ya que serán las personas con estas profesiones, las que tendrán la responsabilidad de dar el mantenimiento correctivo o preventivo, según amerite el caso.

Figura No. 12 Programa de control de los pozos, en lenguaje LADDER



Al recibir el mando de arranque, si el interruptor de presión de aire está cerrado y el LT registra un nivel adecuado de agua en el pozo, permitirá energizar la bobina K.

Al energizarse la bobina K, habilitará al contador para que inicie su conteo, según pre-fijado por el ingeniero. En este caso, se inicializa el contador con 5 minutos de duración.

Si la bobina K está energizada y la bobina T1 habilitada por el contador, entonces se energiza la bobina VS1, la cual abrirá la válvula de lubricación del eje. Si la bobina K está energizada y la bobina T1 deshabilitada porque ya pasaron los 5 minutos, energizará la bobina VS2 y la bobina MOTOR. VS2, abrirá la válvula de cloración y la bobina MOTOR, le enviará la señal de arranque al arrancador del motor.

Si la bobina K está energizada y la bobina MOTOR también, se encenderá la luz piloto color verde.

Si la bobina K no está energizada y la bobina MOTOR tampoco, se encenderá la luz piloto color rojo.

Si es presionado el botón de paro de emergencia ó si se recibe una señal de alarma del arrancador del motor ó si el Thermasentry detecta una violación a las temperaturas de funcionamiento del motor ó si el interruptor de flujo detecta ausencia del mismo, a pesar de estar funcionando ya el motor, energizará la bobina STOP y la bobina LE. La bobina STOP, desconectará la primera línea de este programa, desenergizando la bobina K y por consiguiente apagando el motor. La bobina LE, encenderá la Luz de Emergencia localizada en la parte superior del panel.

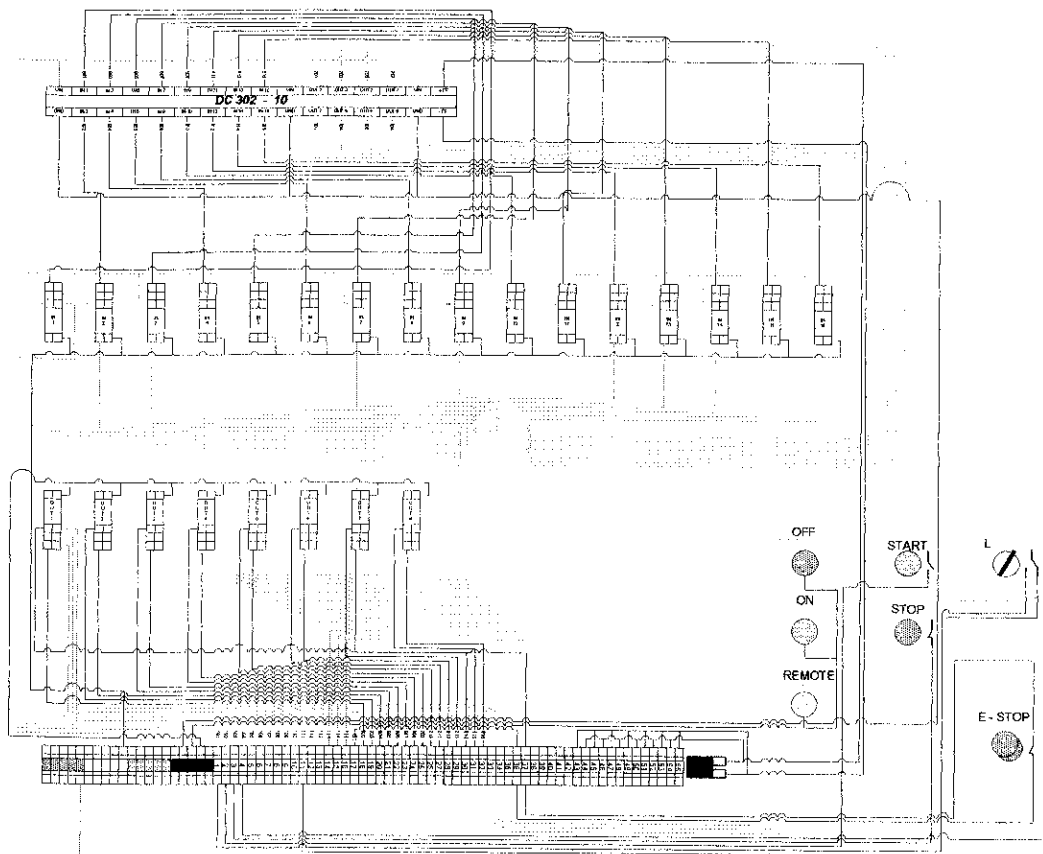
Si la manija de Manual - Automático, se encuentra seleccionando la opción Manual, el funcionamiento del pozo entrará en modo manual y se encenderá la luz amarilla.

