

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Electrónica



Análisis, diseño e implementación de un sistema de monitoreo y control automático del acueducto del Residencial Cerro Colón.

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura.

Johanns Cantillo Paladino

Cartago, Diciembre del 2005

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

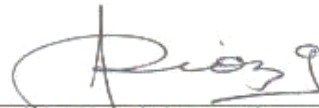
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Miguel Hernández Rivera

Profesor lector



Ing. José Alberto Díaz García

Profesor lector



Ing. Marvín Hernández Cisneros

Profesor asesor

TEC
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 09 de diciembre del 2005

Declaración de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 9 de Diciembre



Johanns Cantillo Paladino

Céd: 1-11-17-0702

RESUMEN

El aumento de demanda de agua potable, producto del incremento de población y los cambios en los hábitos de consumo, hacen evidente la importancia del control y la operación de los acueductos de manera automática.

En un afán por optimizar los controles automáticos, en los procesos que se llevan a cabo por motores eléctricos, sistemas hidráulicos y otros, se han implementado dispositivos de control industrial tal como los PLC para realizar la supervisión, registro y manejo en los distintos dispositivos y simplificar en gran manera el trabajo.

Los elementos tales como controladores lógicos programables, sensores y otros, han surgido en este proceso como las herramientas ideales para mejorar los niveles de vigilancia y control de los sistemas de distribución de agua en los residenciales, logrando mejoras en el suministro y distribución de este líquido fundamental en la vida cotidiana de las personas.

En el presente informe se detalla la utilización de la telemetría, el monitoreo, intervención de los sistemas y la automatización del proceso de suministro de agua, todo esto orientado a operar acueductos con mayor eficiencia y eficacia, con menores costos operativos y con mayor velocidad y capacidad de respuesta ante las eventualidades conocidas, basando sus decisiones operativas en la información de campo en tiempo real y las establecidas por los encargados del acueducto.

En el presente informe se describirá el diseño de los paneles y los métodos utilizados que permiten el manejo y monitoreo de los distintos equipos, tomando en cuenta las diferentes circunstancias del proceso que amerita el manejo de un acueducto residencial.

También se detallará las características de los puntos primordiales del acueducto del residencial, tomando en cuenta las razones del uso y escogencia de equipos de comunicación inalámbrica, sistemas de control y sistemas de potencia.

El diseño implementado cumple con el objetivo de centralizar el monitoreo y manejo de los distintos PLC's, brindando la regulación del nivel del agua dentro de la estructura del acueducto y acoplar los sistemas de transferencia de energía de emergencia.

La comunicación inalámbrica es el medio por utilizar, para la transferencia de datos entre las distintas entidades que controlan el acueducto.

Palabras claves: PLC, sensor de nivel, sensor de presión, sistemas de transferencia de energía de emergencia, Generadores, bombas de Agua, sistemas inalámbricos.

Summary

Potable water availability is currently facing a lot of consumer demands. This phenomenon responds to the current population explosion and consumer's unstable habits of water consumption. Therefore it becomes evident an urgent awareness on water control and appropriate pipeline management.

With the interest of optimizing automatics controls in those processes elated to electric motors, hydraulic systems, etc. There has been an increased production of equipments and components in the last decade which have greatly simplified this job.

Elements such as programmable logical controllers and sensors among others have become available in this process to optimize as the elemental tool improve production levels and control over the industries and attaining better processes which can be used in people's everyday lives.

The following report will provide a detailed demonstration on how to use the wireless system monitoring, automation, and information systems oriented to operate water with a lot of efficiency, with less operative costs and with a higher speed and capacity to answer any further faulty events, making operative decisions related to field information in real time, through the implementation of an automatic control system based on PLC's, pressure and level sensors.

All of these components will allow monitoring and management of the various states in the different processes variables within the residential pipeline.

A central control system will be in sight and under control of the different PLC's which will be in charge of regulating the pipeline system's load and the emergency transfer systems.

Wireless communication is a means to use for all data transference among the different entities with control the aqueduct.

Due to the characteristics in the location spots, the aqueduct 's control system demands the use of wireless communication devices control systems and power systems.

Keywords:

PLC, level sensor, pressure sensor, Emergency transfer systems, PID, water pumps.

*A mi Madre, Padre y Hermanas,
la familia de la que estoy orgulloso...*

Agradezco a Dios por la buena salud de quienes me rodean y pido por la de quienes la necesitan...

A mi familia, porque en ellos siempre hay apoyo, amor y comunicación. Gracias por haberme guiado a ver la vida con alegría y optimismo, y porque me han enseñado que con disciplina, organización y sacrificio se puede lograr el éxito.

A mis amigos y esas personas especiales, que brindaron apoyo y respaldo en la todas las experiencias.

A los profesores de la universidad y a quienes laboran en ésta, porque en todos encontré valiosas enseñanzas, académicas y de la vida. Gracias a aquellos que ayudaron a que estos días hayan sido más amenos y mostrar que la electrónica es un mundo fascinante.

A todas las personas de AASA y Grupo GD que no solamente ayudaron a la realización del proyecto, sino que representan y fomentan los valores en los cuales creo.

A todos muchas gracias,

Johanns Cantillo Paladino

INDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	13
1.1 Problema Existente e importancia de su solución	13
1.2 Solución seleccionada	16
1.2.1 Requerimientos	16
1.2.2 Descripción general de la solución seleccionada	17
Capítulo 2: Meta y Objetivos	21
2.1 Meta	21
2.2 Objetivo general	21
2.3 Objetivos específicos	21
2.3.1 Objetivos de hardware.....	22
2.3.2 Objetivos de software.....	22
2.3.3 Objetivos de documentación.....	22
Capítulo 3: Marco teórico	23
3.1 Descripción del sistema o proceso por mejorar	23
3.2 Antecedentes Bibliográficos	26
3.2.1 Transferencia automática de emergencia.....	26
3.2.2 Sensores y equipo de control.....	28
3.2.3 Normas y estándares oficiales.....	28
3.3 Descripción de los principales principios físicos y electrónicos relacionados con la solución.	30
3.3.1 Principios Físicos de los sistemas hidráulicos.....	30
3.3.2 Control automático.....	31
3.3.3 Sistema inalámbrico o Telemetría.....	32
3.3.4 Bombas Centrífugas y sumergibles.....	33
Capítulo 4: Procedimiento metodológico	36
4.1 Reconocimiento y definición del problema	36
El siguiente listado es el procedimiento metodológico.....	36
4.2 Obtención y análisis de información	39
4.3 Descripción Matemática de las características presentes en el proyecto	40
4.3.1 Matemática:.....	40
4.3.2 Análisis matemático de un tanque simple.....	43
4.3.3 Análisis matemático de un tanque con un controlador de caudal.....	43
4.3.4 Modelo matemático del sistema General.....	45
4.3.5 Modelado del Pozo:.....	45
4.3.6 Modelado del tanque de Rebombeo.....	46
4.3.7 Modelado del tanque de almacenamiento.....	48
4.3.8 Modelado del sistema de rebombeo del sistema presente en LAUCA.....	49
4.3.9 Función de transferencia de la planta (GP).....	49
4.3.10 Función debida al retardo del agua, entre los tanques de rebombeo y almacenamiento.....	52
4.3.11 La Función de transferencia de la bomba.....	54
4.3.12 Sistema total de tanque de rebombeo sin compensador.....	54
4.3.13 Respuesta con un controlador proporcional.....	56
4.3.14 Conceptos de los sistemas hidráulicos:.....	57
4.3.15 <i>Sistemas hidráulicos de tuberías</i>	58
4.3.16 Cálculo de la dimensión de la tubería un punto a otro.....	60
4.3.17 Cálculo de la velocidad media del agua de un punto a otro por medio de una bomba de agua.....	61
4.3.18 Cálculo de caudal de agua través de una tubería de PVC de 3 pulgadas de diámetro nominal.....	61
4.4 Ciencias de la ingeniería electrónica	63
4.4.1 Sensor de nivel Ultrasónico.....	66
4.4.2 Sensor de presión.....	67
4.5 Ciencias de la ingeniería de la computación	68
4.6 Ciencias de otras ingenierías	69
4.7 Estudios complementarios	69
4.8 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	69

4.9 Implementación de la solución	70
4.10 Reevaluación y rediseño	71
4.11 Método de pruebas	71
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución	72
5.1 Análisis de la solución	72
5.1.1 Panel de control del tanque de almacenamiento	74
5.1.2 Panel de control del tanque de rebombeo.....	75
5.1.3 Panel de control del pozo.....	77
5.1.4 Control de motores en los distintos puntos.....	78
5.1.5 Paneles con sistemas de alimentación auxiliar.....	79
5.1.6 Panel de operador.....	80
5.1.7 Equipos de instrumentación.....	81
5.1.8 Redes de comunicación.....	81
5.1.9 Unidades terminales remotas (RTU) o esclavos	82
5.1.10 Estación maestra	83
5.1.11 Módulos inalámbricos.....	84
5.2 Descripción del hardware	86
5.2.1 Controladores lógicos programables.....	86
5.2.2 UPS 87	
5.2.3 Variadores de frecuencia.....	88
5.2.4 Interfaz de operación.....	93
5.2.5 Componentes de protección.....	94
5.2.6 Supresores para la comunicación.....	95
5.2.7 Componentes de instrumentación	96
5.2.8 Comunicación del PLC con dispositivos inalámbricos.....	98
5.3 Descripción del software	99
5.3.1 <i>TwidoSoft</i>	99
5.3.2 <i>Vijeo Look</i>	103
5.3.3 Programación de los variadores de frecuencia	110
Capítulo 6: Análisis de Resultado	111
6.1 Resultados:	111
6.1.1 Pozo 111	
6.1.2 Tanque de Rebombeo	115
6.1.3 Tanque de almacenamiento.....	120
6.2 Análisis de resultados	122
6.2.1 Valores del PID.....	122
6.2.2 Activación de los sistemas de alimentación de emergencia.....	127
6.2.2 Activación de los sistemas de alimentación de emergencia.....	127
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones	129
7.1 Conclusiones	129
7.2 Recomendaciones	130
Capítulo 8: Bibliografía	131
Apéndices	132
A.1 Glosario, abreviaturas y simbología	132
A.2 Información sobre la empresa	133

Índice de figuras

Figura 1.1	Esquema general de las estaciones.....	14
Figura 1.2	Distribución del sistema del acueducto.....	17
Figura 1.3	Esquema general de las estaciones.....	19
Figura 1.4	Esquema de comunicación entre las estaciones.....	20
Figura 3.1	Método actual del sistema de bombeo del acueducto.....	23
Figura 3.2	Método no automatizado del sistema de bombeo del acueducto.....	25
Figura 3.3	Representación gráfica y esquemática de una bomba radial de tipo estándar.....	34
Figura 3.4	Componentes de una bomba sumergible.....	35
Figura 4.1	Tipos de Movimientos de Fluidos.....	40
Figura 4.2	Variables de un tanque.....	41
Figura 4.3	Relación Altura del nivel contra Caudal y su linealización.....	42
Figura 4.4	Tanque simple con un controlador de flujo.....	43
Figura 4.5	Conjuntos de tanques en el acueducto del residencial.....	45
Figura 4.6	Conjuntos de bloques en el acueducto del residencial.....	49
Figura 4.7	Bloque de la planta del sistema.....	51
Figura 4.8	Respuesta de la planta.....	51
Figura 4.9	Bloque de la función de retardo en el acueducto del residencial.....	52
Figura 4.10	Respuesta de la función de retardo del sistema de rebombeo.....	53
Figura 4.11	Bloques de los distintas plantas en el sistema de acueducto.....	54
Figura 4.12	Respuesta del escalón del sistema de acueducto.....	55
Figura 4.13	Bloques de las distintos valores la planta del sistema.....	56
Figura 4.14	Respuesta del escalón del sistema de acueducto con un valor proporcional.....	56
Figura 4.15	Sección transversal de un tubo circular.....	58
Figura 4.16	Diagrama de bloque para el cálculo de caudal en una tubería.....	61
Figura 4.17	Comunicación del Centro de control con el master.....	65
Figura 4.18	Representación de medición de nivel del tanque de almacenamiento.....	66
Figura 4.19	Sensor de presión implementado en el acueducto.....	67
Figura 5.1	Diagrama General del sistema de Acueducto del Cerro Colón.....	73
Figura 5.2	Diagrama general del tanque de almacenamiento.....	74
Figura 5.3	Diagrama general del tanque de rebombeo.....	76
Figura 5.4	Diagrama general del pozo.....	77
Figura 5.5	Características generales de los protocolos RS232 y RS485.....	82
Figura 5.6	Bloques del protocolo Modbus.....	82
Figura 5.7	Arquitectura de comunicaciones utilizada.....	83
Figura 5.8	Imagen de un TWDDCA24DRF y sus puertos.....	86
Figura 5.9	Imagen del módulo de entradas y salidas analógicas.....	87
Figura 5.10	Imagen de un variador de frecuencia.....	88
Figura 5.11	Diagrama general del funcionamiento del Variador.....	89
Figura 5.12	Diagrama general de un inversor trifásico.....	90
Figura 5.13	Diagrama general del PWM del variador.....	90
Figura 5.14	Señales que perciben los transistores de potencia.....	91
Figura 5.15	Señal de voltaje en la salida del drive (Variador de Frecuencia).....	92
Figura 5.16	Señal de voltaje y corriente en la salida del drive (Variador de Frecuencia).....	92
Figura 5.17	Torque vrs Velocidad.....	93
Figura 5.18	Apartarayos para equipos trifásicos conectados a tierra.....	94
Figura 5.19	Supresores de transcientes de comunicaciones.....	95
Figura 5.20	Sensor de nivel RM4L.....	96
Figura 5.21	Método de Nivel.....	96
Figura 5.22	Imagen del sensor de nivel LUC-T.....	97
Figura 5.23	Imagen superior del sensor de nivel LUC-T y ubicación en el tanque.....	98
Figura 5.24	Muestra del ambiente del TwidoSoft.....	100
Figura 5.25	Muestra de un bloque en TwidoSoft.....	100
Figura 5.26	Diagrama de activación de un sistema PID.....	101
Figura 5.27	Configuración de PID en programa twidosoft.....	102

Figura 5.28	Muestra del ambiente del Vijeo Look.....	106
Figura 5.29	Pantalla de SCADA que despliega las fallas del sistema.....	107
Figura 5.30	Pantalla de SCADA que despliega estado de los sensores	108
Figura 5.31	Pantalla de SCADA que despliega estado de los generadores	108
Figura 5.32	Pantalla de SCADA que despliega estado de los motores	109
Figura 5.33	Muestra del ambiente el programa para configurar variadores	110
Figura 6.1	Diagrama de flujo para el panel del pozo.....	111
Figura 6.2	Comportamiento del llenado del tanque de rebombeo.	112
Figura 6.3	Arranque de la bomba del pozo.	113
Figura 6.4	Comportamiento del nivel al llegar a la referencia.....	113
Figura 6.5	Diagrama de flujo para el panel del tanque de Rebombeo	115
Figura 6.6	Comportamiento del llenado del tanque de Almacenamiento.	117
Figura 6.7	Arranque de la bomba de rebombeo	118
Figura 6.8	Comportamiento de la bomba de rebombeo.	118
Figura 6.9	Diagrama de flujo para el panel del tanque de almacenamiento	120
Figura 6.10	Método de Ziegler y Nichold con bucle abierto	122
Figura 6.11	Comportamiento de los sistemas PID al variar los valores de KP.	124
Figura 6.12	Comportamiento de los sistemas PID al variar los valores de TI.	124
Figura 6.13	Comportamiento de los sistemas PID al variar los valores de TD.	125
Figura 6.2	Diagrama del flujo para los sistemas de transferencias	128

Índice de tablas

Tabla 1	Categorías de IP	28
Tabla 2	Categorías de NEMA.....	29
Tabla 3	Tiempo Experimental en vaciado del tanque.....	50
Tabla 4.	Datos experimentales del tiempo de retardo.	52
Tabla 5	Valores de caudal en distintos puntos de una tubería.....	62
Tabla 6	Características generales del módulo inalámbrico	84
Tabla 7	Configuración básica para la comunicación con el equipo de control	84
Tabla 8	Configuración básica para la comunicación con el equipo de control	95
Tabla 9	Señales utilizadas para en control del pozo.....	112
Tabla 10	Señales utilizadas para en control del tanque de rebombeo	116
Tabla 11	Señales utilizadas para en control del tanque de almacenamiento	120
Tabla 12	Aproximaciones de las variables de PID del sistema.....	122
Tabla 13	Aproximaciones de los tiempos en la respuesta de los sistemas	123
Tabla 14	Aproximaciones teoricas de las variables de PID del sistema	123
Tabla 15	Valores finales de las variables de PID del sistema	125
Tabla 16	Comparación de los valores Teóricos con los Experimentales	126

Capítulo 1: Introducción

1.1 Problema Existente e importancia de su solución

Debido a la creciente demanda de construcciones de edificios y hogares, se ha incrementado el número de compañías constructoras. A causa del aumento en la competencia en el área de la construcción, la compañía LAUCA (empresa constructora de urbanizaciones), impulsa un proyecto que consiste en garantizar a sus clientes una presión constante de agua para las urbanizaciones construidas.

Dicha compañía se encuentra construyendo un residencial en el Sector de Ciudad Colón, llamado Residencial Cerro Colón. Dentro de los principales problemas presentes en el residencial se destaca la distancia entre los distintos puntos importantes del acueducto. Este problema se veía magnificado pues no se contaba con un sistema automático de control de presión y nivel de agua adecuado que garantizara una eficiente distribución de agua en este sector.

El sistema de acueductos implementado en otros residenciales, presenta un funcionamiento deficiente, debido a que los sistemas utilizados son totalmente manuales, causando que el tiempo de respuesta ante perturbaciones tales como cambios de presión o niveles de los tanques de agua, y cortes de fluido eléctrico, ameritaran lapsos de tiempo prolongados, causando pérdidas de recursos de tiempo y eficiencia en la distribución de agua.

Es importante mencionar que el sistema de acueducto del residencial se encuentra seccionado en 3 áreas: tanque de Almacenamiento, tanque de Rebombeo y Pozo. Cada área tiene una función específica.

El sitio denominado como Pozo, tiene el objetivo de extraer el agua y suministrar la cantidad de líquido requerido por el tanque de rebombeo, para mantener un nivel constante.

Dentro de las divisiones del sistema de acueducto se encuentra un punto conocido como tanque de rebombeo, el cual recibe el agua proveniente del pozo y el AyA, y la reimpulsa al tanque de almacenamiento.

El espacio del Tanque de almacenamiento tiene el objetivo de acumular y suministrar el agua para las distintas actividades de los habitantes del residencial. Una particularidad de esta área del tanque es que su ubicación se encuentra alejada de algún punto de alimentación de energía.

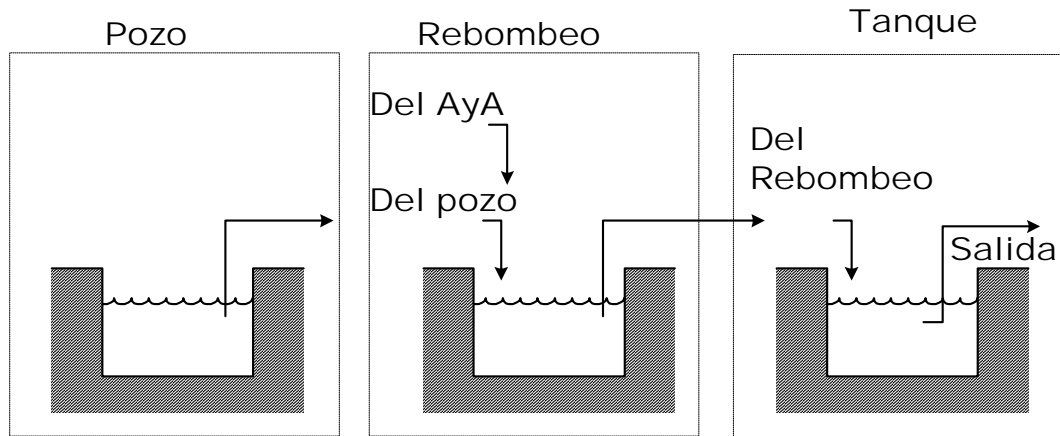


Figura 1.1 Esquema general de las estaciones

En la figura 1.1 se observa un esquema general que detalla el sistema utilizado actualmente.

Anteriormente, la técnica utilizada consistía en la apertura y cerrado de válvulas de una manera totalmente manual.

La organización tradicional del recurso humano en estas empresas establece que el operador o encargado del sistema del acueducto debe de asegurar la captación, regulación y conducción del recurso hídrico al residencial, para lo cual debe trasladarse a los distintos sitios del mismo, los cuales se ubican a distancias entre si de aproximadamente 1 Km. El tiempo que amerita una persona en restablecer las condiciones adecuadas en el sistema es de alrededor de 15 a 20 minutos.

Las principales dificultades que brindan los problemas anteriormente mencionados son, en primera instancia, la pérdida de la constancia en el nivel de los tanques y una deficiente distribución de agua con presión constante, dentro del acueducto de la urbanización. Todos estos problemas traen consigo pérdidas considerables a la empresa LAUCA, por conceptos de tiempo de respuesta, imagen y calidad en las urbanizaciones. Por esta razón, la empresa ha decidido automatizar el proceso de abastecimiento de este material hídrico.

La importancia de este proyecto para la empresa LAUCA es que se va a contar con un control automático del acueducto en los residenciales que brindará características tales como:

- Reducción de los tiempos de respuesta ante perturbaciones, debidos al consumo del residencial.
- Permite la conexión de generadores de energía eléctrica como respuesta a los cortes del fluido eléctrico, de manera automática.
- Mantiene un nivel de agua constante en los tanques de rebombero y de almacenamiento.

- Genera registros de consumo y demanda de agua dentro del residencial.

Este control automático permite monitorear cada una de las bombas, los niveles de diferentes tanques, y el estado de los generadores. También despliega alarmas del sistema y posibles causas. Disminuye el consumo de energía y aumenta la vida útil de los motores, debido al uso de variadores de frecuencia controlados por el sistema automático. Reduce el tiempo de respuesta ante eventualidades como la falta de agua proveniente del AYA y energía eléctrica del ICE. Y generará control de los procedimientos de transferencia y retransferencia de las fuentes de alimentación de los paneles de control, respetando el procedimiento ya establecido.

Es importante destacar que el diseño del panel de control del tanque de almacenamiento permite el uso de baterías, recargadas por celdas solares.

El sistema automático utilizado permite que desde un solo punto (Centro de Control), se pueda realizar un monitoreo y control del acueducto, y realizar análisis de datos, obtenidos por programa de adquisición de datos.

1.2 Solución seleccionada

1.2.1 Requerimientos

Como el sistema manual implementado es insuficiente para cumplir con el abastecimiento con presión constante de agua en el residencial, el proyecto se enfoca en realizar un control automático del sistema de acueducto.