- START = Mando de arranque
- STOP = Mando de paro
- LT = Transmisor de nivel
- K = Variable
- T1 = Variable
- VS1 = Válvula Solenoide de lubricación
- VS2 = Válvula Solenoide de cloración
- LV = Luz piloto color verde
- LR = Luz piloto color rojo
- LE = Luz de Emergencia sobre el panel
- LA = Luz piloto color amarillo

De forma paralela al desarrollo del programa de control de los pozos, se diseñaron los HMI necesarios para que el operario de turno tuviera una interfaz con la cual pudiera operar todo el sistema y tuviera la mayor cantidad de información. Como se mencionó con anterioridad, los HMI se desarrollaron utilizando el paquete GENESIS32 de Iconics. Ante la necesidad de poder tener una visión completa del sistema, se diseñaron e implementaron tres pantallas para el operario (vid Figura No. 18 y 19 en Anexos), un HMI para cada pozo y dos HMI para la Sala de bombeo. Con estas pantallas, tanto el operario como el ingeniero a cargo del área, tienen ahora una interfaz con la cual pueden controlar todo el proceso de arranque de cada pozo y arranque de las bombas instaladas en la Sala de bombeo. Así mismo, se desarrollaron de tal forma, que se pueden apreciar las distintas variables que intervienen en el proceso.

Finalmente se entregó la documentación necesaria a la empresa para su archivo, la cual consistió en copias del programa implementado (vid Figura No. 12), planos eléctricos de los paneles (vid Figura No. 13) y un documento con toda la información técnica relacionada al proyecto (copia impresa y copia digital).

Figura No. 13 Plano eléctrico del cableado en los paneles



VI. CONCLUSIONES

- A. Es posible el uso del protocolo FF en un sistema de pozos de agua para obtener un verdadero y distribuido control del proceso.
- B. Se diseñó un sistema de control digital para la extracción de agua en un pozo industrial.
- C. Se logró tener un control independiente sobre cada uno de los pozos y del tanque de captación.
- D. Se redujeron los costos en instalación y mantenimiento del nuevo sistema de control del sistema de pozos de agua de la empresa, respecto a otras soluciones tecnológicas posibles.
- E. Se disminuyó al mínimo los problemas debidos a errores humanos con el nuevo sistema de control digital del sistema de pozos de agua, basado en el protocolo Foundation Fieldbus.
- F. Se redujo el tiempo de respuesta ante una falla en alguno de los componentes del sistema, al reducir el tiempo de detección de las mismas.
- G. El uso de FF implica un cambio radical en la forma tradicional de controlar los procesos.