Para la automatización del acueducto en el residencial Cerro Colón se consideraron las siguientes premisas:

- Controlar la activación, desactivación e intensidad de trabajo de las bombas del pozo, tanque de rebombeo y el tanque de almacenamiento.
- Controlar y monitorear todas las acciones que ejecuten las bombas de los diferentes puntos.
- Tener un sistema de alarmas dentro del programa SCADA, que detecten cualquier fallo en el proceso y describan las acciones de los distintos puntos del acueducto.
- Monitorear, vía software, los estados de los distintos sensores.
- Comunicación inalámbrica entre los distintos paneles.
- Planos eléctricos de los diversos paneles.
- Controlar los procedimientos para acoplar y desconectar los sistemas auxiliares de energía (generadores)
- Permitir un diseño accesible a la ampliación de dispositivos, como motores, paneles, etc.
- El diseño del control del tanque de almacenamiento tiene que consumir la mínima potencia, para la utilización de paneles solares en este punto.
- Mantener un nivel constante de agua en los tanques de almacenamiento y rebombeo.

1.2.2 Descripción general de la solución seleccionada

Para este caso en particular la solución general propuesta consistió en la creación de una estación de control y monitoreo (basada en una PC con Vijeo Look), una estación maestra ubicada en el tanque de rebombeo y dos esclavas para los puntos del pozo y del tanque de almacenamiento, enlazadas por medio de sistemas inalámbricos.

La solución planteada permitió un control y monitoreo de las variables de nivel y presión presentes, así como el control en la conexión y desconexión de los generadores.

Analizando el sistema completo se puede generar un diagrama de bloques indicando las diferentes etapas en que se va a distribuir el acueducto.

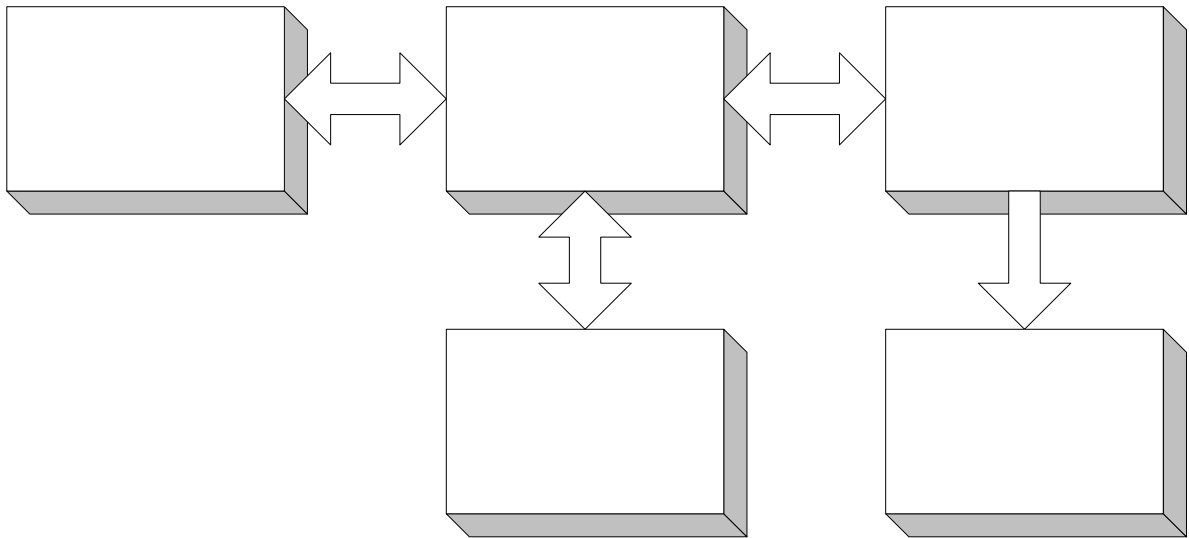


Figura 1.2 Distribución del sistema del acueducto

Como se observa en la figura 1.2, el sistema de acueducto se divide en cuatro estaciones. Una estación de monitoreo conocida como Centro de Control, una estación maestra (Rebombeo) y dos estaciones esclavas (Pozo y tanque).

La estación de monitoreo (Centro de control y monitoreo) es la responsable de monitorear a cada estación, con la posibilidad de controlarla por medio de un programa Scada, que permite la interfase humano-máquina. Por tanto, tiene acceso al monitoreo, a la activación y desactivación de las variables de todo el sistema.

La etapa de rebombeo tiene como objetivo ejecutar los cambios necesarios para la implementación de los diferentes sistemas tanto del AyA, como del sistema del pozo. Este será el maestro que coordinará y obtendrá la información proveniente de los terminales esclavas. Además, controlará el arranque y paro de la bomba, apertura y cierre de la válvula motorizada de entrada proveniente del

AyA, funcionamiento de la transferencia automática, medición de nivel del pozo, caudal de salida de la bomba y caudal de entrada de la tubería del AyA.

En esta estación convergen las aguas provenientes del AyA y/o del pozo, y tiene como salida la red de acueductos del residencial. Este será de tipo esclavo. Este controlará el arranque y paro de la bomba, el funcionamiento de la transferencia automática y se encargará de medir el nivel del tanque y regular el trabajo de la bomba que supe al tanque.

La estación del pozo es la responsable de suplir el agua al sistema de acueducto del residencial. En el caso de que no pueda suministrar debido a un nivel bajo de agua, el faltante de caudal lo compensará el sistema del AyA. En este punto se encuentra alejado de las otras estaciones. Esta etapa es de tipo esclavo que se encargará de controlar la bomba de agua e indicar el nivel y estado del pozo.

La estación del tanque de almacenamiento es la responsable de acumular el agua que será distribuida dentro del sistema de acueducto del residencial. En este punto se encuentra alejado de las fuentes de energía, por lo que se alimentará con una batería. Dicha batería se recargará por medio de celdas solares. Esta etapa es de tipo esclavo y tendrá la labor de medir el nivel del pozo, caudal de salida y el estado de la batería.

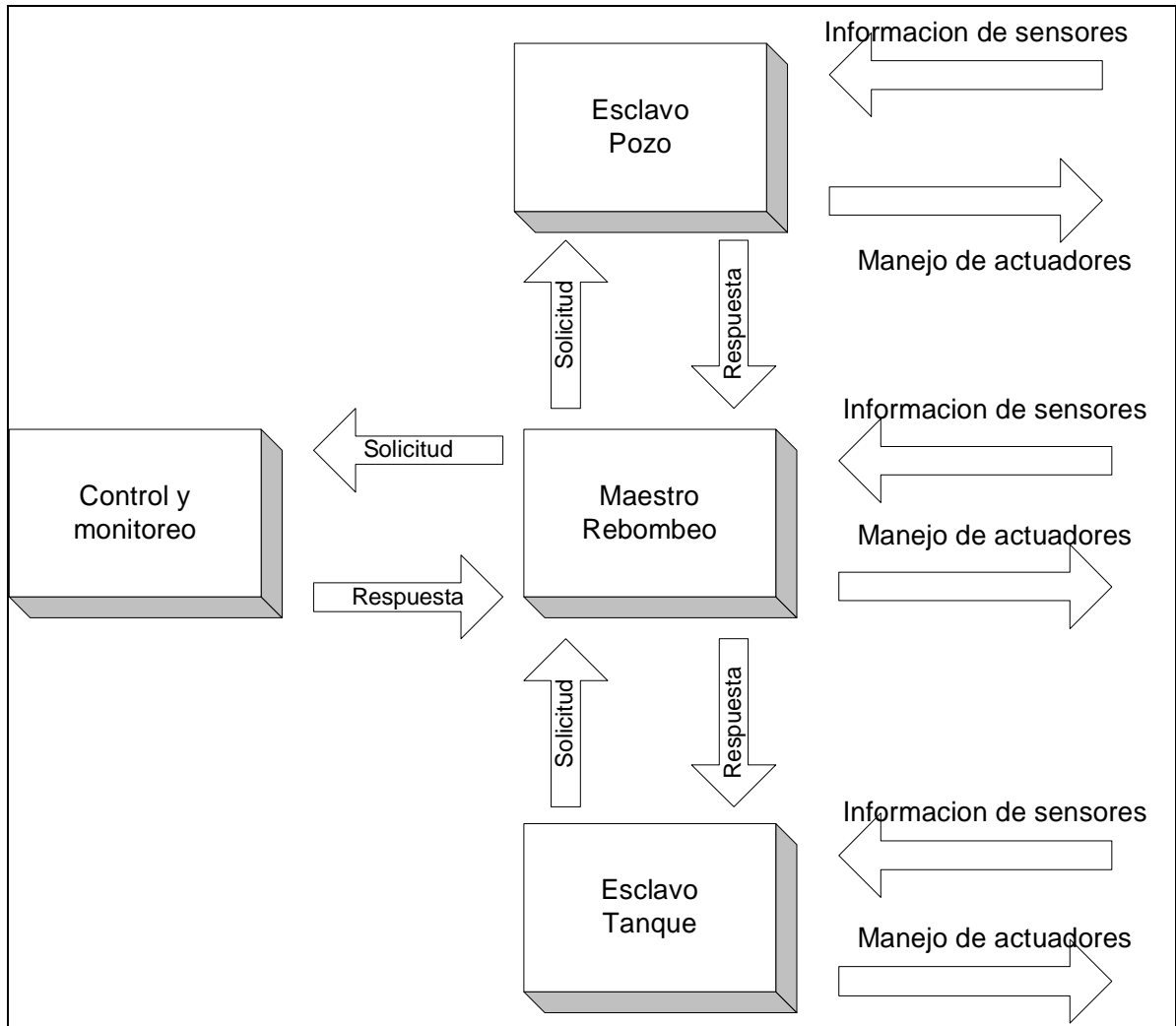


Figura 1.3 Esquema general de las estaciones

La figura 1.3 muestra un esquema general de las conexiones de las diferentes estaciones.

Cada una de las estaciones esclavas se tiene que comunicar con la estación maestra y con la Casa de control y monitoreo. Las señales que percibe cada estación son señales de los sensores de nivel y de presión colocados en el sistema por controlar. Al mismo tiempo, el sistema por desarrollar tiene que emitir las señales de control para el manejo de los dispositivos como válvulas, motores, generadores y actuadores.

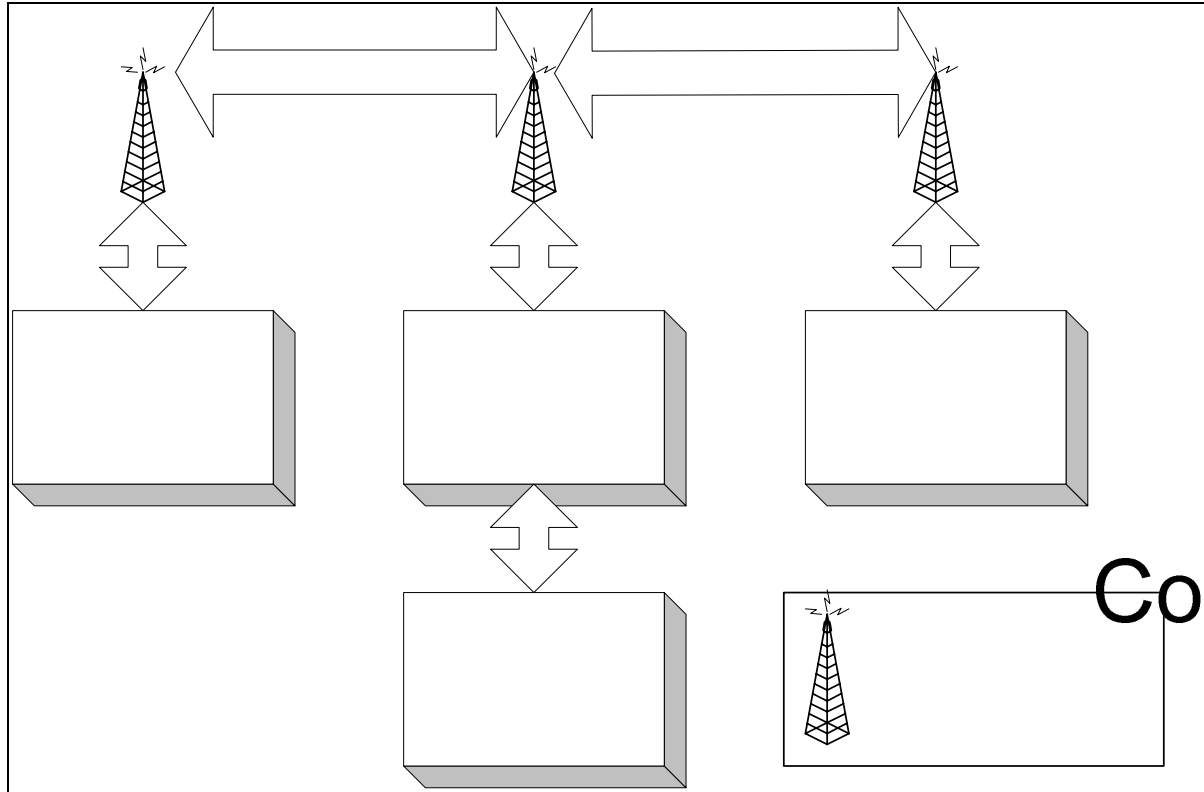


Figura 1.4 Esquema de comunicación entre las estaciones

La figura 1.4 muestra la estrategia de comunicación por implementar en las estaciones, con el objetivo de lograr un control y monitoreo efectivo.

Este método de comunicación permite contrarrestar los problemas de alambrado entre las estaciones debido a la considerable distancia a la cual se encuentran ubicados.

En el proyecto se van a tener que desarrollar tanto partes de software como de hardware tanto para los esclavos como para los maestros, con la misión de cumplir el objetivo del mantenimiento de presión constante del acueducto.

**Esclavo
Pozo**

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1 Meta

Garantizar un constante y efectivo servicio del recurso Agua, al residencial Cerro Colón.

2.2 Objetivo general

Integrar un conjunto de equipos electrónicos que logre un control completo del proceso de distribución de agua de forma sistemática y eficiente, mejorando la disponibilidad y la distribución efectiva del agua.

2.3 Objetivos específicos

- Obtener el modelado matemático de la distribución de agua en el acueducto del residencial.
- Orientar el equipo electrónico de control a un manejo de manera manual, remoto y automático, en los distintos puntos del acueducto.
- Obtener un mayor aprovechamiento de los recursos de la empresa y aumentar el promedio de vida de los equipos.
- Obtener una red de comunicación eficiente en el control del acueducto.
- Reducir los tiempo de respuesta ante perturbaciones de nivel de agua
- Permitir la implementación de nueva tecnología.
- Posibilitar la implementación sistemas de generación de energía eléctrica.
- Regular un nivel de agua constante en los distintos tanques.
- Registrar los niveles y estados de los tanques de agua.
- Monitorear y registrar la información de fallas, alarmas y datos, referentes al acueducto, necesarios para la toma de decisiones.

2.3.1 Objetivos de hardware

1. Analizar e integrar el equipo adecuado para la elaboración del proyecto, que cumpla con todas las especificaciones requeridas.
2. Integrar un panel de control automático para la estación del pozo, tanque de rebombeo y el tanque de almacenamiento.
3. Implementar un dispositivo que permita la incorporación de nuevos módulos, motores y equipos.
4. Implementar equipos y alternativas de solución para las fallas en sensores y falta de energía en los paneles de control.

2.3.2 Objetivos de software

1. Elaborar un programa que satisfaga las necesidades físicas presentes en el pozo, rebombeo y tanque de almacenamiento.
2. Confeccionar el programa de monitoreo y registro, para ser utilizado en la Casa de control (Programa SCADA: Vijeo Look).
3. Programar métodos alternativos de control dentro de los paneles.
4. Asignar valores adecuados de PID a los sistemas de control
5. Comprobar el correcto funcionamiento del sistema.

2.3.3 Objetivos de documentación

- 1 Realizar planos eléctricos de los paneles de control.
- 2 Capacitar el personal de mantenimiento en la utilización del sistema.
- 3 Capacitar al operador en el reconocimiento de las posibles fallas del sistema.
- 4 Preparar la documentación que será entregada a la empresa LAUCA y a la empresa AASA.

Capítulo 3: Marco teórico

3.1 Descripción del sistema o proceso por mejorar

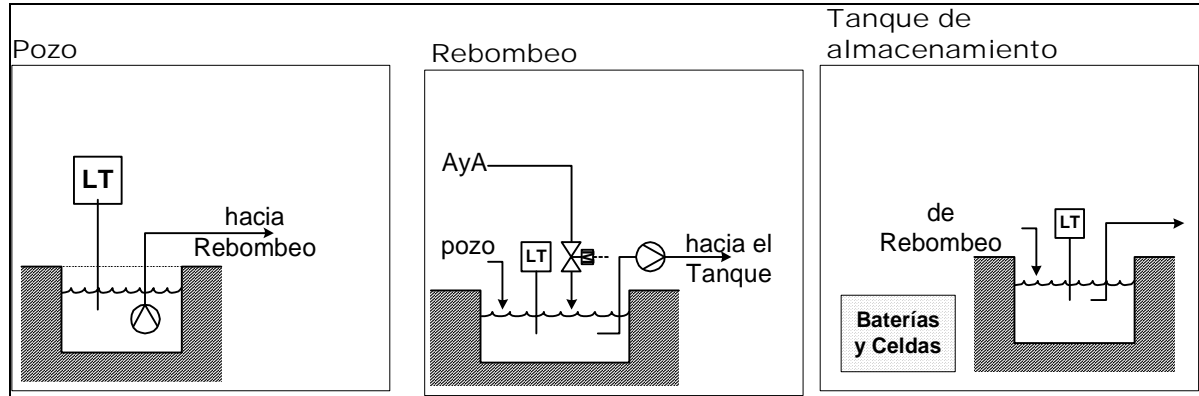


Figura 3.1 Método actual del sistema de bombeo del acueducto

Como se aprecia en la figura 3.1, el sistema actual de acueducto cuenta con un pozo, un tanque de rebombeo y un tanque de almacenamiento cuya distribución y comunicación de tuberías ya está establecida.

El pozo es el responsable de suministrar el agua al sistema de acueducto del residencial. En el caso de que no pueda suministrar debido a un nivel bajo de agua, el faltante de caudal lo compensará el sistema del AyA. La bomba de agua utilizada para la extracción es trifásica de 7.5HP y 480V.

El tanque de rebombeo es el sector en el cual se ejecutan los cambios necesarios en las válvulas manuales para la implementación y selección de los diferentes sistemas, tanto del AyA, como el sistema del pozo. Este cuenta con una bomba trifásica de 25HP y 480V.

La función del tanque de almacenamiento consiste en acumular una determinada cantidad de agua del sistema de acueducto del residencial para su próxima distribución. Este nivel es definido por los encargados de esta área. Este punto se encuentra alejado de fuentes de energía, por lo que la única fuente es una batería, cargada por celdas solares.

El sistema de válvulas es de activación y desactivación manual. El proceso de funcionamiento actual consiste en que el agua que se dirige al residencial procede del pozo. Para este caso, la válvula de la comunicación del AyA con el tanque de rebombeo se mantiene cerrada.

En los instantes en que el pozo no brinde el caudal suficiente establecido por la empresa LAUCA, se realiza la apertura de la válvula que comunica con el sistema del AyA, con el objetivo de compensar la falta de presión del líquido.

Es importante destacar que la válvula del AyA está controlada por el sistema de automatización pero que la magnitud de apertura de la válvula dependerá de la magnitud del déficit y del criterio del encargado del acueducto. Este control se realiza de manera manual y subjetiva, según las opiniones de los encargados de esta área.

En caso de cortes del fluido eléctrico, el proceso consiste en ir a cada uno de los puntos del acueducto y realizar la activación y conexión de los generadores, para que las distintas bombas de agua continúen distribuyendo el líquido. La distancia entre las etapas del acueducto causa que el proceso de activación de los generadores amerite lapsos de tiempo prolongados y la dificultad de mantener una comunicación entre sí.

Es importante destacar que la activación de las distintas bombas es un proceso de arranque y paro, por tanto no existe un proceso efectivo en el uso de los motores, se reduce su vida útil y se causa más estrés mecánico a las bombas y equipo asociado.

Una particularidad de la estación del tanque de almacenamiento es que se alimenta por medio de baterías, debido a la distancia a otras fuentes de energía eléctrica. Esta situación produce que los encargados del acueducto necesiten realizar visitas frecuentes al tanque para la verificación del estado de la batería y su nivel de energía.

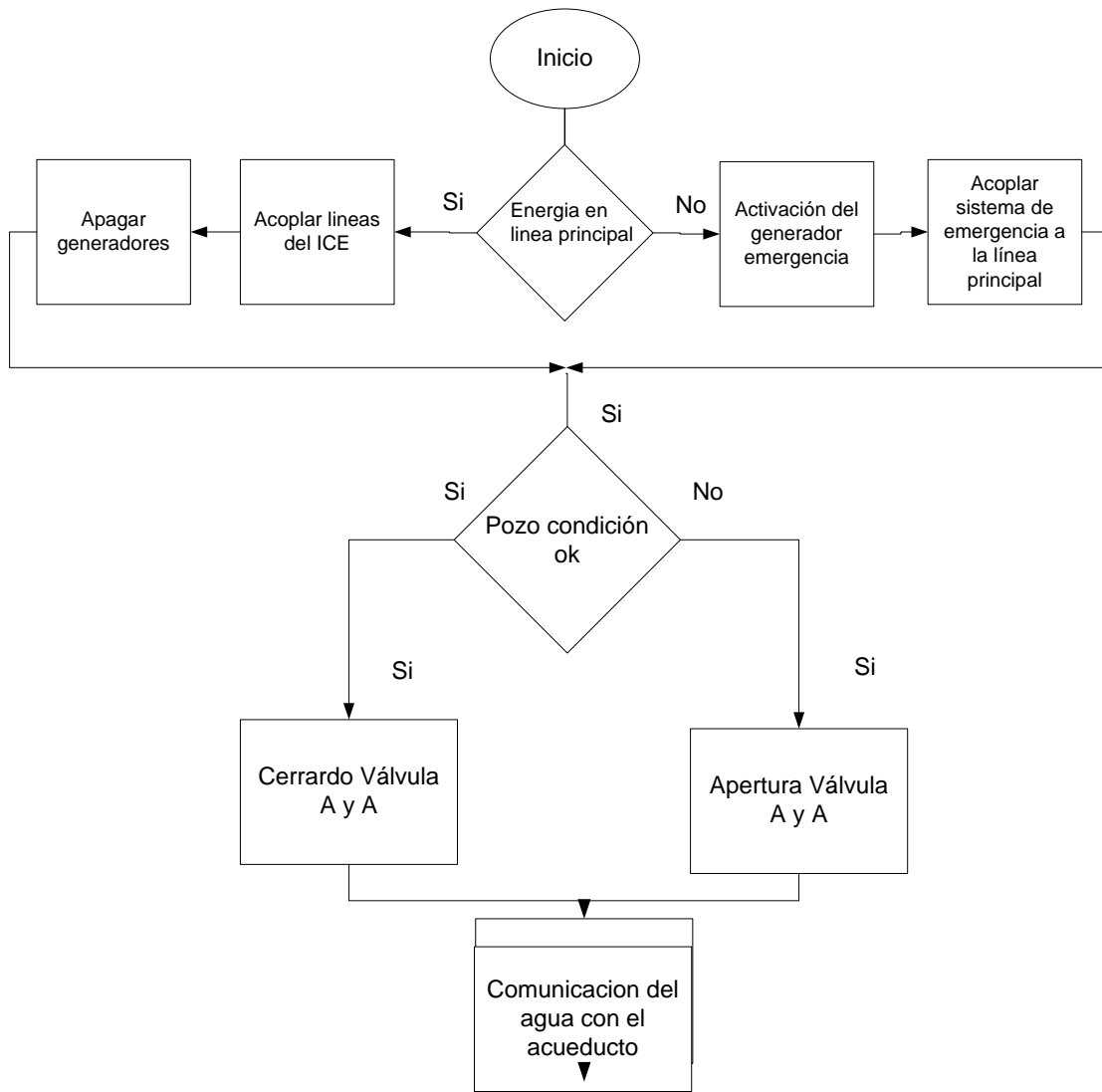


Figura 3.2 Método no automatizado del sistema de bombeo del acueducto

En la figura 3.2 se muestra el diagrama de flujo que corresponde al método empleado anteriormente en el manejo del sistema de acueducto.

Este método es totalmente manual y poco efectivo debido al tiempo de respuesta del sistema ante falta de fluido eléctrico.

Con el diseño por implementar en el control del acueducto del residencial se bajarán los tiempos de respuesta y se incrementará la eficiencia en la distribución del agua.

3.2 Antecedentes Bibliográficos

Con el fin de establecer el estado de la tecnología, métodos y procedimientos en el área de transferencia eléctrica y control automático de bombas de agua, se realizó una búsqueda extensiva en la Internet.

Los resultados obtenidos muestran una tendencia tecnológica a los sistemas de presión y nivel constante, complementados con métodos de mejoramiento en el consumo de energía y la eficiencia de los distintos equipos.

La información encontrada denota la tendencia de los sistemas, pero no describen sus equipos o métodos por implementar. Sin embargo, se rescataron detalles, información y consejos que se considerarán dentro del diseño.

3.2.1 Transferencia automática de emergencia.

Existen contactores y disyuntores que permiten acoplar los sistemas de transferencias automáticas de emergencia a las líneas normales; dichos métodos tienen características estándar que se detallan a continuación.

Disposiciones generales:

Los sistemas de emergencia están constituidos por circuitos y equipos destinados a alimentar, distribuir y controlar la energía eléctrica para iluminación o fuerza, cuando se interrumpe el suministro normal de energía eléctrica. Estos sistemas suministran energía eléctrica automáticamente a las áreas críticas y a los equipos, necesarios para la seguridad del acueducto, en el caso de falla del suministro normal de energía eléctrica o de los elementos del sistema. Estos equipos deben proveer la energía necesaria para equipos tales como sistemas de alarmas, bombas de agua y sistemas de comunicación.

Los sistemas de transferencia deben de proveer energía en caso de las siguientes fallas:

- a. Falta de energía eléctrica en las acometidas del ICE (Instituto Costarricense de Electricidad)
- b. Fallas de fase.
- c. Sobre corriente en las líneas principales.
- d. Pérdidas de tierra del sistema.
- e. Magnitudes altas o bajas de los voltajes.
- f. En frecuencias fuera de rango.

Pruebas y mantenimiento:

- a) Verificación del sistema. Se realizará una prueba con carga del sistema completo al ser instalado, y posteriormente a intervalos periódicos.
- b) Pruebas periódicas. Los sistemas se deben probar periódicamente por el usuario, para asegurar que los trabajos de mantenimiento son los adecuados para mantener las condiciones apropiadas de funcionamiento.
- c) Mantenimiento de sistemas de baterías. Los sistemas de baterías, incluyendo los acumuladores utilizados para el arranque o control de máquinas auxiliares, deben tener mantenimiento periódico.
- d) Prueba con carga. Se deben proveer medios necesarios para la prueba de sistemas de emergencia de alumbrado y fuerza, en condiciones de carga máxima.

Capacidad del sistema de emergencia:

Los sistemas de emergencia deben tener la capacidad nominal adecuada para la operación simultánea con todas las cargas. El equipo del sistema debe ser adecuado para soportar la corriente eléctrica máxima de falla disponible en sus terminales. El equipo de transferencia debe ser automático y aprobado para este uso. Debe ser diseñado e instalado para prevenir la conexión accidental de la alimentación normal y la fuente de emergencia, por medio de bloqueo mecánico. Se permite el uso de medios para desvío y separación del equipo de transferencia. Cuando se usen estos medios, se debe evitar el funcionamiento involuntario en paralelo.

Debido a los requisitos establecidos en Costa Rica, deben de implementarse generadores que estén diseñados para tener un factor de potencia de 0.8 como mínimo, con la carga.

Rótulos:

Todos los equipos deben de contar con un nombre debidamente definido, que permita la fácil y rápida ubicación. Deben coincidir con las etiquetas definidas en los planos.

Donde sea necesario, se debe proveer de dispositivos de señales audibles y/o visuales, para los siguientes propósitos:

- De avería. Para indicar avería de la fuente de emergencia.
- De operación. Para indicar la desactivación de la batería o el generador.
- De no-operación. Para indicar funcionamiento de la batería o el generador

3.2.2 Sensores y equipo de control

Es un dispositivo que realiza la medida inicial de la variable y la posterior conversión de energía de la misma, en su equivalente eléctrico (en una escala establecida). Una posterior transformación o acondicionamiento de la señal puede ser requerida para completar la medida. El resultado de una medida es la transformación de una variable en alguna información proporcional y útil requerida por otros elementos del proceso de control. Para los fines del proyecto, existen sensores de nivel, de caudal y presión de diferentes dimensiones y características. Todos los sensores y equipos de control deben de cumplir con cinco secciones de seguridad.

3.2.3 Normas y estándares oficiales

Los distintos sensores y equipos de control tienen que hacer referencia a estándares tales como el aislamiento, la distancia entre conductores, corrientes, voltajes. Estos estándares pueden cambiar de un país a otro, pero siempre se indican las normas de seguridad en la detección de niveles máximos y mínimos, en la seguridad contra explosiones y en los niveles de integridad en la seguridad

Un estándar muy utilizado en el ambiente industrial es el estándar IP el cual es una descripción de medidas diseñadas, para proteger el equipo de condiciones externas tales como impactos, sustancias, exposiciones a líquidos, radiaciones, etc. Las categorías de IP son las siguientes

Tabla 1 Categorías de IP

El primer dígito indica: Protección contra impacto y penetración por cuerpos extraños. IP X	El segundo dígito indica: Protección contra agua X
0 No Protección	0 No protección
1 Cuerpos extraños grandes mayores de 50mm	1 Goteo vertical de agua
2 Cuerpos extraños mediados mayores de 12mm	2 Goteo vertical de 15 grados
3 Cuerpos extraños pequeños mayores de 2.5	3 chorro de agua en 60 grados
4 Cueros extraños granulados mayores de 1mm	4 Salpicaduras de agua desde todas las direcciones
5 Depósitos de material pulverulentos peligrosos	5 Caudal de agua de 50 litros por minuto
6 Polvo penetrante, solo para cabezales especiales	6 Caudal de agua de 100 litros por minuto
	7 Inmersión de 1 m durante 1 minuto
	8 Inmersión en condiciones previamente acordadas

Especificaciones NEMA

Los fabricantes de equipos suelen clasificar sus equipos en diversos niveles.

Tabla 2 Categorías de NEMA

Clase	Uso	Descripción
Clase 1	Propósito general	Solo para unos en interiores, principalmente para protección contra el contacto con circuitos eléctricos interiores o superficies calientes.
Clase 3	Resistencia a la intemperie	También conocido como a prueba de agentes atmosféricos.
Clase 4	Controles de calidad	También conocido como a prueba de chorro de agua
Clases 4X	Controles de calidad	Equivalente a la clase 4 pero con materiales corrosivos
Clases 7 y 9	Controles de calidad	Se emplea para lugares de pruebas de explosiones
Clases 12 y 13	Controles de calidad	Para protección de equipos o componentes eléctricos en talleres de maquinaria y en plantas de fabricación.

3.3 Descripción de los principales principios físicos y electrónicos relacionados con la solución.

3.3.1 Principios Físicos de los sistemas hidráulicos.

En el proyecto por realizar, se tiene que conocer principios físicos de los líquidos. Dentro de los cuales se destaca el concepto de caudal, presión y nivel.

Sistemas Hidráulicos

Son un conjunto de elementos que son utilizados en sistemas fluidos que usan líquidos. Para la comprensión de esos sistemas es necesario conocer los siguientes términos:

El caudal: Es la medición directa de la cantidad de líquido que fluye por un recipiente en un determinado tiempo.

Flujo. Es el movimiento de un fluido con respecto a un sistema inercial de coordenadas, generalmente ubicado en un contorno sólido.

Unidades de presión. La presión se define como fuerza por unidad de área. Las unidades de presión son N/m^2 , Kg/cm^2 , lb/in^2 , etc. La unidad más utilizada es el Pascal (Pa) $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$.

Circuitos hidráulicos. Son circuitos capaces de producir movimiento y fuerza. Están formados por cuatro componentes básicos: un depósito para guardar el fluido hidráulico, una bomba para forzar al fluido a través del circuito, válvulas para controlar la presión del fluido y su flujo, y un actuador para convertir la energía hidráulica en energía mecánica.

Unidad de potencia hidráulica. Una unidad de potencia hidráulica incluye componentes tales como depósito, filtros, un motor eléctrico para una bomba o unas bombas y una válvula de control de presión máxima.

Acumulador. El acumulador almacena fluido a presión proveniente de una bomba hidráulica. Este componente se a menudo un circuito hidráulico para tener disponible el flujo a presión ante la demanda y para suavizar las pulsaciones en el flujo.

Actuadores. Los actuadores hidráulicos realizan la función opuesta que las bombas hidráulicas en el sentido de que convierten la energía hidráulica en energía mecánica con el objeto de permitir algún trabajo.

Propiedades de los fluidos hidráulicos

Las principales características físicas de los fluidos hidráulicos son:

Densidad y volumen específico. La densidad de masa ρ de una sustancia es su masa por unidad de volumen. Las unidades comúnmente usadas son kg/m^3 , lb/ft^3 , slug/ft^3 , etc. Para el agua a la presión atmosférica estándar ($1.0133 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ abs.) y la temperatura estándar (277.15 K) la densidad de masa es $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$.

El volumen específico v es el recíproco de la densidad ρ . Es el volumen ocupado por una unidad de masa del fluido o bien $v=1/\rho$

Peso específico y densidad específica. El peso específico γ de una sustancia es su peso por unidad de volumen. Las unidades comúnmente usadas son kg/m^3 , lb/ft^3 , etc. El peso específico γ y la densidad de masa ρ están relacionados por $\gamma = \rho g$.

3.3.2 Control automático.

Un sistema de control es un ordenamiento de componentes físicos unidos o relacionados de tal manera que mandan, dirigen o regulan al mismo sistema o a otro.

Recientemente, estos sistemas han asumido el papel, cada vez más relevante, en el desarrollo y avance de las actividades de la vida diaria. Pues brindan un proceso más eficiente y más seguro, en las actividades en la que se utiliza.

Dentro de los componentes básicos de un sistema de control en la realización de la secuencia son:

- 1) Objetivos de control
- 2) Componentes del sistema de control
- 3) Resultados o salidas.

A estos sistemas se les conoce comúnmente como controlador. La evaluación puede ser realizada por un operador, por un procesamiento electrónico de la señal, por un procesamiento mecánico o por una computadora.

El controlador requiere como entradas las medidas de la variable de entrada y de la referencia, expresadas en los mismos términos. La evaluación consiste en determinar el tipo de acción requerida para llevar la variable controlada al valor de referencia.

El elemento de Control es el dispositivo que ejerce una influencia directa en el proceso, es decir es el que realiza los cambios requeridos para llevar el valor de la variable controlada al valor de referencia. Este elemento acepta una señal de

entrada desde el controlador, la cual es transformada en una operación proporcional, derivativa o integral realizada sobre el proceso.

Para el proyecto, los elementos de control están conformados por el nivel de y el caudal de los distintos tanques y del pozo.

3.3.3 Sistema inalámbrico o Telemetría.

La telemetría consiste en la lectura remota de los valores de ciertos parámetros operativos de los sistemas de acueductos, tales como: caudales, presiones, niveles del tanque, parámetros de calidad del agua y variables eléctricas de los equipos de bombeo. El objetivo de la telemetría es transmitir la información de campo necesaria, que permita tomar decisiones en las acciones a seguir en la operación del acueducto, como por ejemplo: cerrar o abrir válvulas redistribuir el almacenamiento, encender o apagar equipos de bombeo o inclusive residir o aumentar el nivel del agua.

Para el proyecto se tiene que conocer el concepto de telemetría, debido a que parte de la solución planteada consiste en realizar una comunicación inalámbrica entre los módulos, para mantener un constante monitoreo y control de las variables por manejar.

En la actualidad, la comunicación inalámbrica participa en nuestra vida cotidiana de muchas maneras. Este tipo de comunicación transmite la información de un punto a otro a través de una sucesión de procesos que se describe a continuación:

1. La generación de una señal de mensaje
2. La descripción de esa señal del mensaje en cierta medida de precisión, mediante un conjunto de símbolos eléctricos.
3. La codificación de estos símbolos en una forma que sea adecuada para la transmisión por un medio físico de interés.
4. La transmisión de los símbolos codificados al destino deseado.
5. La decodificación y reproducción de los símbolos originales.
6. La recreación de la señal del mensaje original.

El proceso anterior hace posible la transferencia de todo tipo de información y datos. El uso de este medio permite la administración y el manejo de operaciones en lugares de difícil acceso o de largas distancias. Dentro de las características que ofrece este tipo de medio se tiene que tomar en cuenta información relevante tal como:

- a) Velocidad de transferencia
- b) Alimentación individual de cada módulo
- c) Temperatura ambiente de funcionamiento
- d) Humedad del ambiente de funcionamiento
- e) Distancia máxima entre módulos

- f) Características de los obstáculos.
- g) Rango de frecuencia de operación
- h) Tipo de datos por transmitir y/o recibir (Analógicos o Digitales).

El propósito del sistema de telemetría es proporcionar la capacidad para adquirir, procesar, descifrar y distribuir los datos de telemetría de un sistema para un determinado uso. En la telemetría se tiene que tomar en cuenta el tipo de modulación (FM, PM, AM, FSK o PSK), el tipo de código, condiciones ambientales, etc. para su implementación.

Se destaca que los equipos de uso común dentro del mercado son de modulación PSK, debido a su ancho de banda, y la variedad de productos en el mercado.

Telemando o Tele-comando

El telecomando consiste en la operación remota de dispositivos como contactos, relés y actuadores mediante comandos enviados por un operador desde un Centro de control, el cual toma, la decisión de abrir/cerrar o encender/apagar de acuerdo a los datos de que dispone, posibilitando realizar manipulaciones a distancia de algunos elementos del acueducto, tales como válvulas y equipos de bombeo. Para ello es necesario entonces que en las estaciones remotas estén equipadas con los dispositivos adecuados. El telemando consiste en la operación remota de dichos elementos mediante comandos enviados por un operador desde el Centro de Control.

3.3.4 Bombas Centrífugas y sumergibles.

En la realización del proyecto se encuentra el control de sistemas de potencia tales como bombas de agua y generadores de energía eléctrica.

Para garantizar la máxima confiabilidad de un producto industrial por entregar, se tiene que conocer acerca de generadores y motores trifásicos, su conexión y características de arranque y apagado.

En el proyecto realizado se controló la bomba centrífuga y sumergible.

Bombas centrífugas:

El impulso de líquidos a través de tuberías largas, venciendo con esto grandes desniveles o diferencias de presión, es una exigencia tan importante y tan difundida en la técnica moderna que las máquinas que cumplen con esta tarea son las bombas de agua.

Estas bombas se instalan junto al motor eléctrico con mayor frecuencia.

Existe una gran cantidad de bombas rotativas o centrífugas, variando las características de espacio, peso y potencia

Toda bomba rotativa consta fundamentalmente de una rueda móvil provista de paletas. El rodete, al ser puesta en rotación por medio de un motor de accionamiento, ejerce fuerzas sobre el líquido, transmitiéndole energía, con lo que puede adquirir tanto una presión elevada como una mayor velocidad de escurrimiento.

Bombas Radiales:

Los rodetes radiales pueden ser de tres tipos:

- a) Rodete Abierto
- b) Rodete Semicerrado
- c) Rodete Cerrado

El líquido que entra axialmente por un tubo de aspiración A ataca al rodete R radialmente y es impulsado hacia afuera absorbiendo simultáneamente cierta energía de este. La explicación usual de que el líquido es impulsado por fuerzas centrífugas, no es correcta, constituyendo estas solo una parte de la energía total cedida al fluido. A la salida del rodete reina una presión elevada y además una velocidad de corriente alta. Para que esta velocidad se transforme parcialmente en presión, se coloca alrededor de la rueda móvil una caja envolvente C que forma un difusor, o sea un canal que se va ensanchando gradualmente. A causa de su forma característica se la llama caja espiral.

Estas bombas de agua, se instalan en el motor. En la figura 3.3 se muestra un esquema de una bomba de agua centrífuga.

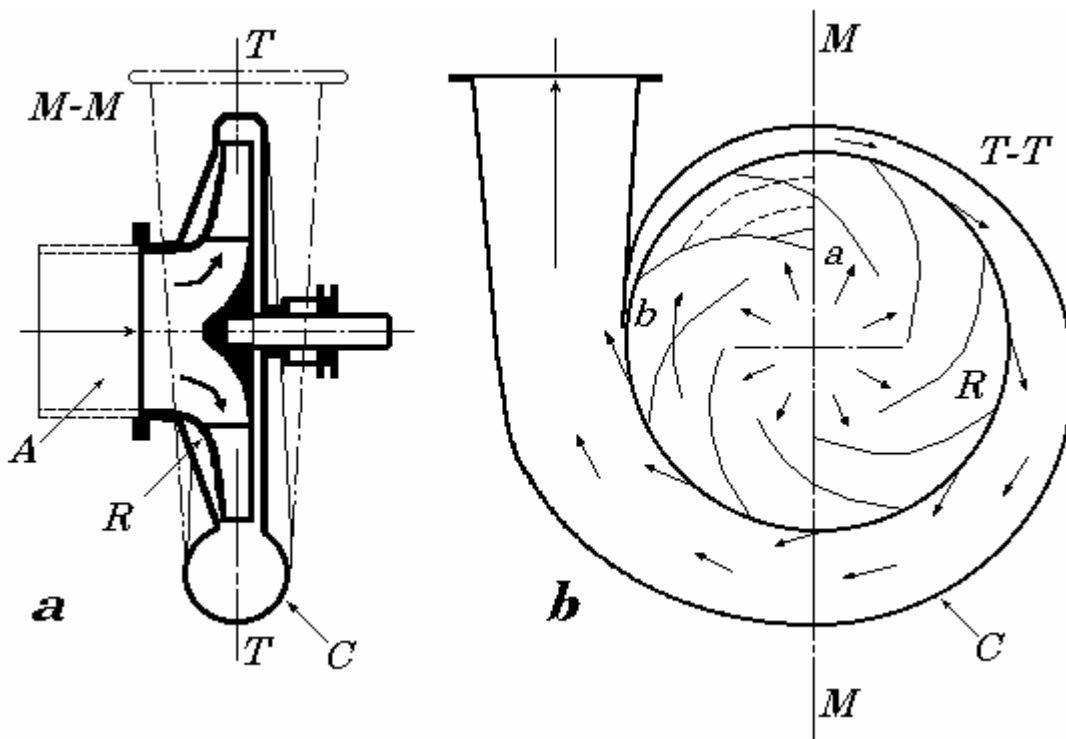


Figura 3.3 Representación gráfica y esquemática de una bomba radial de tipo estándar

Bombas sumergibles:

Las bombas sumergibles son bombas centrífugas vertical de una o varias etapas con impulsor de flujo mixto o radial según los distintos modelos.

Los cuerpos intermedios, de aspiración y de descarga son construidos en fundición gris de grana fina y esmerada acabada.

El difusor del cuerpo intermedio forma una sola pieza con el mismo simplificando así su construcción y mantenimiento.

Los impulsores son fundidos en aleación de bronce de calidad y posteriormente balanceados dinámicamente para evitar vibraciones que produzcan desgaste prematuro de cojinetes, los mismos se fijan al eje mediante un cono de ajuste.

El eje de bomba es de acero inoxidable de calidad y calibrado, y montado sobre cojinete de bronce, colocados en el cuerpo de la bomba.

En la parte inferior, el cuerpo de aspiración posee una malla metálica revestida en un polímero resistente a partículas superiores a los 4 mm de diámetro. También se provee de una válvula de retención acoplada directamente con el cuerpo de descarga. El nivel mínimo de agua debe considerar las dimensiones de la bomba sumergible, para que este no se sobrecaliente.

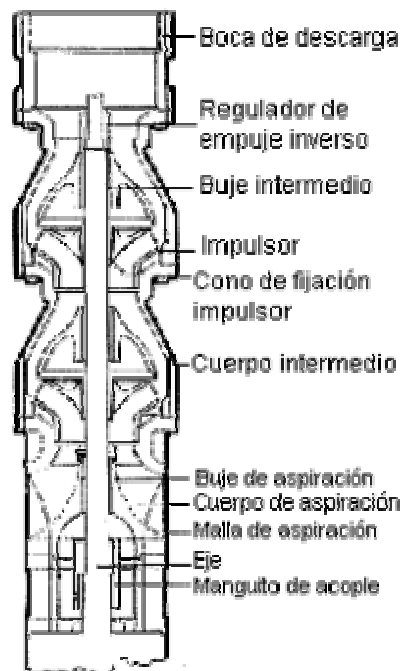


Figura 3.4 Componentes de una bomba sumergible

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

4.1 Reconocimiento y definición del problema

El siguiente listado es el procedimiento metodológico.

a. Reconocimiento de la zona del proyecto.

En este reconocimiento se reunió con lo encargados del proyecto, se analizaron los equipos con los que cuenta. Se examinaron las características que se tiene que tomar en cuenta para el diseño tales como:

- Línea vista entre los puntos
- Potencia de los motores.
- Distancias entre los puntos.
- Instalaciones de los paneles de control.
- Etc.

b. Adquisición de datos del proyecto.

Para este paso, se analizaron las características de cada punto del acueducto, tal como:

- Tiempo de llenado
- Dimensiones de los tanques
- Distancias
- Electro válvulas

c. Selección del equipo por implementar en el proyecto.