VII. RECOMENDACIONES

- A. Se recomienda el estudio y uso de Foundation Fieldbus en diferentes sistemas de control en la industria guatemalteca.
- B. Utilizar las mediciones de nivel por sonda como seguridad redundante para los pozos.
- C. Por la falta de bibliografía sobre FF y sus aplicaciones en la industria, se recomienda documentar cualquier sistema de control que utilice este protocolo.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. Berge, Jonas. 2002. *Fieldbuses for Process Control: Engineering, Operation, and Maintenance*. 1a ed. Research Triangle Park, Carolina del Norte. EEUU, ISA. 460 pp.
2. Fieldbus Foundation. *Foundation Fieldbus Technical Overview* [cd-rom]. [Austin, Texas]. 2003. 3ª Revisión.
3. Fisher-Rosemount. *Fieldbus Technical Overview* [cd-rom]. [EEUU]. 1998.
4. Kayser, D.; Langford, C. y Lipták, Béla. 2003. «Bubblers». En *Instrument Engineer's Handbook*, de Béla Lipták. Boca Ratón, Florida. EEUU, CRC Press LLC. págs. 421-429
5. Kopp, J, *et al.* 1969. «Vortex and Fluidic Flowmeters». En *Instrument Engineer's Handbook*, de Béla Lipták. Boca Ratón, Florida. EEUU, CRC Press LLC. págs. 384-394
6. Lipták, Béla y Jamison, J. 2003. «Diaphragm or Capsule-Type Sensors». En *Instrument Engineer's Handbook*, de Béla Lipták. Boca Ratón, Florida. EEUU, CRC Press LLC. págs. 736-742
7. SMAR. *Fieldbus Tutorial* [cd-rom]: *a Foundation Fieldbus Technology Overview*. [Houston, Texas]. 1999.
8. Tanenbaum, Andrew. 1997. *Redes de Computadoras*. Naucalpan de Juárez, Estado de México. México, Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. 813 pp.
9. Whittle, G. y Lipták, Béla. 2003. «Chlorine». En *Instrument Engineer's Handbook*, de Béla Lipták. Boca Ratón, Florida. EEUU, CRC Press LLC. págs. 1251-1257

IX. APÉNDICE

A. Norma NEMA 4X

Safety

NEMA Enclosures

NEMA Enclosures

Specify the Correct Enclosure for Your Motor Controls

Type 1

General Purpose Surface Mounting

Type 1 enclosures are intended for indoor use primarily to provide a degree of protection against contact with the enclosed equipment in locations where unusual service conditions do not exist. The enclosures are designed to meet the rod entry and rust-resistance design tests.

Enclosure is sheet steel, treated to resist corrosion.

Type 1

Flush Mounting

Type 1 Flush mounting enclosures for installation in machine frames and plaster wall. These enclosures are for similar applications and are designed to meet the same tests as

Type 1 surface mounting.

Type 3

Rainproof Dusttight

Type 3 enclosures are intended for outdoor use primarily to provide a degree of protection against windblown dust, rain and sleet; and to be undamaged by the formation of ice on the enclosure. They are designed to meet rain __, external icing __, dust, and rust-resistance design tests. They are not intended to

provide protection against conditions such as internal condensation or internal icing.

Type 3R

Rainproof

Type 3R enclosures are intended for outdoor use primarily to provide a degree of protection against falling rain, and to be undamaged by the formation of ice on the enclosure. They are designed to meet rod entry, rain __ external icing __, and rust-resistance design tests. They are not intended to provide protection against conditions such as dust, internal condensation, or internal icing.

Type 4

Watertight

Type 4 enclosures are intended for indoor or outdoor use primarily to provide a degree of protection against windblown dust and rain, splashing water, and hose-directed water; and to be undamaged by the formation of ice on the enclosure. They are designed to meet hosedown, dust, and external icing tests __. They are not intended to provide protection against conditions such as internal condensation or internal icing.

Type 4X

Non-Metallic,

Corrosion-Resistant

Type 4X enclosures are intended for indoor or outdoor use primarily to provide a degree of protection against corrosion, windblown dust and rain, splashing water, and hose-

__ Evaluation criteria: No water has entered enclosure during specified test.

__ Evaluation criteria: Undamaged after ice buildup during specified test has melted

(Note: Not required to be operable while ice-laden.

__ Evaluation criteria: No water shall have reached live parts, insulation or mechanisms.

directed water; and to be undamaged by the formation of ice on the enclosure. They are designed to meet the hosedown, dust, external icing __, and corrosion-resistance design tests.

They are not intended to provide protection against conditions such as internal condensation or internal icing.

Type 6P

For Prolonged Submersion at a Limited Depth

Type 6P enclosures are intended for indoor or outdoor use primarily to provide a degree of protection against the entry of water during prolonged submersion at a limited depth; and to be undamaged by the formation of ice on the enclosure. They

are designed to meet air pressure, external icing __, hosedown and corrosion-resistance design tests. They are not intended to provide protection against conditions such as internal condensation or internal icing.