Para generar este paso, se requirió, investigar los equipos en el mercado y sus correspondientes características. Analizando las características presentes en el proyecto, se prosiguió a la selección del equipo necesario para el cumplimiento de los objetivos.

Se satisface las necesidades que requiere el sistema de control por medio del equipo seleccionado:

- PLC: Marca Twido, código TWDLCAA24DRF, el cual está compuesto por 14 entradas y 10 salidas digitales, encargado de controlar el funcionamiento de cada punto del acueducto.
- Módulo analógico: Marca Twido, Código TWDAMM3HT, el cual tiene 2 entradas y una salida analógica, encargado controlar y monitoreas, por medio de señales analógicas, el variador de frecuencia y los niveles de agua, respectivamente.

- SCADA: Se eligió la interfase hombre-máquina, conocido como Vijeo Look, el cual permite la comunicación con los distintos PLC Twido y su correspondiente control.
- Módulos inalámbricos: se escogió el DGR-115W, por sus características de transmisión de datos a distancias de 20 millas.
- Sensores de nivel digitales: RM4L, para brindar un sistema de seguridad adicional en los niveles de agua.
- Sensores de nivel analógicos: LUC-T, para permitir sensar los niveles de agua con mayor presión.
- Sensores de presión analógicos: Naulitius, para monitorear la presión del sistema.

d. Diseño de los planos eléctricos del proyecto.

Para realizar el diseño de los planos eléctricos del proyecto, se analizó cada uno de los dispositivos a implementar en el panel de control. Dicho panel de control, se diseñó con protecciones electromecánicas adicionales a los programados en el PLC.

e. Implementación de una rutina en el ambiente de programación de escalera, para el manejo de las entradas digitales y analógicas de los equipos de control.

Para generar este paso, se debió contar con el ambiente de programación de TwidoSoft. Este software es el que permite la programación del PLC Twido elegido como el PLC controlador de los distintos puntos del acueducto. Además se debió contar con el cable de programación de este dispositivo. La programación de PLC, se realizó primero en las oficinas de AASA, sujeto a condiciones similares presentes en el Cerro Colón.

f. Diseño de la interfase Humano-Máquina en el Centro de control de operaciones.

En la realización de este paso se requirió de la licencia del programa SCADA y del programa Visual Basic, para complementar funciones de recolección de datos, monitoreo y control.

g. Diseño de la base de datos del sistema recolección de datos.

El registro de las bases de datos, se elaboró por medio de Visual Basic. Este programa facilita al operador, la visualización de los datos y la toma de decisiones.

- h. Supervisión de las instalaciones de las obras electromecánicas y del panel de control.

Para cumplir este paso metodológico se realizaron varias visitas, en las cuales se vigilaban los avances y la calidades de las obras electromecánicas en dicho proyecto.

- i. Pruebas y ajustes.

Durante la puesta en marcha del sistema, se realizaron ajustes en los valores de PID establecidos, y en secuencias lógicas programadas, para un funcionamiento efectivo del sistema de control.

- j. Documentación.

Conforme se avanzó en los objetivos del proyecto, se documento la información concerniente al software utilizado y desarrollado, al hardware del sistema y a los resultados obtenidos.

Se entregó documentación a la empresa LAUCA, como manuales de usuario y se impartió una capacitación del programa.

4.2 Obtención y análisis de información

Toda la información que se ha obtenido hasta el momento, ha sido recolectada mediante equipo aportado por la empresa, consultas a las empresas que brindan el equipo y a los ingenieros civiles que están a cargo del residencial, ya que en la Internet no existe información efectiva acerca del tema.

El análisis de la información se enfocó principalmente a los siguientes puntos:

1. Consultas con personas experimentadas en proyectos similares.
2. Consultas con los encargados de las bombas de agua, sistemas inalámbricos y fuentes alternativos de energía.
3. Analizar las condiciones físicas en las que se encuentran las instalaciones.
4. Información de manuales de los equipos a utilizar.
5. Documentación relacionada con fundamentos de mecánica de fluidos
6. Experiencia generada de otros proyectos.

Todas las evaluaciones sobre la información adquirida han sido basadas en conocimientos obtenidos durante la formación como futuro ingeniero. Han sido aplicados conceptos sobre corriente alterna, programación, control automático, electrónica de potencia, etc.

4.3 Descripción Matemática de las características presentes en el proyecto

4.3.1 Matemática:

Dentro de la elaboración de los modelos matemáticos se encuentran los sistemas hidráulicos.

Para el modelado matemático del acueducto del residencial, es necesario conocer ciertos conceptos como:

ρ = densidad de masa, indica la masa por unidad de volumen. Para el caso del agua, el valor es de 1000Kg/m^3

$v = 1/\rho$, volumen específico, indica el volumen ocupado por unidad de masa del fluido.

$\gamma = \rho g$, peso específico. Indica el peso por unidad de volumen.

Flujo laminar, se refiere a los movimientos de los fluidos caracterizados por ser suaves y que se movilizan en forma de líneas paralelas.

Flujo turbulento, describe los movimientos irregulares de los fluidos, implicando remolinos en su trayecto. Ver la figura 4.1

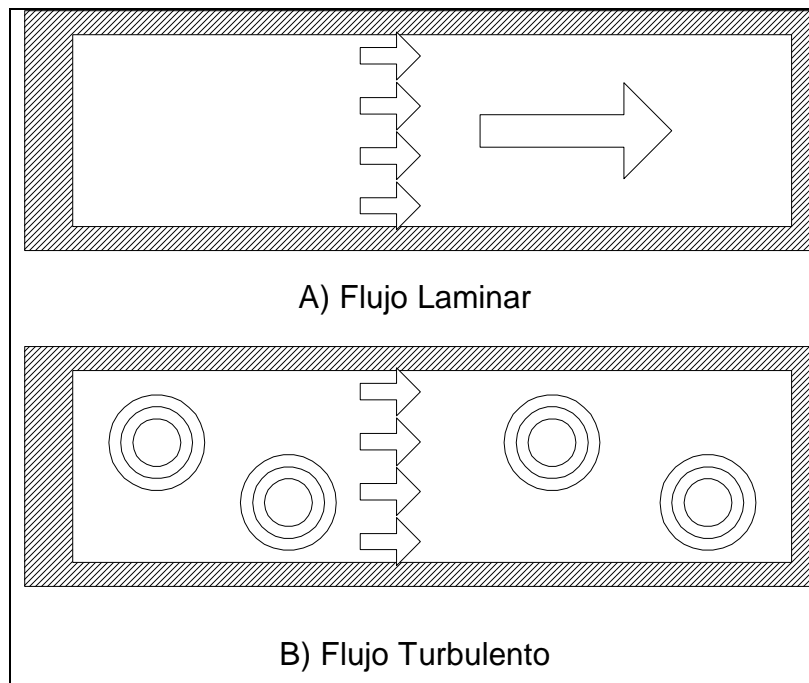


Figura 4.1 Tipos de Movimientos de Fluidos

Ecuación de Bernoulli: para flujos estables, sin fricción (viscosidad despreciable).

$$\frac{\rho v^2}{2} + P + \rho gh = \text{constante}$$

Donde

P = Presión dinámica

h = Altura dinámica

Usado la Ecuación de Bernoulli, en un sistema de nivel líquido

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + h_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_2$$

Considerando $v_1 = 0$, $p_1 = 0$, $z_1 = h$, $z_2 = 0$ y presión atmosférica como referencia

$$H = \frac{v_2^2}{2g}$$

$$v_2 = \sqrt{2gH}$$

v_2 : Representa la velocidad del líquido en la salida.

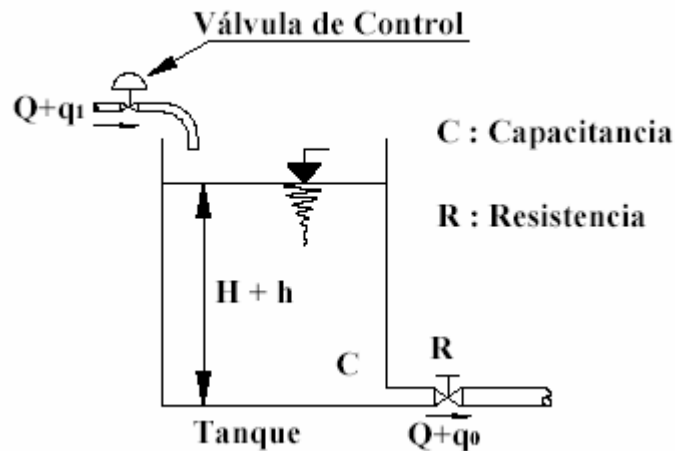


Figura 4.2 Variables de un tanque

Donde

H = Altura en estado estable (m)

h = Pequeña desviación de altura (m)

Q = Razón de flujo estable (m^3/s)

q_1 = Pequeña desviación d flujo de entrada (m^3/s)

q_0 = Pequeña desviación d flujo de salida (m^3/s)

Por tanto

$$C \, dh = (q_1 - q_0) \, dt \quad (1)$$

$$R = \frac{dh}{dq} \quad (2)$$

Considerando que la condición de operación varía un poco, esto es, si los cambios de altura y razón de flujo son pequeñas durante el periodo de operación. Por tanto se puede considerar entonces que el valor de la resistencia R puede analizarse constante durante el periodo entero y el sistema puede ser linealizado por un valor de resistencia promedio. Ver la figura 4.2.1.3

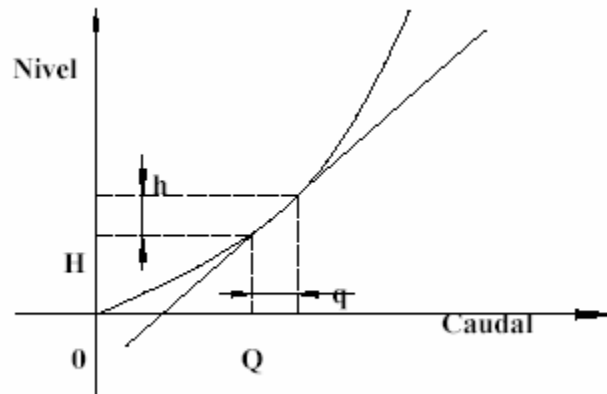


Figura 4.3 Relación Altura del nivel contra Caudal y su linealización

Esta linealización permite que

$$dh = h, \quad dQ = q$$

y que la resistencia promedio R se escriba como

$$R = \frac{dH}{dQ} = \frac{h}{q_0}$$

De las Ecuaciones 1 y 2 se obtiene

$$RC \frac{dh}{dt} + q_1 = \frac{h}{R} \quad \text{ó} \quad RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_1$$

Si q_0 (el cambio en la razón del flujo de salida) se considera la salida del sistema en vez de h (el cambio en altura), se obtiene un nuevo modelo matemático de:

$$RC \frac{dq_0}{dt} + q_0 = q_1 \quad \text{Debido a que } h = Rq_0$$

4.3.2 Análisis matemático de un tanque simple

En la figura 4.2 se observa la forma de un tanque simple, el cuál, es similar a los tanques de almacenamiento y del pozo.

Las variables a considerar son: C, R, q1,

$$C = \frac{[(Q + q_1) - (Q + q_0)]dt}{dh} \rightarrow (q_1 - q_0) \frac{dt}{dh}$$

$$C \frac{dh}{dt} = q_1 - q_0$$

La oposición que crea la válvula de salida es

$$R = \frac{dH}{dQ} = \frac{dh}{dq} \rightarrow dh = R dq$$

Por tanto la ecuación final, que representa el modelado matemático para un control de caudal es:

$$\frac{dq_0}{dt} = \frac{q_1}{c_1 R_2} - \frac{q_2}{R_2 c_1}$$

4.3.3 Análisis matemático de un tanque con un controlador de caudal.

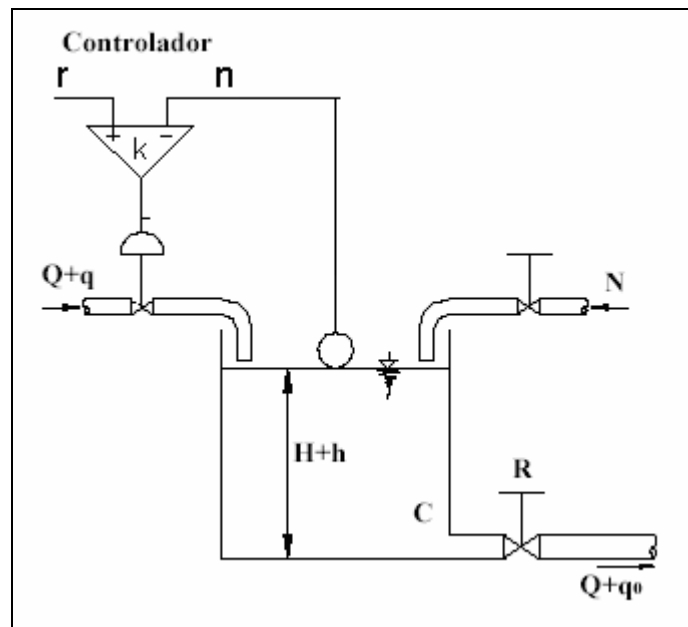


Figura 4.4 Tanque simple con un controlador de flujo

En la figura 4.4 se describe un tanque simple con un controlador de flujo. Las variables presentes en el modelo son h, r (valor de referencia del controlador), k (constante diferencial), n (Valor de altura del tanque), q0, q1, q2.

Las ecuaciones del sistema son:

$$C = \frac{[(Q + q_1) + q_2 - (Q + q_3)]dt}{dh} \rightarrow (q_1 + q_2 - q_3) \frac{dt}{dh}$$

$$C \frac{dh}{dt} = q_1 + q_2 - q_3$$

$$q_2 = \frac{K(n-r)}{R_2} = \frac{K(Nh-r)}{R_2}$$

$$q_0 = \frac{h}{R_3} \rightarrow h = q_0 R_3$$

$$C \frac{dh}{dt} = q_1 + \frac{K(Nh-r)}{R_2} - \frac{h}{R_3}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{q_1}{C} + \frac{K(Nh-r)}{CR_2} - \frac{h}{CR_3}$$

$$R_3 \frac{dq}{dt} = \frac{q_1}{C} + \frac{K(Nq_0 R_3 - r)}{CR_2} - \frac{q_0}{C}$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{q_1}{CR_3} + \frac{KNq_0}{CR_2} - \frac{rK}{CR_2 R_3} - \frac{q_0}{CR_3} \quad \text{Ecuación Final}$$

4.3.4 Modelo matemático del sistema General

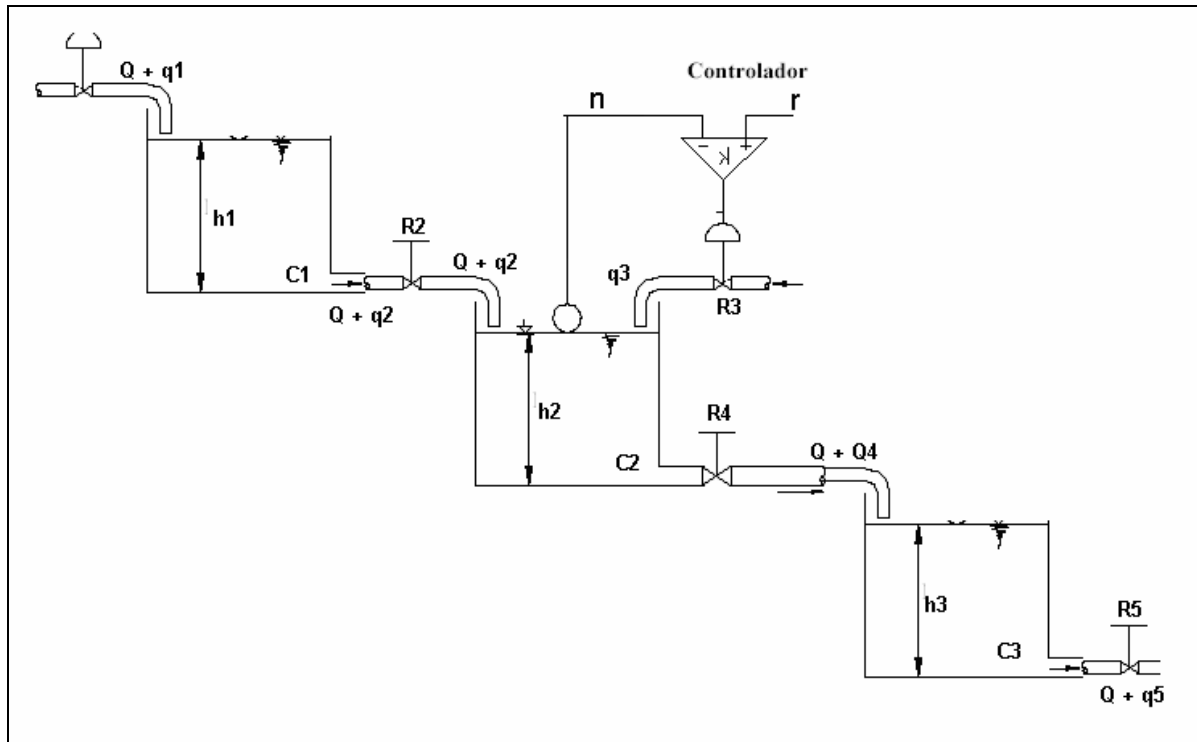


Figura 4.5 Conjuntos de tanques en el acueducto del residencial

En la figura de 4.5, se describe el conjunto de tanques, en los cuales integran el acueducto del residencial.

Las variables del sistema están constituidas por q_1 , q_2 , q_3 , q_4 , q_5 , r , k , R_2 , R_3 , R_4 y R_5 .

4.3.5 Modelado del Pozo:

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} = q_1 - q_2$$

$$q_2 = \frac{h_1}{R_2} \Rightarrow dh_1 = dq_2 R_2$$

$$C_1 \frac{dq_2}{dt} R_2 = q_1 - \frac{h_1}{R_2}$$

$$\frac{dq_2}{dt} = \frac{q_1}{C_1 R_2} - \frac{h_1}{R_2^2 C_1} \Rightarrow \frac{q_1}{C_1 R_3} - \frac{q_2}{R_2 C_1}$$

4.3.6 Modelado del tanque de Rebombeo

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = Q + q_2 + q_3 - (Q + q_4)$$

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = q_2 + q_3 - q_4$$

$$q_2 = \frac{h_1}{R_2}$$

$$q_3 = \frac{(n-r)K}{R_3} \quad \text{Donde } n = Nh_2$$

$$q_3 = \frac{(Nh_2 - r)K}{R_3}$$

$$q_4 = \frac{h_1 - h_2}{R_4}$$

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = \frac{h_1}{R_2} + \frac{(Nh_2 - r)K}{R_3} - \frac{(h_1 - h_2)}{R_4}$$

$$c_2 \frac{dh_2}{dt} = \frac{h_1}{R_2} + \frac{KNh_2}{R_3} - \frac{rK}{R_3} - \frac{h_1}{R_4} + \frac{h_2}{R_4}$$

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = \frac{h_1}{R_2} + \frac{KNh_2}{R_3} - \frac{rK}{R_3} - \frac{h_1}{R_4} + \frac{h_2}{R_4}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{h_1}{c_2} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_4} \right) + \frac{h_2}{C_2} \left(\frac{KN}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) - \frac{rK}{R_3}$$

$$q_4 = \frac{h_1 - h_2}{R_4} \Rightarrow h_2 = -q_4 R_4 + h_1$$

$$dh_2 = -dq_4 R_4 + dh_1$$

$$dh_2 = -dq_4 R_4 + dq_2 R_2$$

$$\frac{-dq_4 R_4}{dt} + \frac{dq_2 R_2}{dt} = \frac{q_2 R_2}{C_2} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_4} \right) + \left(\frac{-q_4 R_4 + q_2 R_2}{C_2} \right) \left(\frac{KN}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) - \frac{rK}{R_3}$$

$$\frac{-dq_4 R_4}{dt} + R_2 \left(\frac{q_1}{C_1 R_2} - \frac{h_1}{R_2 C_1} \right) = \frac{q_2 R_2}{R_2 C_2} - \frac{q_2 R_2}{C_2 R_4} - \frac{-q_4 R_4 KN}{C_2 R_3} - \frac{q_4 R_4}{C_2 R_4} + \frac{Q_2 R_2 KN}{C_2 R_3} + \frac{Q_2 R_2}{C_2 R_4} - \frac{rk}{R_3}$$

$$\frac{-dq_4 R_4}{dt} + \frac{R_2 q_1}{c_1 R_2} - \frac{q_2}{c_1} = q_2 \left(\frac{1}{c_2} - \frac{R_2}{C_2 R_4} + \frac{R_2 KN}{C_2 R_3} + \frac{R_2}{C_2 R_4} \right) + q_4 \left(-\frac{R_4 KN}{C_2 R_3} - \frac{R_4}{C_2 R_4} \right) - \frac{rK}{R_3}$$

$$\frac{-dq_4 R_4}{dt} = \frac{-R_2 q_1}{C_1 R_2} + q_2 \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} - \frac{R_2}{C_2 R_4} + \frac{R_2 KN}{C_2 R_3} + \frac{R_2}{C_2 R_4} \right) + q_4 \left(-\frac{R_4 KN}{C_2 R_3} - \frac{1}{C_2} \right) - \frac{rK}{R_3}$$

$$\frac{dq_4}{dt} = \frac{q_1}{C_1} - q_2 \left(\frac{1}{c_1 R_4} + \frac{1}{c_2 R_4} + \frac{R_2 KN}{C_2 R_3} \right) - q_4 \left(-\frac{KN}{C_2 R_3} - \frac{1}{R_4 C_2} \right) - \frac{rK}{R_4 R_3} \quad \text{Ecuación Final}$$

4.3.7 Modelado del tanque de almacenamiento

$$C_3 \frac{dh_3}{dt} = q_4 - q_5$$

$$q_4 = \frac{h_2 - h_3}{R_4}$$

$$q_5 = \frac{h_3}{R_5} \Rightarrow dh_3 = R_5 dq_5$$

$$C_3 \frac{dh_3}{dt} = \frac{h_2 - h_3}{R_4} - \frac{h_3}{R_5}$$

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{h_2}{R_4} - h_3 \left(\frac{1}{R_4 C_3} - \frac{1}{R_5 C_3} \right)$$

$$h_2 = q_4 R_4 + h_3 = q_4 R_4 + q_5 R_5$$

$$h_3 = q_5 R_5$$

$$R_5 \frac{dq_5}{dt} = \left(\frac{q_4 R_4 + q_5 R_5}{R_4 C_3} \right) - q_5 R_5 \left(\frac{1}{R_4 C_3} - \frac{1}{R_5 C_3} \right)$$

$$\frac{dq_5}{dt} = \frac{q_4}{C_3 R_5} + q_5 \left(\frac{1}{R_5 C_3} \right)$$

$$\frac{dq_5}{dt} = \frac{q_4}{C_3 R_5} + \frac{q_5}{R_5 C_3} \quad \text{Ecuación Final}$$

4.3.8 Modelado del sistema de rebombeo del sistema presente en LAUCA.

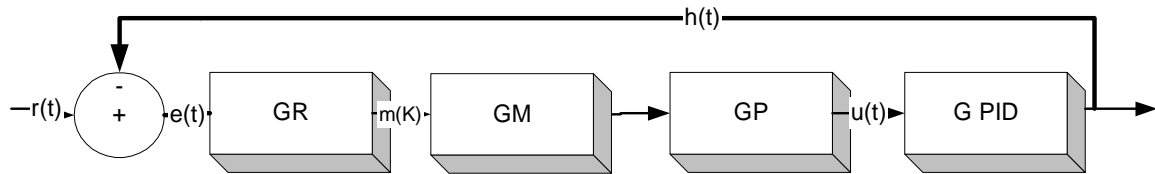


Figura 4.6 Conjuntos de bloques en el acueducto del residencial

$r(t)$ = Señal referencia (m)

$e(t)$ = Representa el error igual a la diferencia entre la señal deseada y la señal de salida

GR= Representa la función de retardo que presenta el sistema

$M(k)$ = Representa el voltaje que se debe aplicar a la bomba para generar el flujo que indique el PID.

GM= Representa la función de transferencia del motor

GP= Representa la función de transferencia de la planta.

$U(t)$ = es la cantidad de flujo de líquido que se debe suministrar el sistema para compensar el error.

G PID= Representa el compensador a utilizar.

$H(t)$ = Esta señal representa el estado actual del nivel de agua del sistema.

4.3.9 Función de transferencia de la planta (GP)

El gasto de entrada $q_i(t)$, menos el gasto de salida $q_0(t)$, durante un intervalo de tiempo es igual a la cantidad de líquido acumulado en el tanque, esto es:

$$C dh(t) = (q_i - q_0) dt$$

La relación entre q y h esta dada por $q_0 = h(t)/R$

La ecuación diferencial para este sistema para un valor constante R es

$$RC \frac{dh(t)}{dt} + h(t) = Rq_i$$

Nótese que RC es la constante del sistema tomando la transformada de Laplace en ambos miembros de la ecuación anterior. Suponiendo que la condición inicial es cero, se obtiene:

$$(RCs + 1)H(s) = RQ_i(s)$$

Para el sistema desarrollado en el presente trabajo se considera Q_i como entrada y H como salida, por lo que la función de transferencia de la planta queda como:

$$\frac{H}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1}$$

$$R = \frac{dh}{dq} \frac{(m)}{(m^3 / s)}$$

Para calcular un valor de R experimental se necesita el valor de $q_0 = \frac{V}{t}$.

Un valor promedio de vaciado del tanque es de aproximadamente de

Tabla 3 Tiempo Experimental en vaciado del tanque

Número de experimento	Tiempo en Segundo
1	≅ 3600
2	≅ 3660
3	≅ 3700

Promedio es de 3600 segundos

Las aristas del tanque cúbico de son de 4.12m. (volumen de 70 m³)

Con los valores anteriores se obtuvieron varias constantes del sistema tales como:

Caudal de salida:

$$q_0 = \frac{V}{t} = \frac{(4.12)^3}{3600} = 0.001942 \frac{m^3}{s}$$

Resistencia ofrecida por la tubería de salida:

$$R = \frac{h}{q_0} = \frac{4.12}{0.0019426} = 212 \frac{s}{m^2}$$

La Capacitancia de un tanque se define como la variación en la cantidad de líquido acumulado. $c = \frac{V}{h}$

Para C (una constante), el cambio en la velocidad permanece constante sin importar el cambio de h (y con condiciones iniciales de cero, por lo que C se puede calcular mediante la división del volumen del tanque entre la altura del tanque).

$$C = \frac{V}{h} = \frac{h^3}{h} = h^2 = (4.12)^2 = 16.97m^2$$

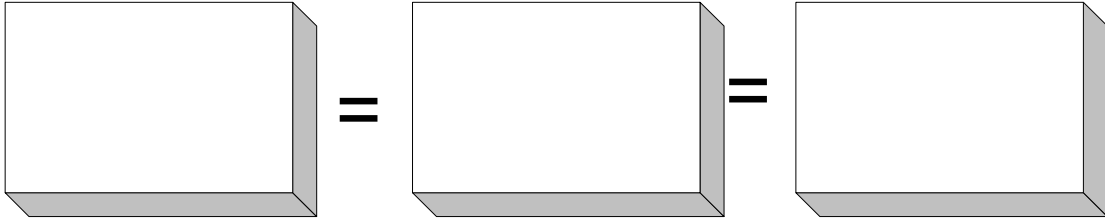


Figura 4.7 Bloque de la planta del sistema

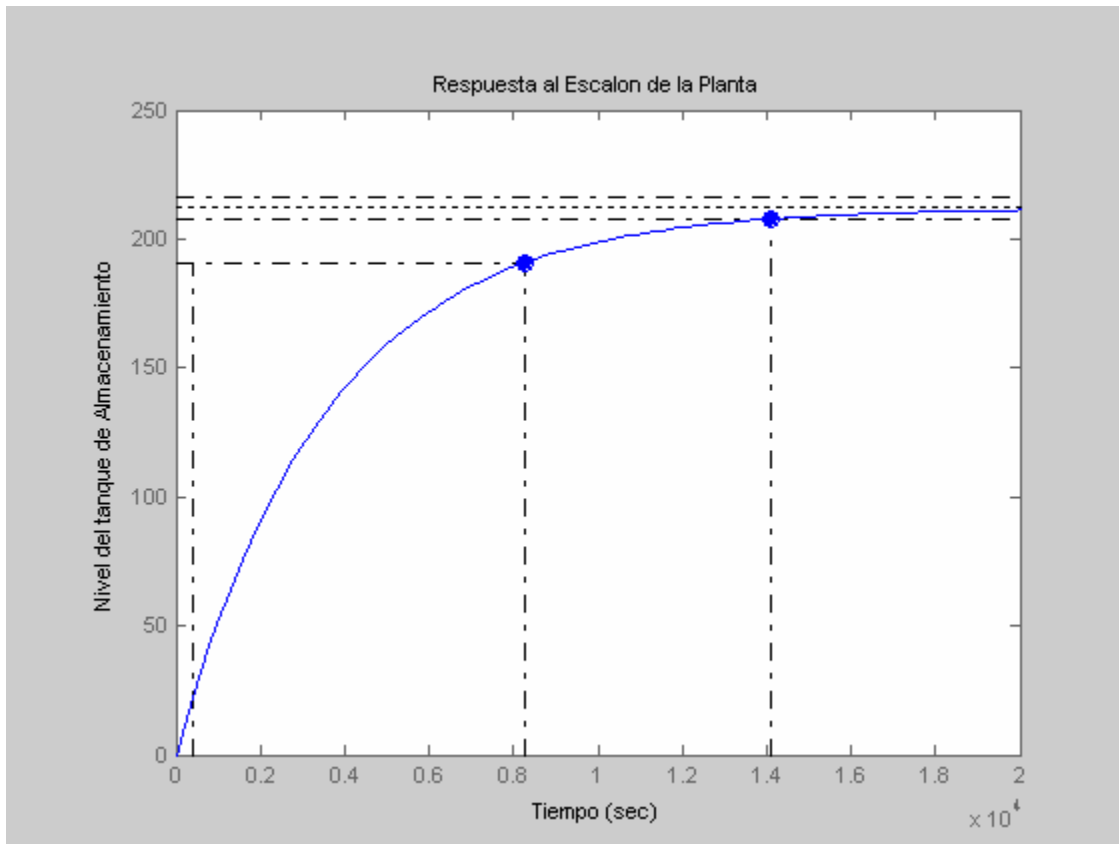


Figura 4.8 Respuesta de la planta

La figura 4.8 muestra el comportamiento de la planta, ante una respuesta de escalón. En esta grafica se observa que el llenado del tanque es aproximadamente de 7 horas.

4.3.10 Función debida al retardo del agua, entre los tanques de rebombeo y almacenamiento.

Por otra parte, se tiene que tomar en cuenta que existe un retardo F , en lo que llega el agua del tanque de rebombeo al tanque de almacenamiento.

Para encontrarlo se realizó 5 experimentos y se tomó la moda, tal como se muestra a continuación.

Tabla 4. Datos experimentales del tiempo de retardo.

Número de experimento	Tiempo (Segundos)
1	10
2	12
3	10
4	12
5	11

El tiempo de retardo se representa por medio de la siguiente expresión matemática: $e^{-T_d s}$. Una forma para aproximar ese valor se muestra a continuación:

$$e^{-T_d s} \cong \frac{1}{1 + t_d s + \frac{t_d^2 s^2}{2}} \cong \frac{1}{1 + 10s + 50s^2}$$

Por medio de este valor se puede modelar la repuesta que representa este tipo de retardo en el sistema.

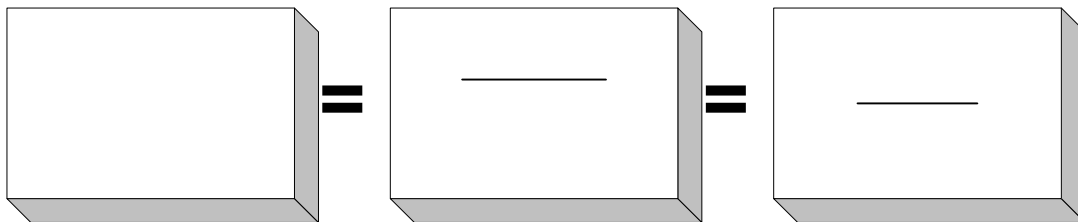


Figura 4.9 Bloque de la función de retardo en el acueducto del residencial

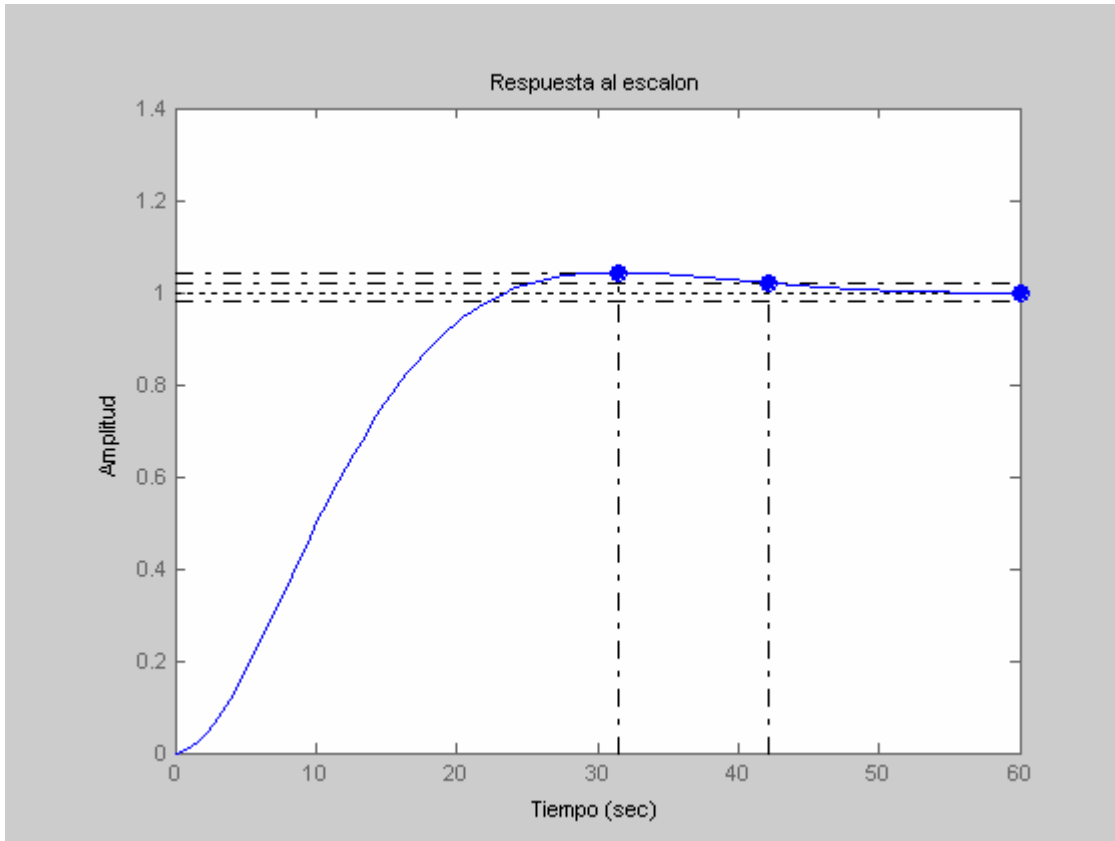


Figura 4.10 Respuesta de la función de retardo del sistema de rebombeo.

En la figura 4.10 se muestra el comportamiento de la función de retardo del sistema.

Se observa que el tiempo de sobre impulso es menor del 10%. El tiempo de estabilización se encuentra dentro de un rango de 25 segundos. Este comportamiento inestable se considera despreciable ante el comportamiento general del sistema. Debido a que la planta del sistema se puede considerar como un sistema lento (Debido a que abarca un periodo considerable).

4.3.11 La Función de transferencia de la bomba

Según las características del fabricante la respuesta es lineal, y tiene una capacidad de brindar 200 galones por minuto.

Como en el proyecto se utilizará un variador el cual tiene el objetivo de controlar los niveles del motor. Dicho variador maneja el nivel mínimo (0V), para apagar el motor y nivel máximo (10V) para mostrar la carga máxima del motor.

El enunciado anterior muestra indica que con un voltaje de 10V el motor genera 200 galones por minuto.

Nota: 1 galón equivale a 3.78 litros

1000 litros equivale a $1m^3$

$$100 \frac{\text{galones}}{\text{minuto}} * \frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ segundos}} * \frac{3.78 \text{ litros}}{1 \text{ galon}} * \frac{1 m^3}{1000 \text{ litros}} = 0.0631 \frac{m^3}{\text{segundo}}$$

$$10v = 0.0631 q(t)$$

$$\text{Por tanto } G_m = \frac{Q(s)}{V(s)} = \frac{10}{0.0631} = 158.48 \quad (\text{unidades} = 1/\text{segundo})$$

4.3.12 Sistema total de tanque de rebombeo sin compensador.

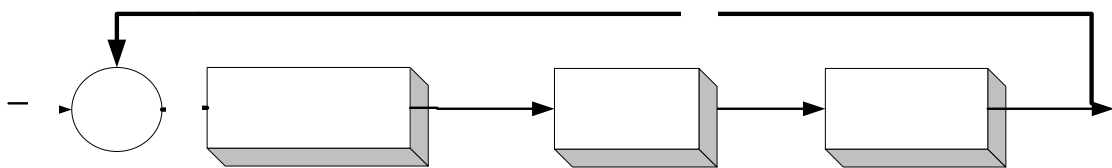


Figura 4.11 Bloques de los distintas plantas en el sistema de acueducto

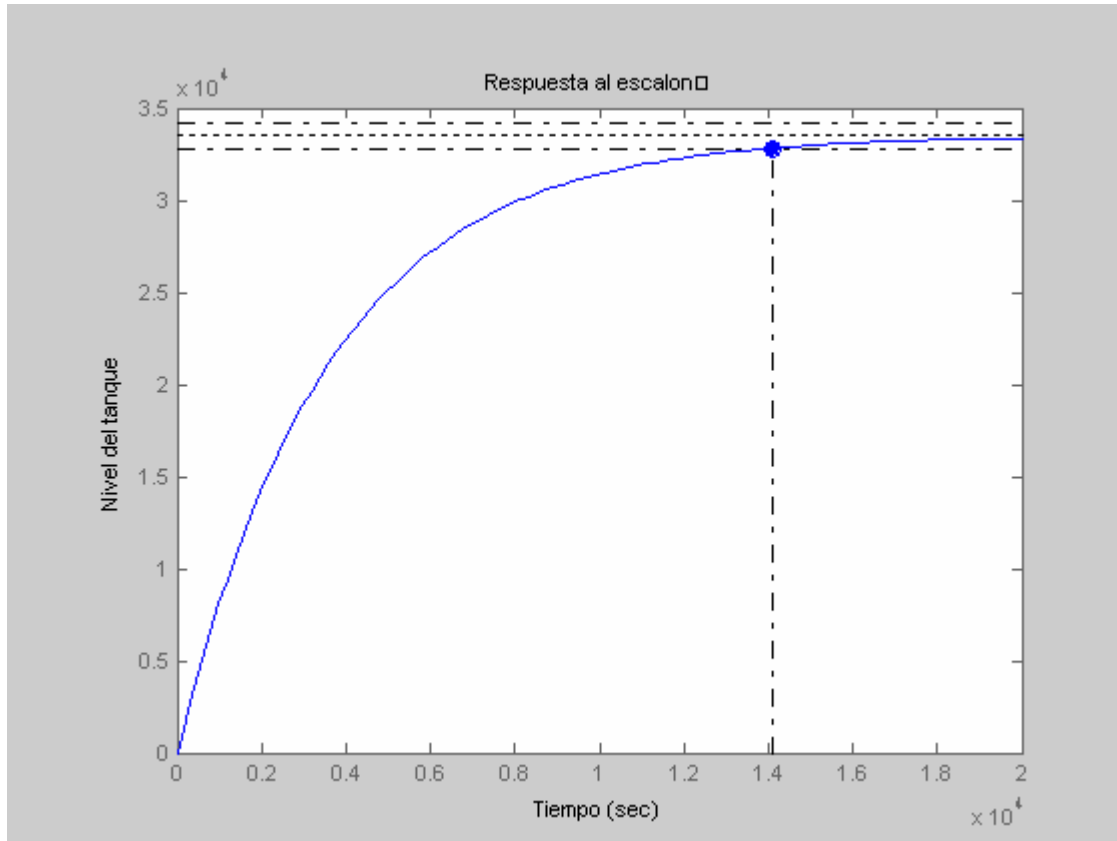


Figura 4.12 Respuesta del escalón del sistema de acueducto

En la figura 4.12, se muestra la respuesta del sistema de acueducto, ante una respuesta de escalón.

En dicha respuesta se observa que la respuesta del sistema de acueducto, no presenta sobre impulso. También se observa que existe una descompensación de la señal final, emitida por la planta. Dicha descompensación se puede eliminar agregando un valor proporcional al compensador del sistema.

4.3.13 Respuesta con un controlador proporcional.

Se elige un valor proporcional cuyo valor aproximado es de 0.000117. Este valor permite que la salida de nivel este acorde con las dimensiones del tanque.

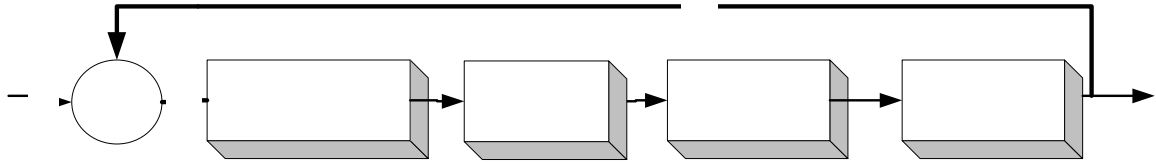


Figura 4.13 Bloques de las distintos valores la planta del sistema

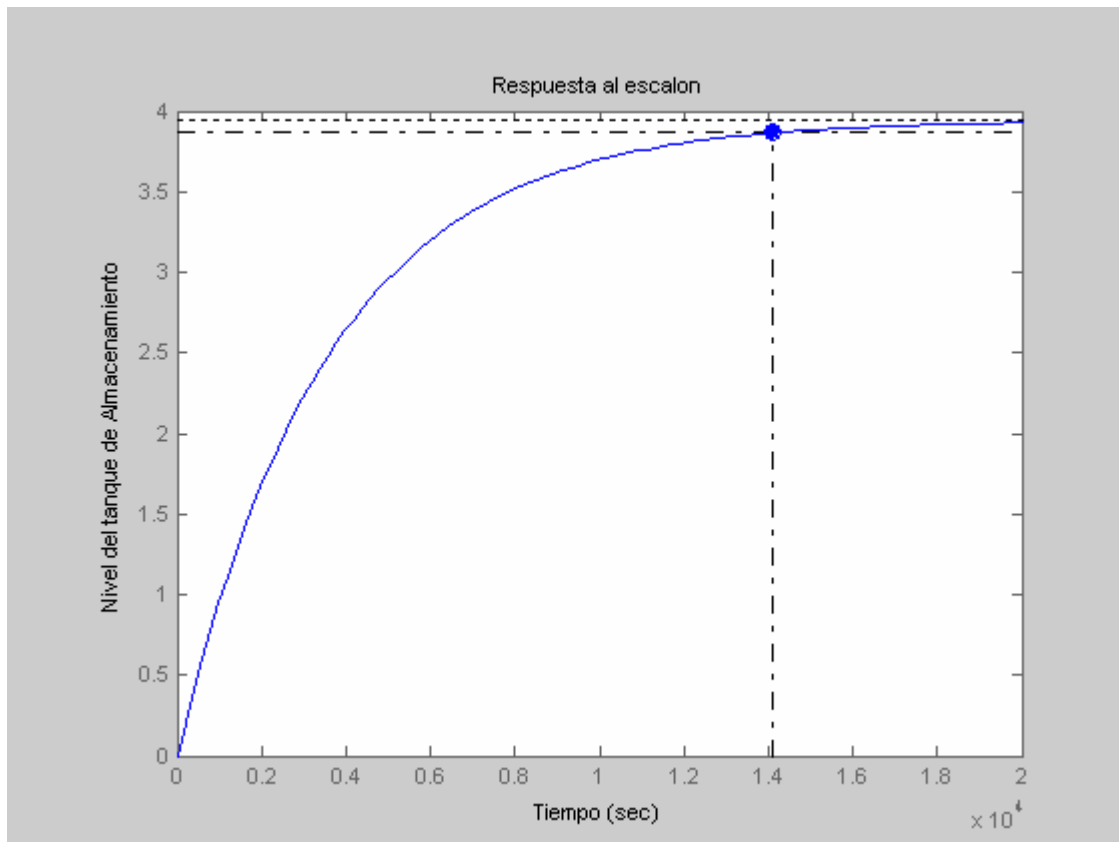


Figura 4.14 Respuesta del escalón del sistema de acueducto con un valor proporcional

En la figura 4.14, se muestra el comportamiento del sistema al incorporarse un valor proporcional. Este valor elimina la descompensación del sistema. El nivel de almacenamiento corresponde a un valor de 4.12m de altura (dimensión de la arista del tanque de almacenamiento).

4.3.14 Conceptos de los sistemas hidráulicos:

El proyecto requiere el conocimiento del área en la mecánica de los fluidos y la hidráulica. Principalmente en las propiedades en la estática y dinámica de los fluidos de complejidad intermedia.

Se necesitan manejos de cálculos matemáticos de nivel intermedio, orientados al álgebra y cálculo diferencial.