Type 7

For Hazardous Gas Locations

Type 7 enclosures are for indoor use in locations

classified as Class I, Groups C or D, as defined in the U.S. National Electrical Code. Type 7 enclosures are designed to be capable of withstanding the pressures resulting from an explosion of specified gases, and contain such an explosion sufficiently that an explosive gas-air mixture existing in the atmosphere surrounding the enclosure will not be ignited. Enclosed heat generating devices are designed not to cause external surfaces to reach temperatures capable of igniting explosive gas-air mixtures in the surrounding atmosphere. Enclosures are designed to meet explosion, hydrostatic, and temperature design tests. Finish is a special corrosion-resistant, gray enamel.

Type 9

For Hazardous Dust Locations

Type 9 enclosures are intended for indoor use in locations classified as Class II, Groups E, F, or G, as defined in the U.S. National Electrical Code. Type 9 enclosures are designed to be capable of preventing the entrance of dust. Enclosed heat generating devices are designed not to cause external surfaces

to reach temperatures capable of igniting or discoloring dust on the enclosure or igniting dust-air mixtures in the surrounding atmosphere. Enclosures are designed to meet dust penetration and temperature design tests, and aging of gaskets. The outside finish is a special corrosion-resistant gray enamel.

Type 12

Dusttight Industrial Use

Type 12 enclosures are intended for indoor use primarily to provide a degree of protection against dust, falling dirt, and dripping non-corrosive liquids. They are designed to meet drip, dust, and rust-resistance tests. They are not intended to provide protection against conditions such as internal condensation.

Type 13 Oiltight

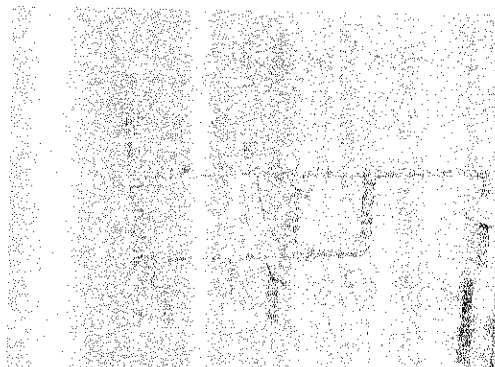
Type 13 enclosures are intended for indoor use primarily to provide a degree of protection against dust, spraying of water, oil, and noncorrosive coolant. They are designed to meet oil exclusion and rust-resistance design tests. They are not intended to provide protection against conditions such as internal condensation.

B. Equipo en pozos

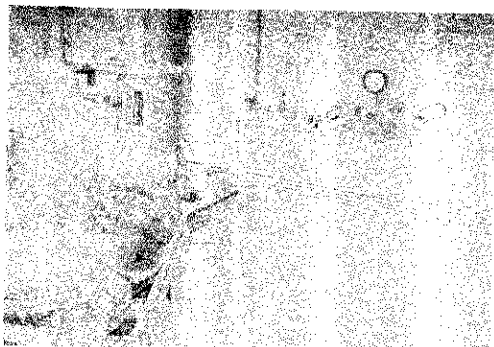
Figura No. 14 Instrumentación y equipo en los pozos original