La mecánica de fluidos puede subdividirse en dos campos principales: la estática de fluidos, o hidrostática, que se ocupa de fluidos en reposo, y la dinámica de fluidos, que trata de fluidos en movimiento. El término de hidrodinámica se aplica al flujo de líquidos o al flujo de los gases a baja velocidad, en el que puede considerarse que el gas es esencialmente incompresible.

El modelado del sistema requiere definir conceptos fundamentales como:

Capacitancia: es la razón entre el cambio en la cantidad de líquido acumulado y el cambio de nivel.

Se hace esta interpretación puesto que en la ecuación diferencial ocupa el lugar de la superficie del tanque con lo cual se logra una equivalencia tonel modelo de carga del capacitor en un circuito RC.

Resistencia: es la razón entre el cambio en la diferencia de niveles y el cambio en el caudal. Se interpreta así como la inversa del área de pasaje en la válvula de salida o carga en el tanque

Caudal: es la razón de cambio de volumen en el factor del tiempo.

Flujo: es el movimiento de un fluido con respecto a un sistema inercial de coordenadas, generalmente ubicado en un contorno sólido.

4.3.15 Sistemas hidráulicos de tuberías.

Esta ciencia abarca temas de tuberías simples, sistemas de tuberías, sistemas de bombeos, sistemas de distribución de agua potable o acueductos y sistemas de riego convencionales.

Por medio de esta ciencia, se puede calcular la velocidad de flujo en el punto por el cual la sección transversal de una tubería circular, tiene una velocidad promedio.

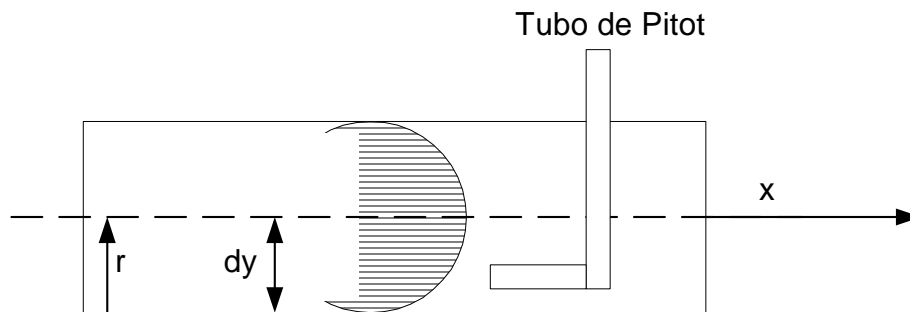


Figura 4.15 Sección transversal de un tubo circular

La distribución de velocidad para flujo hidráulicamente rugoso esta dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{V_x}{V_*} = \frac{1}{0.4} \ln \frac{y}{K_s} + 8.48$$

Nota: V_* representa la velocidad de corte.

El área de la sección transversal del tubo esta dada por la ecuación:

$$dA = 2\pi(r - y)dy$$

El caudal de este diferencial de área es:

$$dQ = V_* dA$$

$$dQ = V_x 2\pi(r - y)dy$$

El caudal total de la sección analizada se presenta a continuación.

$$Q = \int_A dQ = \int_0^r 2\pi V_x (r - y) dy$$

Reemplazando la velocidad se obtiene:

$$Q = 2\pi \int_0^r \left(\frac{V_*}{0.4} \ln \frac{y}{K_s} + 8.48V_* \right) (r - y) dy$$

Después del proceso de integración se llega a ecuación mostrada a continuación

$$Q = 2\pi r^2 \left[\frac{V_*}{0.8} \ln \frac{r}{K_s} + 2.37V_* \right]$$

Esta ecuación representa el caudal que pasa por la totalidad de la sección transversal de la tubería. Para obtener la velocidad media se debe dividir este caudal por el área transversal:

$$\text{Velocidad media} = Q / A = Q / (\pi * r^2)$$

Obteniendo la siguiente ecuación:

$$V_{media} = \frac{V_*}{0.8} \ln \frac{r}{K_s} + 4.73V_*$$

y también

$$V_{media} = \frac{V_*}{0.8} \ln \frac{y_m}{K_s} + 8.48V_*$$

Para encontrar el valor de y, en el cual el tubo de pitot mida la velocidad media se tiene que igualar estas dos ecuaciones.

$$\frac{V_*}{0.8} \ln \frac{r}{K_s} + 4.73V_* = \frac{V_*}{0.8} \ln \frac{y_m}{K_s} + 8.48V_*$$

El resultado de esta ecuación es de $y=0.224r$, es decir que el medidor de velocidad tiene que ubicarse a 0.224% del radio de la tubería, con el objetivo de medir el promedio de la velocidad.

4.2.16 Cálculo de la dimensión de la tubería un punto a otro.

Para realizar un cálculo de la velocidad promedio del agua, se tiene que considerar el caudal de una tubería, la potencia de una bomba, la viscosidad del fluido y la distancia de separación.

Primero se tiene que conocer la cabeza que es producida por la bomba. Por lo general las bombas tienen una eficiencia de 85%.

$$P = \frac{1}{\eta} \rho Q g h$$

Donde:

P = potencia en el eje de la bomba (43.75Kw = 25 Hp)

η = eficiencia (85 %)

ρ = densidad del Fluido (0.89 g/cm³)

Q = caudal (200galones/minuto)

g = aceleración de la gravedad

h = cabeza producida por la bomba.

d = Distancia de separación entre los puntos (822m)

μ = Viscosidad cinemática del agua (1.9x10⁻⁵m²/s)

Despejando la variable h (cabeza de agua), y reemplazando los datos, se obtiene el siguiente valor:

$$h = \frac{\eta P}{\rho Q g} = 24.34m$$

La ecuación de dimensión de la tubería esta dada por:

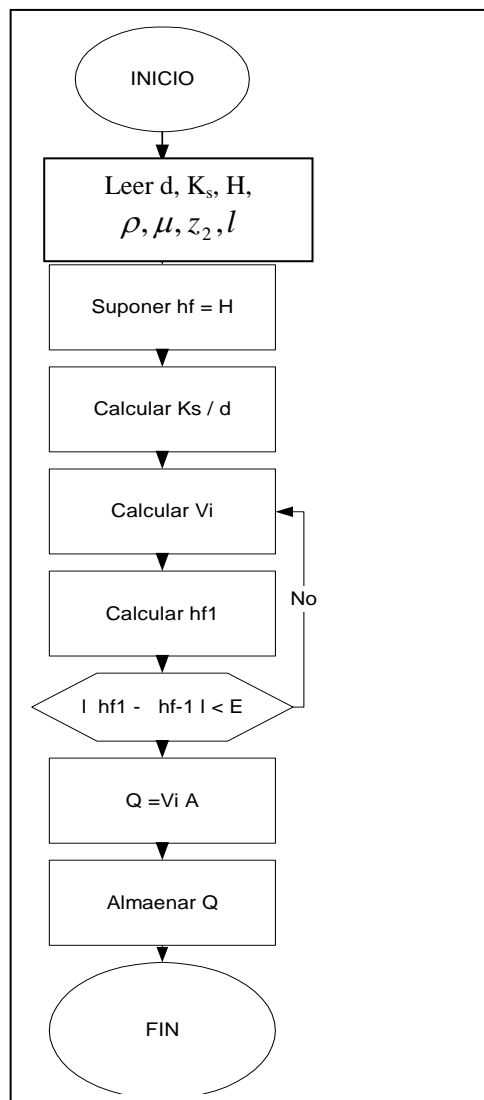
$$d = \sqrt[4]{\frac{128 * d * Q * \mu}{\pi * g * h}} = 0.076m \approx 3 \text{ pulgadas}$$

4.3.17 Cálculo de la velocidad media del agua de un punto a otro por medio de una bomba de agua.

$$V_{media} = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 * 0.0125}{3.14 * 0.076^2} = 2.7 m/s$$

4.3.18 Cálculo de caudal de agua través de una tubería de PVC de 3 pulgadas de diámetro nominal.

Cálculo de caudal de agua que puede ser movido a través de una tubería de PVC de 3 pulgadas de diámetro nominal y 730 m de longitud, que conecta a dos tanques a una diferencia de 100m de nivel (el nivel mas bajo de los tanques es de 700mts). El diámetro de real de la tubería es de 293 mm y su rugosidad absoluta es de $1.5 \times 10^{-6} m$.



En la figura 3.0 se muestra un diagrama de flujo que indica el cálculo de caudal.

Donde:

d: Diámetro de la tubería

l: longitud de la tubería

Ks: rugosidad absoluta

p :Densidad del flujo

u: viscosidad dinámica del flujo

$\sum Km$: Coeficiente de pérdidas menores, incluyendo válvulas.

$$Vi = -\frac{2\sqrt{2gdh_f}}{\sqrt{l}} \log_{10} \left(\frac{K_s}{3.7d} + \frac{2.51v\sqrt{l}}{d\sqrt{2gdh_f}} \right)$$

$$hf = H - Z_2 - \sum Km \frac{V_2^2}{2g}$$

Figura 4.16 Diagrama de bloque para el cálculo de caudal en una tubería

Por medio del diagrama de flujo anterior se obtiene la siguiente tabla
 Con los valores del agua a una temperatura de 20⁰c

$$\rho = 998.3kg / m^3$$

$$logitud = 730m$$

$$ks = 1.5x10^{-6} m$$

Tabla 5 Valores de caudal en distintos puntos de una tubería

H(M)	KS/D	HF	V	HF1
				700
800	5.12E-06	800	2.67E+01	3.72E+02
800	5.12E-06	371.5812366	17.7532942	610.2491038
800	5.12E-06	610.2491038	23.1113933	478.4280267
800	5.12E-06	478.4280267	20.3094683	551.6735131
800	5.12E-06	551.6735131	21.9062311	511.0908697
800	5.12E-06	511.0908697	21.0349883	533.6145578
800	5.12E-06	533.6145578	21.5224549	521.1250212
800	5.12E-06	521.1250212	21.2533935	528.0541086
800	5.12E-06	528.0541086	21.4030423	524.21099
800	5.12E-06	524.21099	21.3201584	526.342855
800	5.12E-06	526.342855	21.3661717	525.1603637
800	5.12E-06	525.1603637	21.3406604	525.8162931
800	5.12E-06	525.8162931	21.3548149	525.452458
800	5.12E-06	525.452458	21.3469646	525.6542754
800	5.12E-06	525.6542754	21.3513195	525.5423293
800	5.12E-06	525.5423293	21.348904	525.604425
800	5.12E-06	525.604425	21.3502439	525.569981
800	5.12E-06	525.569981	21.3495006	525.5890868
800	5.12E-06	525.5890868	21.3499129	525.578489
800	5.12E-06	525.578489	21.3496842	525.5843675
800	5.12E-06	525.5843675	21.3498111	525.5811067
800	5.12E-06	525.5811067	21.3497407	525.5829155
800	5.12E-06	525.5829155	21.3497797	525.5819122
800	5.12E-06	525.5819122	21.3497581	525.5824687

Con los resultados obtenidos en la tabla 4.3.2.3, se puede resumir que

$$H_f = 525.58$$

$$H_m = H - h_f = 800 - 525.58 = 274\text{mts}$$

$$V = 21.4 \text{ m/s}$$

$$Q = V * A = 21.34 \frac{m}{s} * \frac{\pi}{4} * (0.293m)^2 = 1.44m^3 / s$$

El caudal visto en el punto de salida del tanque de almacenamiento sin considerar la utilización de reductores de presión, sería aproximadamente de 1.44m³/s. Este cálculo es teórico.

4.4 Ciencias de la ingeniería electrónica

Se requiere utilizar conceptos de la ingeniería electrónica de alta complejidad, debido a que la solución propuesta amerita electrónica analógica y digital, sistemas de comunicaciones eléctricas, teoría de modelos de sistemas, conceptos de control automático, y manejo de motores, generadores y de distintos sensores.

Dentro del proyecto por realizar, se pretende operar las siguientes consignas (entre otras):

- ☀ Controlar el nivel de los tanques, para evitar rebaleses o minimizar rebaleses.
- ☀ Monitorear el comportamiento de la demanda y el almacenamiento en tanques
- ☀ Registrar y monitorear las fuentes de abastecimiento con el fin de decidir si es necesario bajar o subir el caudal proveniente del AyA.
- ☀ Operar remotamente los dispositivos que se manipulan con más frecuencia, con el fin de reducir costos operativos y aumentar la velocidad de respuesta del sistema.
- ☀ Llevar un registro del comportamiento del sistema, diariamente, mensual y estacionalmente.
- ☀ Controlar dispositivos de potencia tal como motores y generadores

Para la realización de los puntos anteriormente mencionados, se requieren medir ó monitorear diferentes señales físicas tales como nivel de tanque (m), caudal (m^3 / s), presión (bar o psi), voltajes (V), corriente (A) y potencia (KW).

Para la medición de los datos físicos es necesario recurrir al uso de elementos electrónicos, de medición directa o indirecta. Tales como sensores en general, contactos, electrodos, sensores sónicos entre otros.

Las señales físicas son directamente tomadas por el elemento electrónico y son convertidas luego en una señal analógica por medio de un transductor, o en señales digitales.

Una señal analógica es una variable que representa en forma análoga la variación de otra. En variables de acueductos las señales análogas más comunes son las de corriente de 4 a 20mA en 24VDC. En el caso de los niveles de tanque, si se calibra de tal forma que 4mA corresponde a la lectura cuando el tanque está en el piso y 20mA corresponde al nivel de rebalse, puede medir el nivel en forma análoga midiendo la corriente en cualquier momento y haciendo un simple cálculo de regla de tres.

La calibración de las señales analógicas de 4-20mA, consiste en ajustar el transductor para que devuelva una corriente de 4mA cuando se tiene el valor

mínimo del dato y ajustarlo para que devuelva 20 mA en el caso del valor máximo posible. Esta calibración es importante para asegurar la exactitud y precisión de las lecturas.

Las señales digitales discretas son generadas por contactos que se cierran o abren, lo que de alguna forma indica la ocurrencia de una condición que por analogía se puede interpretar como un dato. Este tipo de señales es útil en fenómenos físicos que tienen un comportamiento binario o bien escalonado. Un ejemplo de variables binarias necesarias de leer, son el estado de un equipo, el contacto abierto indica que el equipo está apagado, y cerrado indica que el equipo está encendido. Como ejemplo de una lectura escalonada, en nuestro caso, el tanque cuenta con 2 mini-flotadores con contactos espaciados uniformemente en sentido vertical, los cuales se van cerrando de acuerdo al nivel del agua. Haciendo un cómputo con los contactos cerrado y los que quedan abiertos se puede estimar el nivel de tanque a intervalos de 50% (Indicando bajo nivel o nivel de trabajo).

Los cálculos necesarios para obtener un dato que el operador pueda entender, los realiza el Controlador Lógico Programable, conocido como PLC.

Se implementó equipos de automatización industrial, tal como PLC, debido a las siguientes características:

- ✿ Se programa por bloques y el programa se graba en EEPROM.
- ✿ Tiene uno o varios puertos de comunicaciones del tipo RS-232C ó RS-485, para realizar la transmisión de datos en forma serial.
- ✿ Tiene módulos de entradas y salidas analógicas y discretas.
- ✿ Tienen una dirección o nombre ajustable, al cual pueden responder.
- ✿ Pueden realizar operaciones matemáticas, operaciones con cadenas de caracteres, manejo de memoria y conversión de tipos, así como las herramientas de comunicaciones.
- ✿ Pueden ser programados para activar o desactivar las salidas digitales con base en las señales de entrada o con base en comandos del usuario, lo cual es útil en automatización.
- ✿ Su diseño orientado al control de motores y de sistemas de potencia.
- ✿ Con flexibilidad a la expansión, por medio de módulos digitales y analógicos
- ✿ Ofrece una plataforma de comunicación que permite la comunicación con dispositivos HMI (Interfase Hombre Máquina).
- ✿ Diseñado a la resistencia de vibraciones, ciertos niveles de humedad, y polvo.

El Proyecto también comprende transferencia de información por medio de sistemas inalámbricos

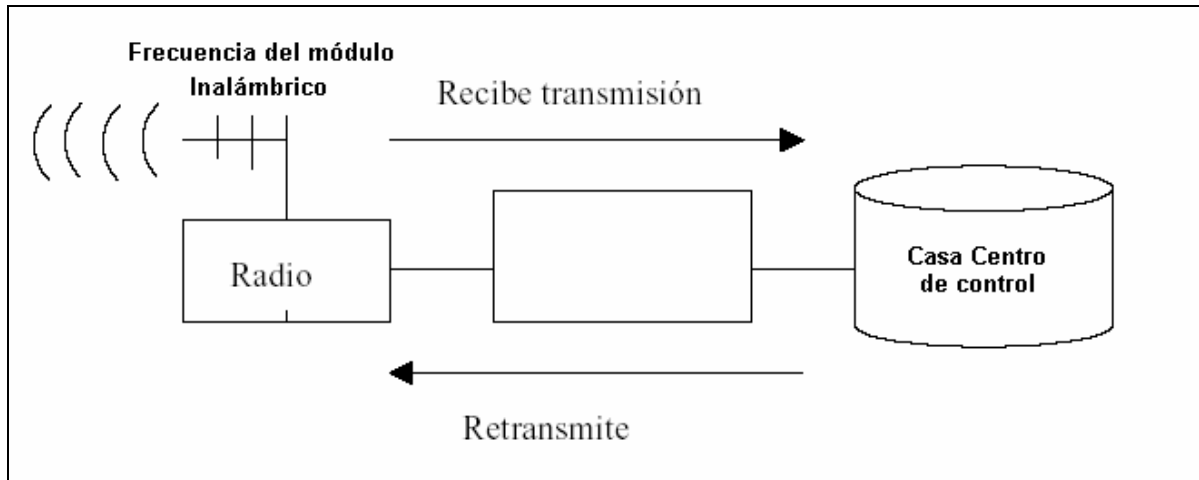


Figura 4.17 Comunicación del Centro de control con el master

En la figura 4.17 se describe el medio electrónico, por el cual se transmitió la información de los distintos puntos del acueducto.

Debido a la distancia, entre los puntos, se implementó un sistema inalámbrico, que permitió la comunicación entre los módulos. Por medio de este medio se enviaron datos de control e información de monitoreo.

El funcionamiento de este tipo de sistema se basa en el enrutamiento de los paquetes de datos, para lo cual se debe contar con un dispositivo inteligente (PLC de gran capacidad) con la facultad de leer el mensaje completamente y los almacene en o transmita a un sistema SCADA.

Es una comunicación Half-Duplex, que requiere el uso de una sola frecuencia de radio para comunicar todos los puntos remotos.

Los datos a transmitir son provenientes de sensores ultrasónicos, sensores de nivel de voltaje, de electrodos, y sensor de presión.

A continuación se muestran los sensores más importantes, implementados en el acueducto.

4.4.1 Sensor de nivel Ultrasónico

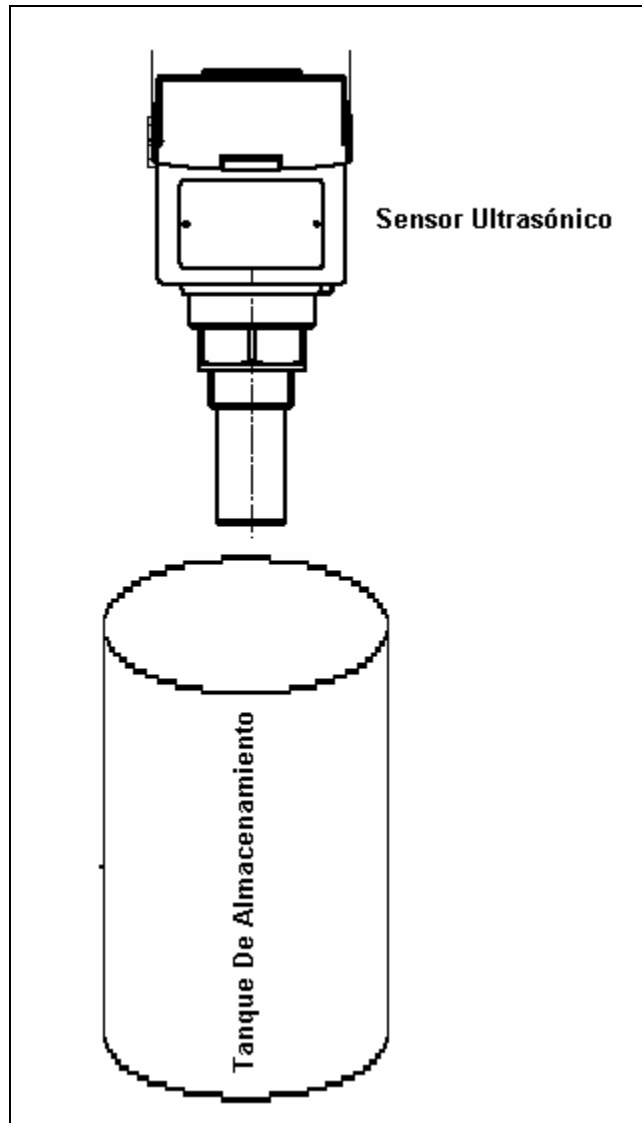


Figura 4.18 Representación de medición de nivel del tanque de almacenamiento.

En la figura 4.18 se muestra un diagrama general, del sensor de nivel ultrasónico.

Debido a la ubicación del tanque, se implementó un sensor ultrasónico, con salida de 4 a 20 mA, en un rango de 7 a 15 mts.

El método utilizado por este sistema de ultrasonido se basa en la medición del tiempo de retorno de una onda acústica emitida por un sensor que se refleja en la superficie de líquidos y es recibida por el mismo sensor.

4.4.2 Sensor de presión



Schneider Electric Nautilus Pressure Switch

Figura 4.19 Sensor de presión implementado en el acueducto.

El sensor de presión mostrado en la figura 4.19, es de marca Telemecanique de Schneider. Dentro de sus características se encuentran:

- Sensor programable
- Salida analógica de 0 mA a 20 mA señal de salida para 0 a 145 psi.
- Tiene salida a rele,

Los presostatos digitales tiene el objetivo de brindar una magnitud de la presión del sistema. Para el sensor mostrado en la figura 4.19, puede brindar en PSI y en unidades de Bares.

4.5 Ciencias de la ingeniería de la computación

Requiere utilizar conceptos de una complejidad intermedia, debido a que se utilizará lenguajes de alto nivel como Vijeo Look (Scada), algoritmos y programación en escalera (PLC), Visual Basic, módulos inalámbricos y Bases de datos en la implementación del proyecto, algoritmos para el control de los dispositivos, programación de los módulos inalámbricos.

El software SCADA, tiene como finalidad realizar el monitor de variables tales como caudales, presiones, niveles de tanque, variables eléctricas de los equipos de bombeo y la operación remota de válvulas, bombeos y pozos.

El proceso del monitoreo se debe realizar en tiempo real, o sea que en el Centro de Control se puede saber el valor instantáneo de cada parámetro. Para ello existen estaciones remotas, que realizan constantemente las lecturas de las variables, y luego las reportan al computador central (servidor de adquisición de datos). Este a su vez las presenta en la pantalla del operador, y otro programa las almacena en una base de datos histórica.