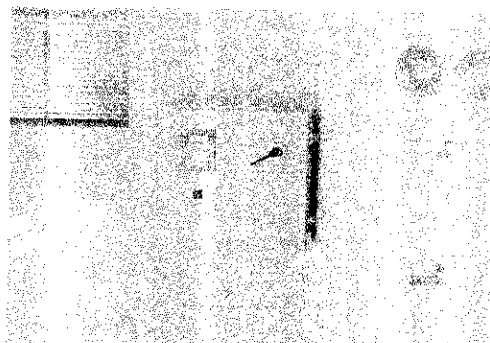
a) Detalle del pozo



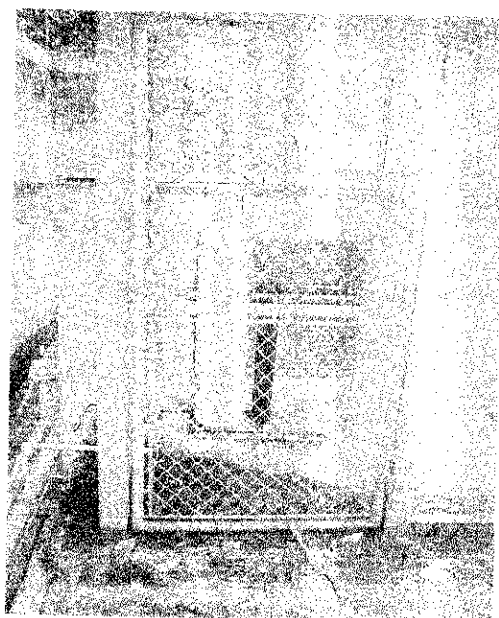
b) Sistema de lubricación



c) Sistema de nivel por burbujeo



d) Panel existente en pozo

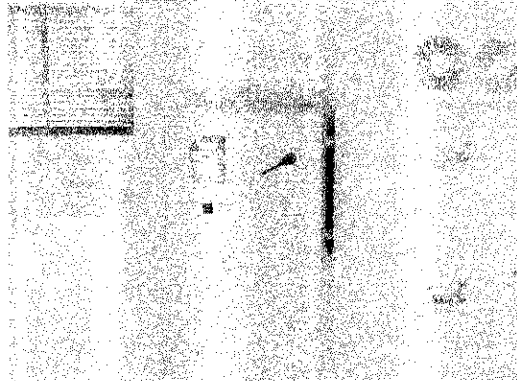


e) Sistema de cloración