La comunicación entre el servidor y las estaciones remotas es de dos vías: a) el computador interroga a la estación remota y le transmite los comandos del operador (telemando) y b) la estación remota realiza las acciones, informa los valores solicitados por el computador y confirma la realización de los mandos.

Para la complementar la adquisición y el manejo de los datos se tiene que implementar programas adicionales tal como Visual basic.

4.6 Ciencias de otras ingenierías

El desarrollo del proyecto se utilizó conceptos de las áreas de fluidos y sistema hidráulicos.

4.7 Estudios complementarios

Se requirió realizar estudios complementarios, en relación con temas de los costos y rentabilidad de los componentes a implementar

4.8 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Para definir la validez de la solución se utilizaron criterios basados en la capacidad de entradas y salidas del sistema, ya que se necesitan como mínimo 2 entradas analógicas y una salida analógica.

Parte de los criterios de escogencia de la solución es el desempeño de la misma, las opciones de escalabilidad que se tienen, es decir poder ampliar el sistema si fuera necesario sin tener que hacer muchos cambios.

También se tomó en cuenta el aspecto de la robustez del hardware y utilización en aplicaciones con dispositivos de alta potencia.

Se consideró, el nivel y las oportunidades de programación del elemento de control que a utilizar en el diseño.

Para evaluar los elementos anteriores se realizaron las siguientes pruebas

1. Análisis de la programación, y costo del PLC y los accesorios AB, Twido, Siemens.
2. Evaluación, verificación de la estructura del los PLC para el control de los dispositivos.
3. Selección de módulo de comunicación inalámbrico, para el mejor acople de las condiciones en los diversos sectores.
4. Evaluación, verificación y modificación del programa realizado en el PLC para el control del módulo de comunicación.
5. Revisión del sistema en el laboratorio: En este punto se utilizó de dos a tres días. Esta revisión tuvo el objetivo de probar y verificar en bodega antes de llevarlo a la empresa, y así evitar contratiempos. Las modificaciones de hardware fueron de 0% y software representó un 10 %.

4.9 Implementación de la solución

La propuesta de solución fue probada por medio de simulaciones dentro de la oficina, pero estas no contemplan todo el sistema real, sino solamente una parte. Por esta razón, las pruebas finales se realizaron en el residencial.

Una vez implementada la solución se lleva a cabo una evaluación preliminar, ya que con los datos adquiridos se pueden generar gráficos que describan el funcionamiento del sistema de una forma muy aproximada a la realidad; además, se utilizarán modelos matemáticos para calcular constantes y para sintonizar los PID.

Cuando la solución ya está completa se entregarán manuales de usuario para el software SCADA, así como un manual descriptivo del funcionamiento del software del PLC.

En la implementación del dispositivo se siguió los siguientes pasos.

1. Instalación del panel de control en los distintos puntos del residencial, Cerro Colón. En este punto la participación del estudiante se centraría en la revisión de que todo esté bien conectado durante el armado. El armado se haría por parte de una empresa subcontratada
2. Revisión del estado y ubicación de los sensores digitales y analógicos.
3. Supervisión de la instalación de los fuentes alternativas de alimentación.
4. Puesta en marcha: Se estimó que en dos semana el sistema debe de quedar funcionando de forma definitiva, en esta semana se calibra y se hacen las modificaciones finales al sistema en la empresa LAUCA.
5. Capacitación a personal del Residencial Cerro Colón: Se les dio una explicación del sistema al personal de la empresa sobre su utilización y estructura. Esto llevaría un par de días.
6. Documentación: En una semana se entregó la documentación del proyecto para la empresa LAUCA. La documentación consistió en la entrega de los manuales técnicos de todos los equipos utilizados, los planos eléctricos, hojas de datos, un manual de posibles causas o problemas presentados y un manual de operación. Para la empresa AASA se realizó la misma documentación, solo que se le entregaría el programa del PLC debidamente documentado y una explicación detallada de todo el programa, junto con el control de costos.

4.10 Reevaluación y rediseño

El diseño del panel de control del acueducto, se orientó a permitir la adición de nuevos equipos, o lógicas, sin implicar un rediseño de gran magnitud.

Tal como se coordinó con el encargado de la empresa LAUCA, el panel debe permitir el agregado de nuevos sistemas de bombeo, y de control en caso de ser necesario.

Dicho diseño permite incorporar nuevas bombas de agua, o lógica adicional.

Como el sistema por desarrollar genera datos, las posibles opciones de mejora son definir cambios de tiempos, y de valores de las constantes del PID.

1. La reevaluación se realizará en caso de presentarse fallas en el control del nivel y de la presión del acueducto.
2. La reevaluación se realizará cuando la empresa LAUCA la solicite o con las siguientes visitas de evaluación.

4.11 Método de pruebas

El diseño se probará por etapas:

1. Verificación del sistema de comunicación
2. Comprobación de la lógica de activación de las distintas bombas de agua.
3. Prueba de la correcta activación de los dispositivos de energía alternativas (Generadores).
4. Comprobación de la correcta comunicación con el centro de control.
5. Verificación del comportamiento de los distintos paneles ante situaciones no normales.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución.

La propuesta consta de varios bloques principales: panel de control del tanque de almacenamiento, tanque de rebombeo y del pozo.

Cada uno de los paneles esta compuesto por dispositivos de potencia, de control automático, módulos inalámbricos , sensores (digitales y analógicos) y variadores que en conjunto permiten el manejo efectivo del acueducto para el residencial.

A continuación se describirá cada uno de los principales componentes dentro del diseño.

5.1 Análisis de la solución

En el desarrollo del proyecto, se tomaron en cuenta aspectos tales como:

- Pérdidas o fallas de sensores de medición.
- Pérdidas de comunicación.
- Sistemas alternativos de funcionamiento.
- Generación de informes de fallas frecuentes y de niveles de consumo.

El diseño del sistema de control esta orientado a la eficiencia del acueducto del residencial, a la adaptabilidad de nuevos equipos y a la implementación de métodos alternativos de control. Dichas disposiciones buscan un sistema de control ágil en el monitoreo de señales cruzadas (análisis por medio de varios métodos).

Con el objetivo de realizar un eficaz manejo de los recursos del Acueducto, sin causar pérdidas de equipos y prolongando la vida útil de los distintos equipos. Se efectuó un control por medio de métodos como de PID, así mismo, como por medio de niveles máximos y mínimos (Control de Electrodo de histéresis).

Debido a que el sistema diseñado, controla la distribución del agua dentro del residencial, y este líquido no puede faltar debido a que es vital. El sistema está programado para poder funcionar por medio de sistemas de control alternativos.

Es decir, en el caso en que el método de control de PID no pueda ser ejecutado, debido a deterioro o daño en el sensor de nivel analógico, el sistema diseñado efectúa un control de nivel de agua por medio de electrodos.

En el centro de control, se tiene la información de fallas y advertencias. El PLC transmite datos de consumo, nivel y estados de los distintos dispositivos dentro del panel. Esto permite que el encargado de mantenimiento este informado acerca de fallas de contactos, fallas en las líneas de alimentación primario o secundario, falla en los sensores, etc.

Es importante destacar que el sistema registra datos de consumo, presión y nivel de los distintos puntos, permitiendo tomar decisiones a niveles administrativos.

En la figura 5.1 se representa un diagrama genérico del sistema del acueducto del residencial.

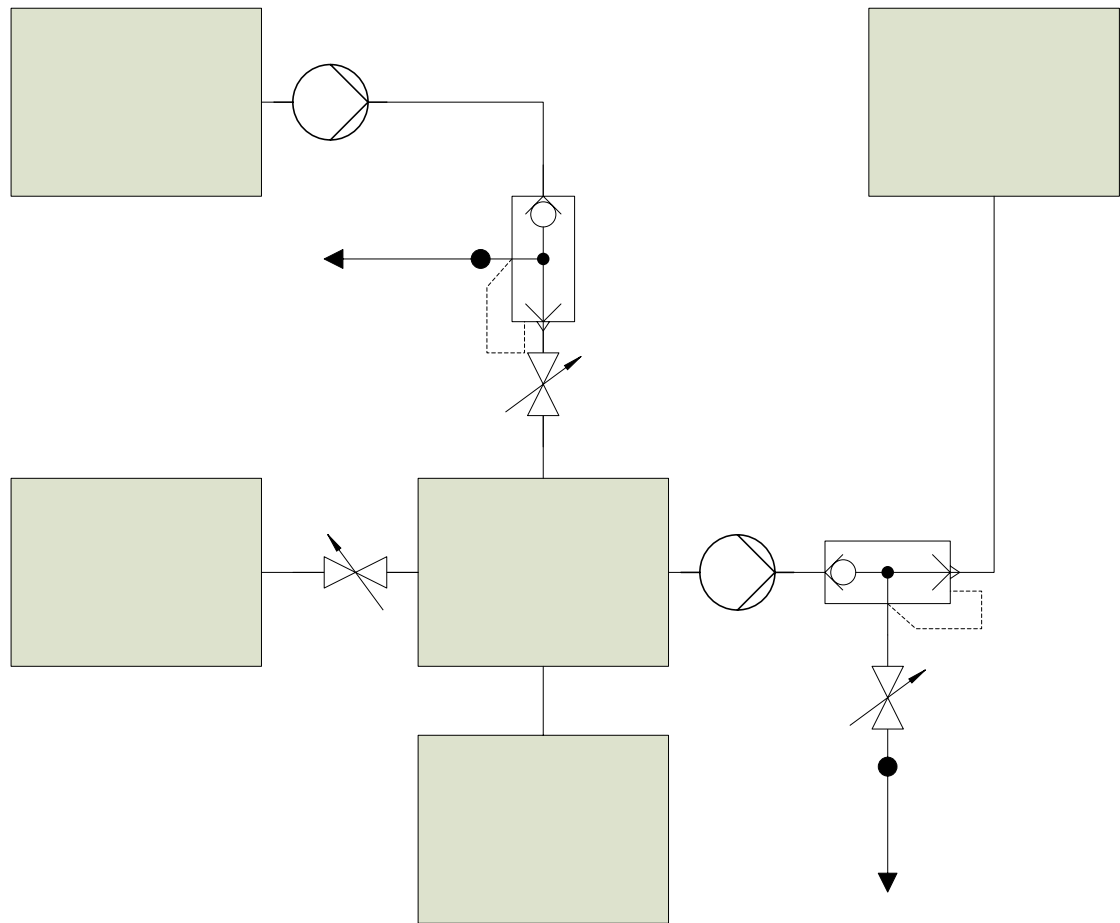


Figura 5.1 Diagrama General del sistema de Acueducto del Cerro Colón.

A continuación se describirá con detalles el funcionamiento de los distintos paneles.

POZO

5.1.1 Panel de control del tanque de almacenamiento

El diseño del panel ubicado en el tanque de almacenamiento, se caracteriza por lo siguiente:

- Poco consumo de energía eléctrica, debido que su fuente de alimentación es una batería y celdas solares.
- Transmisión del nivel de agua, del tanque de almacenamiento.
- Transmisión de la carga de la batería.
- Medición del nivel de agua por medio de un sensor ultrasónico.
- Es un PLC esclavo
- Se comunica a PLC maestro por medio de un módulo inalámbrico.
- En caso de pérdida de comunicación o deterioro del sensor analógico, emite la señal de falla de sensor.
- El tanque de almacenamiento es para 70 metros cúbicos,
- En caso de falla del sensor ultrasónico activar el control del tanque por niveles (Electrodos).

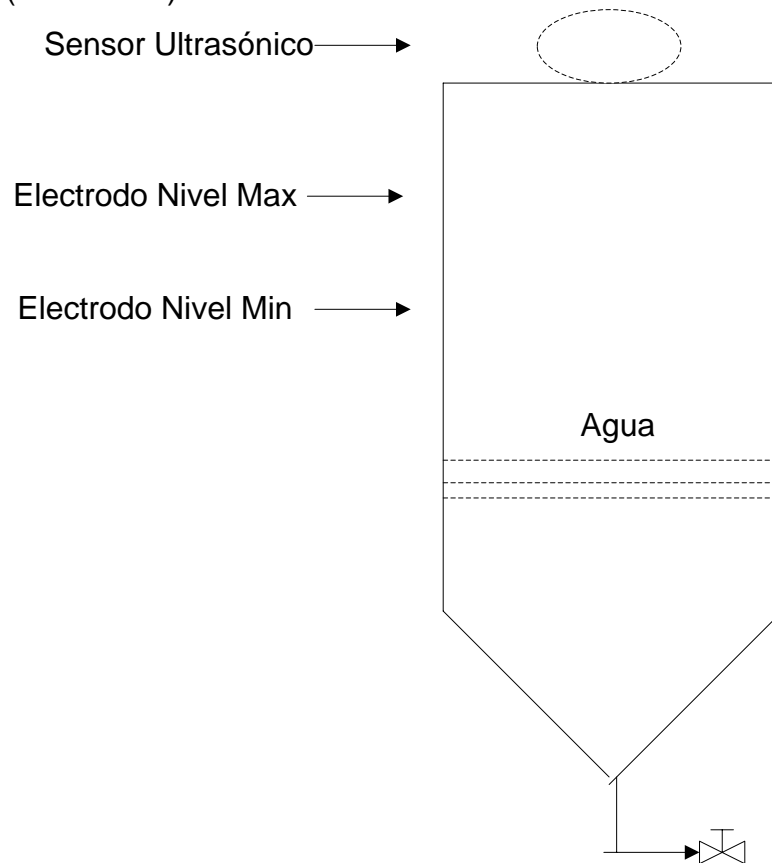


Figura 5.2 Diagrama general del tanque de almacenamiento

5.1.2 Panel de control del tanque de rebombeo.

El diseño del panel ubicado en el tanque de rebombeo, se caracteriza por lo siguiente:

- Tiene una bomba de agua de 25 Hp, trifásico de 480V, controlado por un variador.
- Realizar el arranque, paros y los cálculos de PID para la bomba del tanque de rebombeo, basándose en los datos recibidos del tanque de almacenamiento.
- Realiza el procedimiento de transferencia y retransferencia de las fuentes de emergencia del panel de rebombeo.
- Transmite el nivel del tanque de rebombeo al panel del pozo.
- Transmite la información de sus sensores y los datos de los PLC esclavos al centro de control.
- Es un PLC maestro.
- Se comunica a los PLC esclavos por medio del módulo inalámbrico.
- Transmite los datos de los distintos PLC al centro de control por medio de un cable de comunicación.
- En caso de falla del sensor analógico de nivel del tanque, el sistema trabaja por medio de electrodos, aplicando un arranque y paro suave.
- En el caso de perder la comunicación con el tanque de almacenamiento, ordena el apagado de la bomba de agua que suministra el agua al tanque de almacenamiento.
- El tanque tiene la capacidad de $20m^3$, un tanque con arista de 2.7 metros aproximadamente

En la figura 5.2 se muestra un esquema de los componentes del tanque de rebombeo.

La válvula del AyA se activa en casos que el pozo llene el tanque de rebombeo en un tiempo establecido y en los casos que el pozo no se encuentre en condiciones de suministrar agua, ya sea por fallas en la comunicación, paro de emergencia en el pozo o porque el pozo tenga un nivel bajo de agua.

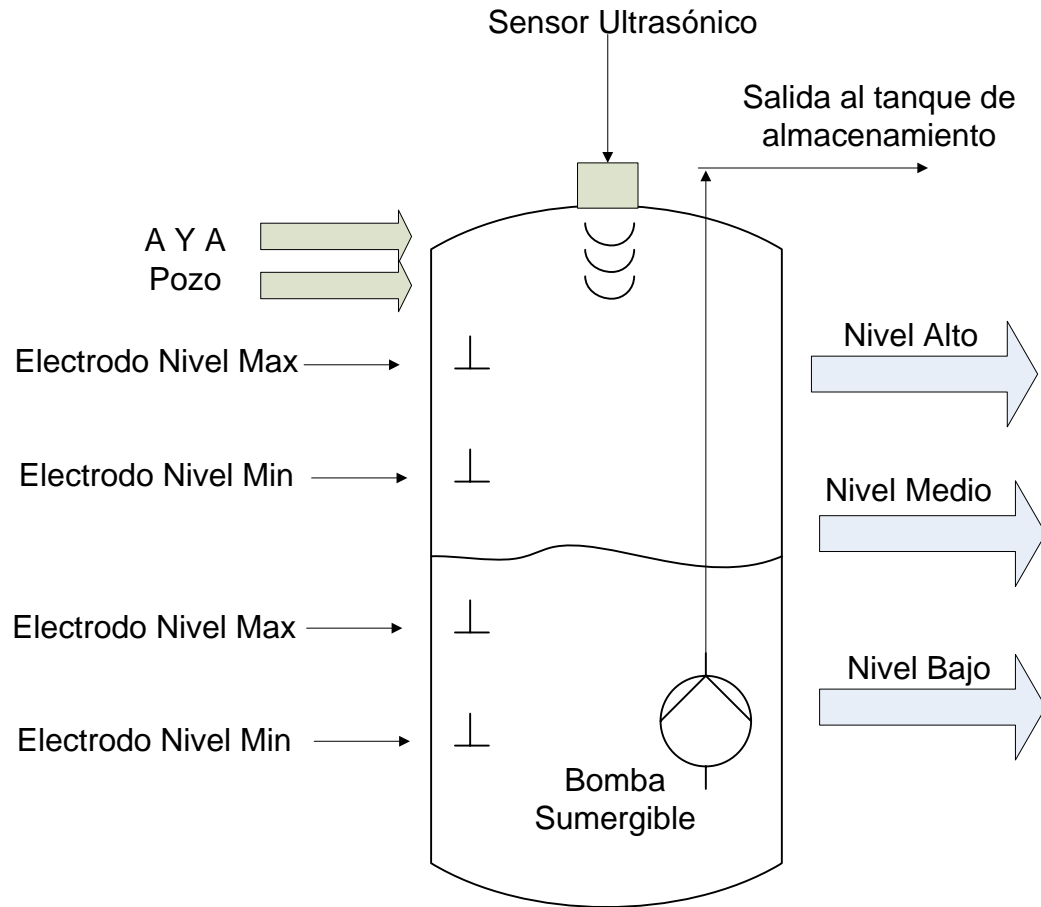


Figura 5.3 Diagrama general del tanque de rebombeo

5.1.3 Panel de control del pozo.

El diseño del panel ubicado en el pozo, se caracteriza por lo siguiente:

- Tiene una bomba de agua de 7.5 Hp, trifásico de 480V, controlado por un variador de frecuencia.
- Tiene sensores de nivel para determinar el nivel adecuado del nivel de agua de pozo.
- Realizar los cálculos de PID para controlar la bomba del pozo, basándose en los datos transmitidos por el tanque de rebombeo.
- Realiza el procedimiento de transferencia y retransferencia de las fuentes de emergencia del pozo.
- Transmite la información de sus sensores, contactores al panel de rebombeo.
- Es un PLC esclavo
- Se comunica al PLC de rebombeo por medio del módulo inalámbrico.

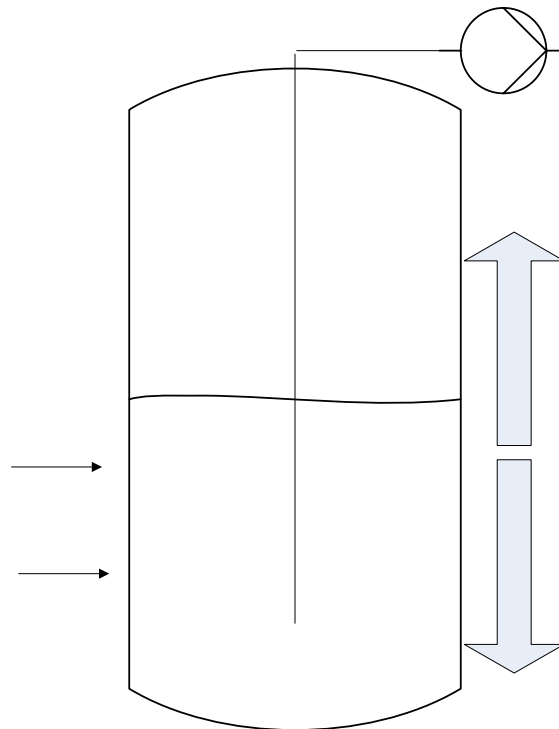


Figura 5.4 Diagrama general del pozo

5.1.4 Control de motores en los distintos puntos.

En los distintos paneles se realiza el control del agua, desde varios puntos de vista. Desde el punto de vista de Nivel constante, y también desde el punto de rango de niveles.

Para el control del trabajo de las distintas bombas de agua, se implementó dentro del diseño dispositivos de control de potencia conocidos como variadores de frecuencia; dichos equipos se encuentran fuera de los paneles y cercanos a los motores.

La sección de potencia de los dispositivos se deriva desde la acometida de la planta de 480V. La alimentación de cada bomba de agua es independiente para facilitar las labores de mantenimiento y no tener que sacar de operación uno de las bombas de agua para darle mantenimiento al otro.

La ubicación de este panel se encuentra dentro de una caseta, la cual se encuentra cercana a la zona de la bomba de agua.

Los dispositivos de potencia comprenden desde transformador, variadores de frecuencia, contactores, disyuntores, bornes de conexión, fusibles, entre otros.

Los variadores de frecuencia son los encargados de regular el trabajo de las bombas de agua. Esto se realiza por medio de una señal analógica emitida por el sistema de control, y este variador transforma esta señal en la atenuación o aumento de la frecuencia recibida por los motores.

Los accionamientos de todos los dispositivos de campo se hacen desde este panel, intervenido por el *PLC* de control *TWIDO24DRF*. Este *PLC* debe contar con entradas y salidas suficientes para cada una de las señales que se van a recibir y comandar, por ello se requiere la cantidad suficiente de módulos de entradas o salidas.

Para el diseño del panel se eligió este *PLC*, ya que cumple con las suficientes entradas y salidas, y permite la conexión de módulos analógicos.

El panel como tal surte la alimentación de cada dispositivo de campo. Así, desde este punto se puede eliminar la alimentación de alguno en caso de tener que realizar labores de mantenimiento.

En el panel se debe contar con una alimentación de respaldo para el sistema de control un sistema UPS, con el objetivo de garantizar respuestas efectivas en casos de falla en la acometida del ICE.

5.1.5 Paneles con sistemas de alimentación auxiliar

En estos paneles se controla el abastecimiento de agua dentro del residencial. Esto significa que a estos paneles llegan las señales de sensores de presión, caudal y de nivel que están destinados a supervisar las condiciones de operación los distintos tanques.

En el momento en que falten las condiciones de operación normales, los distintos sensores accionan una alarma, que indica al *PLC* de la existencia de una condición anormal.