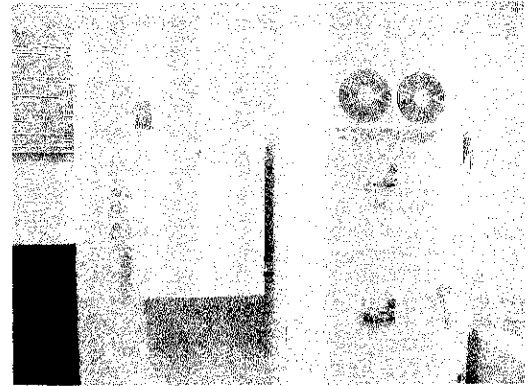


f) Tubería de descarga del pozo

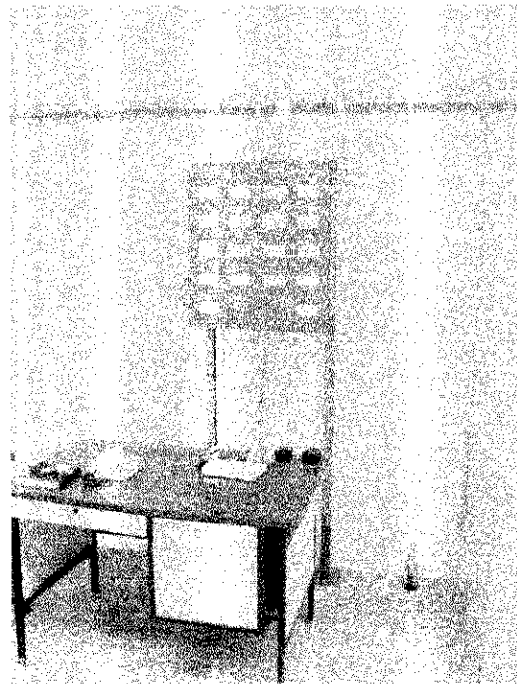
Figura No. 15 Paneles de control



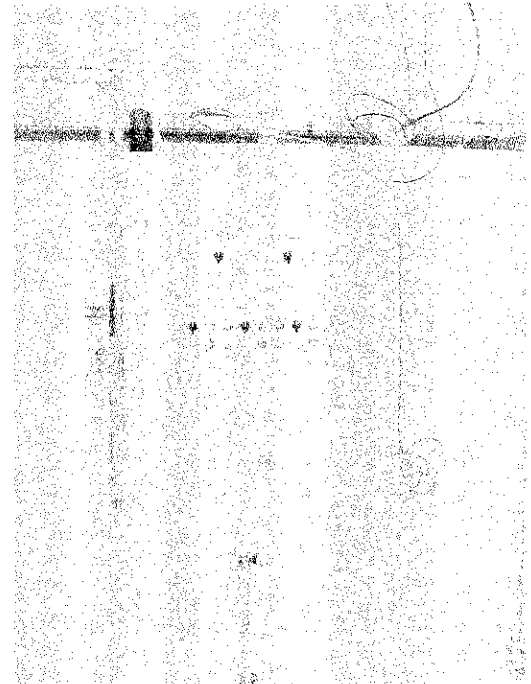
a) Panel antiguo del pozo



b) Panel nuevo del pozo



c) Panel antiguo de sala de bombeo



d) Panel nuevo de sala de bombeo

Figura No. 16 Diseño de panel de control para los pozos

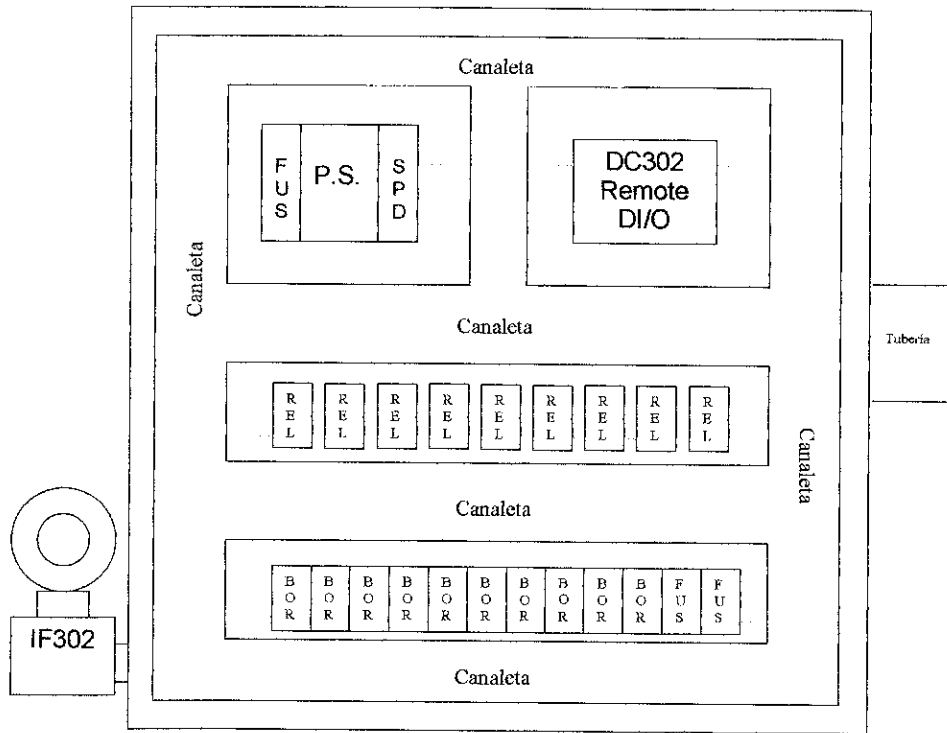
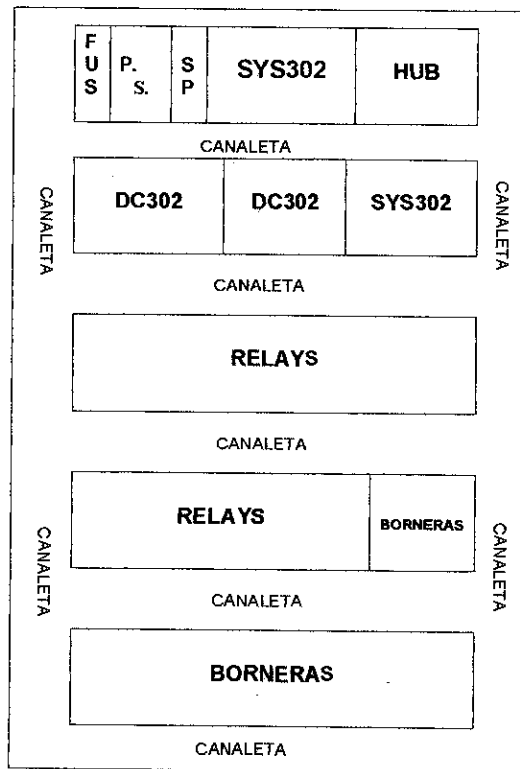
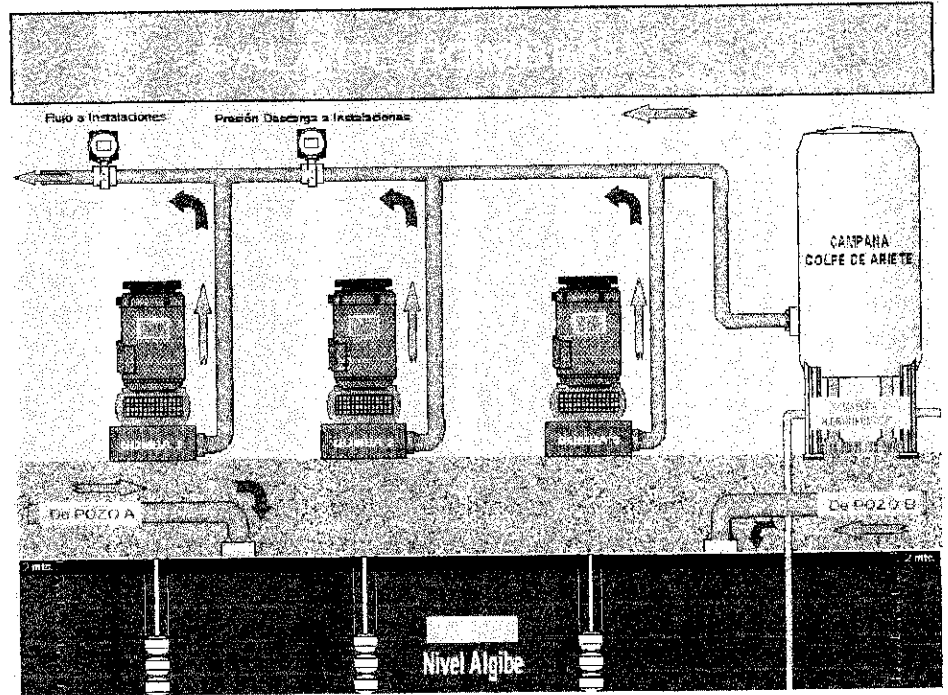


Figura No. 17 Diseño de panel de control para sala de bombeo

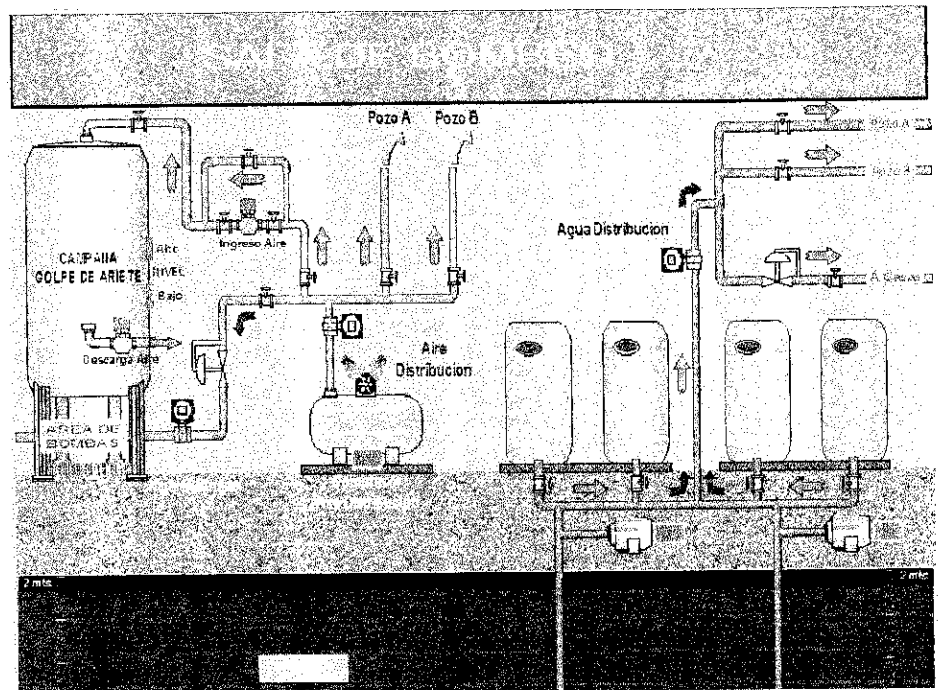


C. Interfaces hombre máquina (HMI)

Figura No. 18 HMI para Sala de bombeo

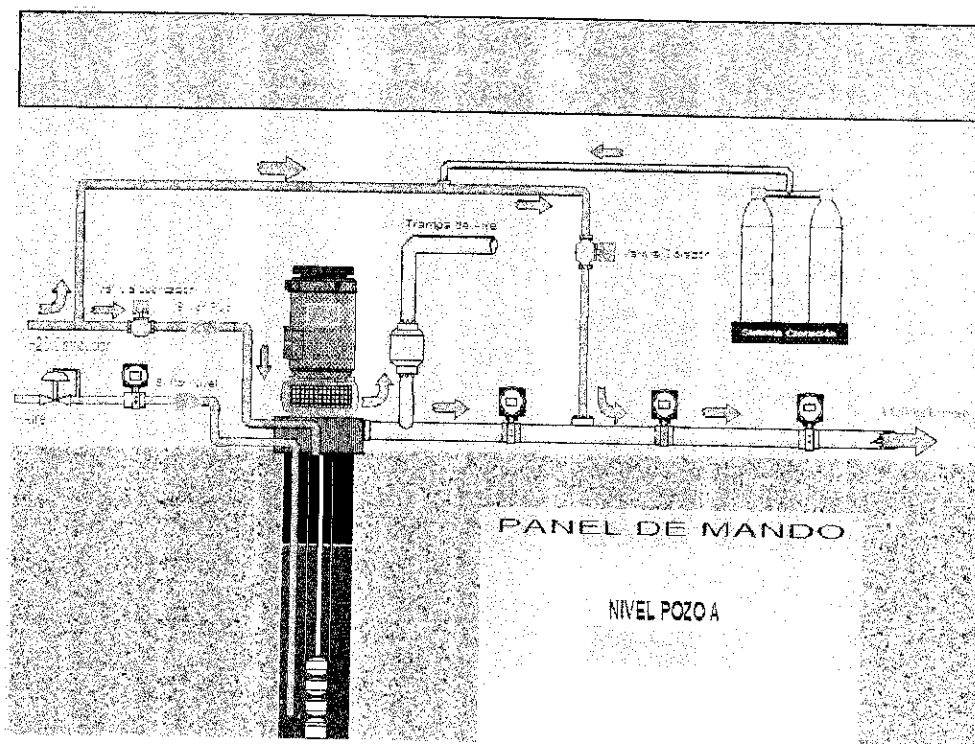


a) HMI para control de arranque de motores



b) HMI para control de arranque de compresor y bombas de agua

Figura No. 19 HMI para control de los pozos



D. GLOSARIO

Bus de campo

Nivel inferior de la jerarquía de la red industrial, en el cual están instalados los instrumentos de medición, actuadores y válvulas.

Daisy Chain

Dispositivos conectados en series lineales.

Sala de bombeo

Área principal de todo el sistema de pozos en la cual se recolecta toda el agua que proviene de los pozos A y B, para luego ser bombeada a las instalaciones centrales.

Sistema de control

Conjunto de componentes que pueden regular la conducta de otro sistema con el fin de lograr una respuesta esperada.

Sistema de control automático

Mantenimiento de un valor deseado dentro de una cantidad o condición, midiendo el valor existente, comparándolo con el valor deseado, y utilizando la diferencia para proceder a reducirla. En consecuencia, el control automático exige un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención humana.

Solución reguladora

Son aquellas que ante la adición de un ácido o base son capaces de reaccionar oponiendo la parte de componente básica o ácida para mantener fijo el pH.