El panel de control y potencia puede tomar varias acciones correctivas en caso de alerta. La primera consiste en una señal de alerta de nivel 1 donde solamente se debe notificar la falta de condiciones normales de operación. Para el segundo nivel de alerta se debe realizar un paro normal de las bombas de agua. En este caso una señal identifica y solicita al *PLC* de control realizar un paro normal. Y la alerta de nivel 3 se da cuando se han excedido por mucho las condiciones de operación y se debe realizar un paro de emergencia. El paro de emergencia significa que el sistema de seguridad activa una señal que va directamente al panel de control y potencia donde se desactiva la tensión de los dispositivos de campo a fin de apagar todo instantáneamente. También dicho *PLC*, tiene como función realizar los procedimientos de transferencia y retrasferencia en la alimentación de la bomba de agua.

Es muy importante que este sistema tenga operación continua hasta cuando falle el fluido eléctrico de la red por lo que está alimentado por una *UPS*.

Además, cuenta con una luz indicativa de cualquier estado de alerta o falla. Y la alarma mostrada por el programa *SCADA*, en la Casa de control.

Entre las eventualidades que maneja el sistema de seguridad se contemplan las siguientes:

- Paros de emergencias solicitadas por botones tipo hongo
- Chequeo de las condiciones de presión y nivel de operación
- Respuesta a alguna falla en el sistema de seguridad.
- Falla en el sistema de alimentación emergencia
- Paro en caso de falla de energía (*UPS* soporta el sistema de seguridad)
- Indicaciones ante falla en el contactor de la bomba
- Indicaciones ante falla en el variador de frecuencia de la bomba de agua

5.1.6 Panel de operador

El panel de operador es precisamente el sitio desde el cual se controla el nivel y la presión del agua dentro del acueducto del residencial, y se recopila la información de los distintos sensores.

Este consta de un panel central ubicado en el tanque de rebombeo, en el cual hay una computadora con un programa comandado por el ambiente *SCADA* del sistema. Desde aquí se pueden supervisar todas las acciones de los distintos puntos y sus condiciones.

En este sistema se muestran alertas de las diferentes variables así como las alertas de seguridad en sus tres niveles. También cuenta con un registro de los eventos de la operación. Éste incluye desde todos los accionamientos de cada uno de los motores hasta las alarmas activas, reconocidas, o silenciadas. Se puede monitorear de varias maneras la operación así como se pueden generar reportes.

La estación del panel de operador se encuentra en una red LAN (Local Access Network) por lo que se pueden ver los reportes de estado y condiciones que se han generado así como el monitoreo del acueducto en tiempo real desde otros puntos en la red. Dicha red se comunica por medio del protocolo Modbus.

El programa utilizado se llama Vijeo Look, y es un sistema que emula un sistema *SCADA* redundante que muestra las mismas posibilidades de operación y de alertas que se observan en los paneles.

Este muestra información del *PLC* tal cual es y envía también datos de forma directa, o con manipulación de los mismos. Puede mostrar y generar reportes de *Microsoft Excel* y las tendencias de las variables.

También genera informes de los niveles, presiones y caudales del acueducto en formato CSV. Este formato puede ser organizado por el programa Excel de Microsoft, y brindar información útil y fiable, a los encargados del residencial para la toma de decisiones dentro del acueducto.

5.1.7 Equipos de instrumentación

El diseño de los paneles de control del pozo, tanque de rebombeo y de almacenamiento incluye el uso de equipos de instrumentación en el campo. Dichos equipos son variados, pero están conformados principalmente por sensores de presión, flujo, nivel y caudal.

Estos dispositivos tienen el objetivo de monitoreo cada uno de los puntos críticos de la planta a fin de supervisar las condiciones de operación de los paneles, así mismo como general reportes precisos de funcionamiento del residencial.

5.1.8 Redes de comunicación

El protocolo utilizado en la comunicación en la automatización del acueducto es el Modbus.

Este protocolo se eligió debido a que es mucho más versátil y robusto que el puerto serial RS232.

El protocolo Modbus es un protocolo maestro/esclavo que permite a un maestro, y sólo a uno, solicitar respuestas de los esclavos o actuar dependiendo de la solicitud. El maestro puede direccionar los esclavos individuales o iniciar un mensaje de difusión para todos los esclavos. Los esclavos devuelven un mensaje (respuesta) a las solicitudes que se les envían individualmente. No se devuelven respuestas a las solicitudes de difusión del master.

Master de Modbus - El modo master de Modbus permite al controlador Twido enviar una solicitud a un esclavo y esperar su respuesta. El modo master de sólo se admite a través de la instrucción "EXCH". Este modo admite ASCII y RTU.

Esclavo de Modbus - El modo esclavo de Modbus permite al controlador Twido responder a solicitudes realizadas desde un master y es, además, el modo de comunicaciones predeterminado si no se ha configurado otro tipo de comunicación. El controlador Twido admite los datos y las funciones de control estándar y las ampliaciones de servicio para el acceso a objetos. El modo esclavo admite ASCII Modbus y RTU Modbus.

En una red RS-485 puede haber un máximo de 32 equipos sin repetidores (1 master y hasta 31 esclavos) y sus direcciones pueden estar comprendidas entre 1 y 247.

El puerto RS485 tiene algunas diferencias importantes con el puerto RS232 que se ven en la tabla comparativa RS232-RS485.

RS232 vs. RS485	
RS232	RS485
Hasta 15 metros	Hasta 1200 metros
Conecta el PLC solo a 1 dispositivo	Conecta el PLC a una red de hasta 31 dispositivos

Figura 5.5 Características generales de los protocolos RS232 y RS485

START	ADDRESS	FUNCTION	DATA	LRC CHECK	END
1 CHAR :	2 CHARS	2 CHARS	n CHARS	2 CHARS	2 CHARS CRLF

Nota: Longitudinal Redundancy Check (LRC)

Figura 5.6 Bloques del protocolo Modbus

La red de MODBUS RS-485 cumple con la misión de comunicar los *PLC*'s de los paneles entre si. También se utiliza este protocolo para la transferencia de datos entre el sistema SCADA y los *PLC*.

5.1.9 Unidades terminales remotas (RTU) o esclavos

Las RTUs realizan constantemente las lecturas de las variables, y luego las reportan a la estación maestra. Son las fuentes de datos para el monitoreo y control de la distribución de agua para el Centro de Control. La arquitectura de equipos utilizada en las RTU en general depende de si la estación es de bombeo o si se monitorea un tanque de almacenamiento.

En el caso de la estación de rebombeo, se procura monitorear las condiciones eléctricas bajo las cuales operan las bombas. Los flujos y las fuentes de alimentación utilizados (Acometida ICE o Emergencia) Los comandos ejecutados son arranques y paros de las bombas.

En el caso en los que se monitorea el tanque, las variables de interés son el nivel del tanque y los caudales de entrada y salida. Los comandos que se dan en estas estaciones están relacionados a la operación de válvulas de entrada y/o salida del tanque.

Cada RTU está formada por elementos primarios, controladores lógicos programables y enlaces de radio.

Los Controladores Lógicos Programables son equipos que convierten, procesan, almacenan y transmiten los datos. Por medio de un protocolo de comunicaciones digital reciben los mandos y los ejecutan. También llamado PLC, un controlador lógico programable es en realidad un computador que se encarga de “medir” por medio del módulo de entradas analógicas, el valor del dato análogo. Este módulo es como un medidor que mide la corriente en el cable que viene del sensor.

5.1.10 Estación maestra

La estación maestra se encuentra ubicado en el rebombeo y consiste en un enlace de radio módem, con un PLC conectado a un computador.

Este computador tiene un programa de adquisición de datos que se encarga de recoger los datos de las estaciones remotas, interrogándolas secuencialmente.

Una vez realizada la lectura de las esclavos, este programa envía por radio un mensaje dentro del cual hay una sección que identifica para cual estación remota es el mensaje. Todas las estaciones remotas reciben el mensaje pero sólo la que tiene programada la misma identificación en el puerto asignado en el mensaje contesta. Al ser recibido el mensaje de respuesta en la estación maestra, el programa de adquisición de datos lo guarda en una tabla. Desafortunadamente este programa tiene como limitación el hecho de que para poder incluir una nueva estación remota, ésta debe ser programada y compilada con una herramienta externa, es decir no se puede agregar por configuración una nueva estación en el programa como tal

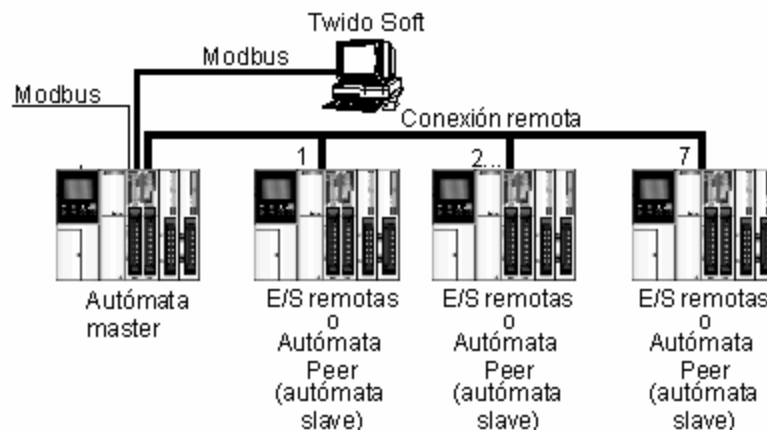


Figura 5.7 Arquitectura de comunicaciones utilizada

5.1.11 Módulos inalámbricos

Los módulos inalámbricos son parte esencial del sistema del control del acueducto.

Los dispositivos utilizados son transmisores y receptores de datos inalámbricos. La marca de estos dispositivos son FreeWave DGR-115

Estos equipos se programan por medio del puerto serie que trae incomparado. Está programado para la transmisión y recepción de datos con la siguiente configuración (se puede cambiar por medio del puerto serie).

Las características generales este transmisor y receptor, se describen a continuación:

Tabla 6 Características generales del módulo inalámbrico

Sistema	Full Duplex
Rango	20 millas
Comunicación	Puerto serie
Frecuencia de operación	902-928MHz
Ganancia	140dB
Potencia de salida	30 dB o 1 watt
Alimentación	10 – 18 VDC

En la tabla 6 se describen las características mas generales del módulo inalámbrico

Tabla 7 Configuración básica para la comunicación con el equipo de control

Parámetros	Configuración
Baud Rate	19200
Data Bits	8
Parity	None
Stop bits	1
Parity Check	None / Off
Carrier Detect	None / Off

Este dispositivo se programó de manera que permita la comunicación punto - Multipunto.

Tradicionalmente, en un sistema de multipuntos una sede central recolecta los datos de los distintos puntos. Esta estructura es distinta a un sistema punto –

punto, debido a que tiene que permitir la transmisión y recepción de varios esclavos.

Por medio de la configuración mostrada en la tabla 7, se logró comunicar el módulo de comunicación inalámbrica con el puerto de dispositivo de control (PLC). Se utilizó antenas Yagi, de 10 dB, debido a que este tipo de antenas son más direccionales.

5.2 Descripción del hardware

Los equipos utilizados en los paneles de pozo y del tanque de rebombeo son muy similares, en el caso del tanque de rebombeo, se utilizó sensores ultrasónicos, y menos equipos de potencia.

5.2.1 Controladores lógicos programables

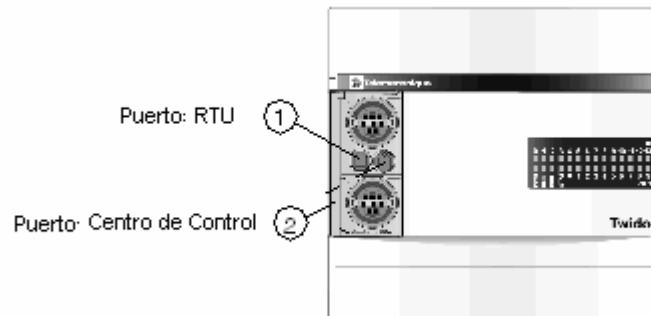


Figura 5.8 Imagen de un TWDDCA24DRF y sus puertos

Lo que a los controladores respecta se utilizan tres, uno por cada panel. Todos son Twido código 24DRF todos de marca Telemecanique. Estos son los encargados de controlar los procesos de monitoreo y control del acueducto del residencial.

Por medio de un protocolo de comunicaciones, los controladores lógicos programable remotos, reportan las lecturas al PLC maestro y envía las consignas de telemando a las remotas. Las remotas tienen una identificación única en la red y cuando el servidor envía una transmisión, todas las remotas “oyen” y solamente aquella para cual va destinada la transmisión responde. Con esta topología de red inalámbrica, la maestra transmite multidireccionalmente y las remotas transmiten unidireccionalmente. Cada lectura o dato que llega a la estación maestra es almacenado en una base de datos.

Características del controlador Twido 24DRF

- 14 entradas digitales y 10 salidas a relé
- puerto serie incorporado
- permite hasta módulos de ampliación
- Memoria de 32 kbytes
- Se alimenta con 110 V CA
- Tiene una fuente de salida de 24V a 0.5^a
- Montaje en Riel Din
- Comunicaciones en RS485 y RS232
- Funciones matemáticas avanzadas – trigonométricas, *PID*, exponencial, punto flotante e instrucción de cómputo.
- Direccionamiento indirecto

- Canal de comunicación para *RS-485* que permite:
- Conexión indirecta con computadora
- Conexión con dispositivos *ASCII*

El PLC descrito anteriormente, requiere de un módulo analógico para poder realizar las lecturas de los distintos dispositivos de señales analógicas.

El módulo utilizado es el *TWDAMM3HT*, el cual brinda dos entradas analógicas, utilizadas en la lectura de sensores de presión y/o nivel, y una salida analógica, que controla la intensidad de trabajo del variador.



Figura 5.9 Imagen del módulo de entradas y salidas analógicas

5.2.2 UPS

El sistema de control y de seguridad cuenta con alimentación interrumpida (desde una *UPS*) para que en caso de falla de energía se mantenga el control y la seguridad. La *UPS* es de marca *SOLA* y con capacidad de 700VA, brinda aproximadamente unos 30 minutos de operación.

5.2.3 Variadores de frecuencia

Para el control de trabajo de los distintas bombas de agua se utilizan variadores de frecuencia Altivar 31 utilizado cuenta con las siguientes características:

- Variador para 480VAC Trifásico
- LCD
- Teclado Digital
- Control estándar con entradas/salidas de 24VCD
- Tarjeta de comunicación *Ethernet/IP*



Figura 5.10 Imagen de un variador de frecuencia

En la figura 5.10 se observa una imagen del variador. La comunicación que se da con los variadores de frecuencia es vía analógica (de 0 a 10V) y cada uno de los distintos variadores son independientes uno del otro. En el caso de ser controlados por el PLC, realizan la lectura del puerto analógico 1, en el caso de estar en modo manual, realiza la lectura en el puerto analógico 2

Este variador se puede comunicar por medio del protocolo modbus, y desplegar distintas fallas. En el proyecto, solo se controla por medio de señales analógicas, ya que cada panel, solo va a controlar un solo módulo. La comunicaron modbus entre variadores es eficiente, cuando se maneja una estructura de master/esclavo.

Las posibles fallas del variador se despliegan en el display, y dentro de la documentación, se especifican las fallas.

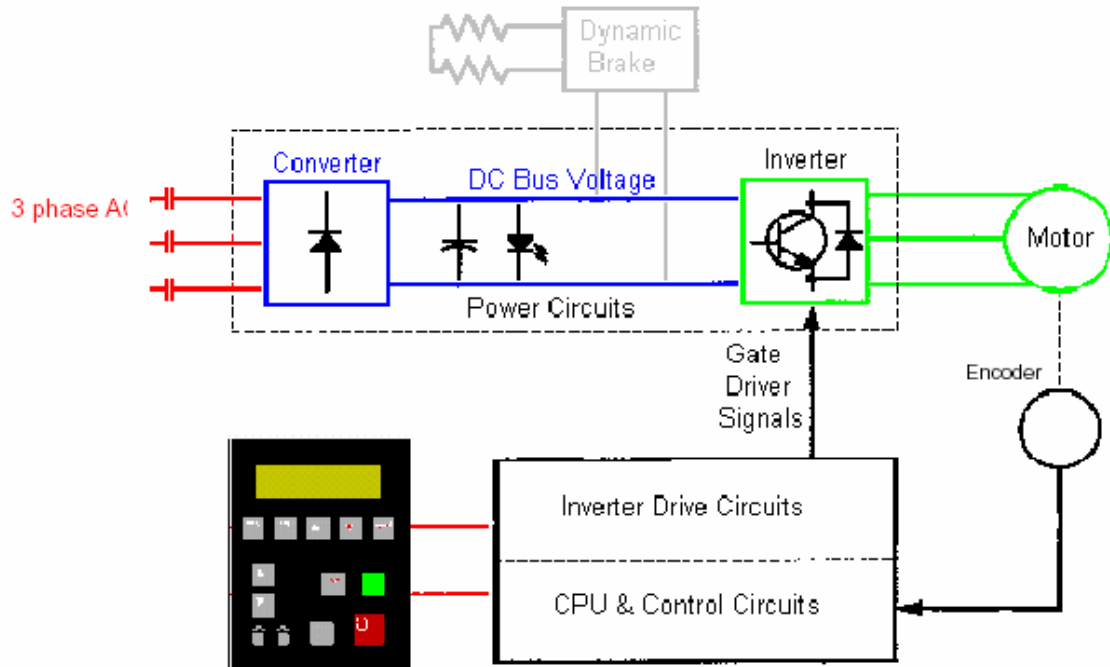


Figura 5.11 Diagrama general del funcionamiento del Variador

En la figura 5.11, se observa el diagrama general de la estructura de un variador. En general el drive realiza el cierre de los contactos que alimenta al motor permitiendo a la energía CA entrar al SCR o al convertidor del diodo.

Esto inicia el proceso de pre-carga. El convertidor del diodo es considerado pasivo, no requiere ningún control adicional después de la precarga. Cuando los circuitos de control del drive detectan un comando de arranque, a través de una palanca de mando, la "HIM" (interfase humano máquina) o cualesquier otro medio, el invertidor se vuelve operacional y el motor gira.

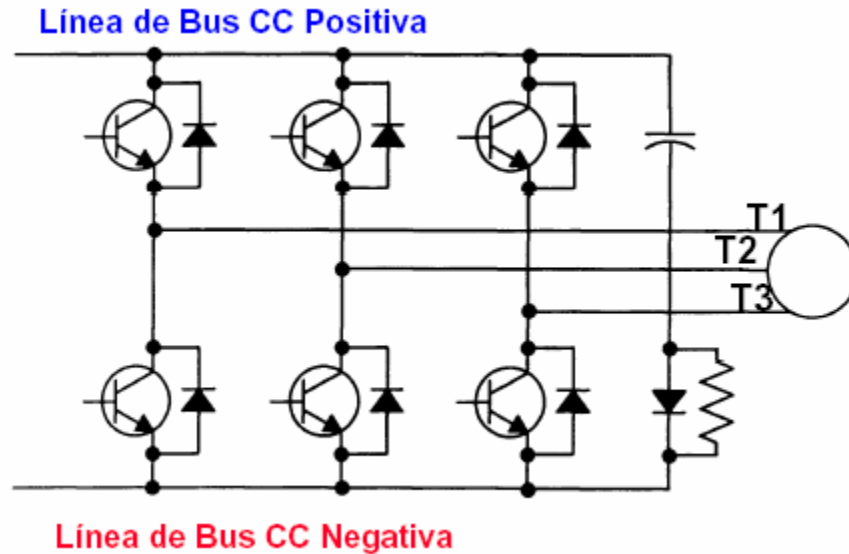


Figura 5.12 Diagrama general de un inversor trifásico

La salida de la tarjeta del manejador de compuerta dentro del drive es conectada a la compuerta (gate) de cada transistor. Cada transistor recibe una señal independiente en la compuerta a diferentes intervalos. El transistor se enciende y “conducen” cuando una señal de desbloqueo es aplicada y se apagan cuando la señal de desbloqueo es removida. En otras palabras, la compuerta del driver enciende y apaga los transistores en un orden específico.

Los transistores dentro del inversor toman un CC relativamente constante “del Bus” y crean una onda PWM “pulse width modulation” (ancho de impulso modulado) que va a cada terminal del motor CA.

ES importante destacar que se percibe un voltaje CC en el motor en las terminales (T1, T2, & T3), pero la onda de corriente se asemeja a una onda tipo seno de CA.

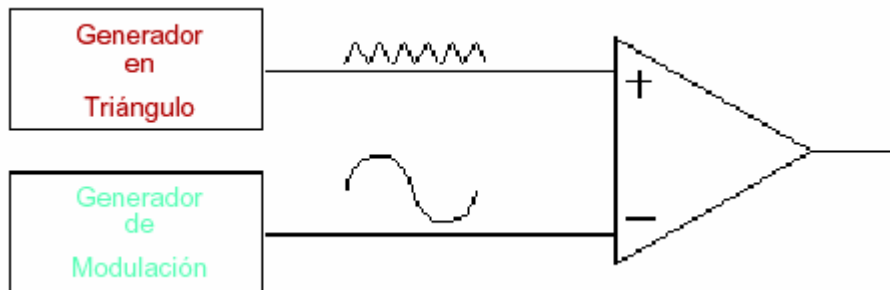
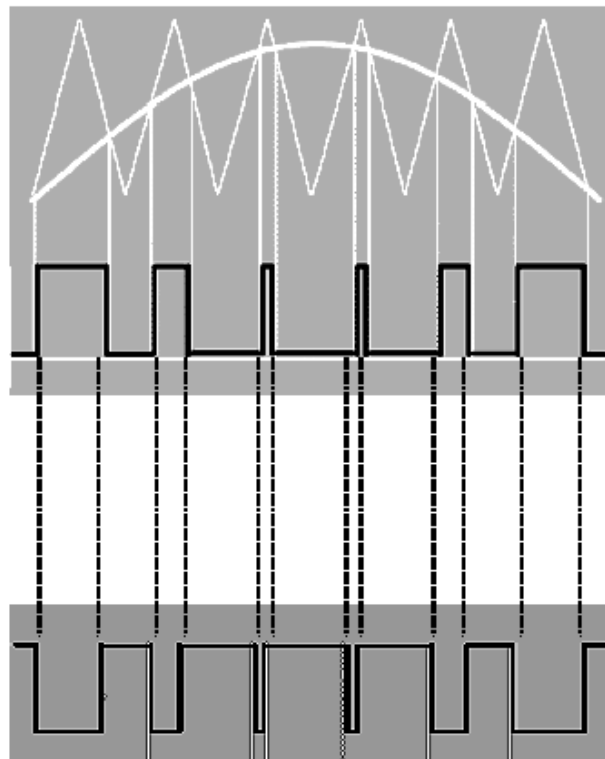


Figura 5.13 Diagrama general del PWM del variador

La señal triangular es la portadora del inversor. El generador de modulación produce una señal de onda de seno que determina el ancho de los pulsos y en consecuencia la salida de voltaje RMS del inversor.

Si aumentamos una porción de esa onda senoidal, veremos que los impulsos de diferentes anchos se forman con base en el “pesaje” de la onda senoidal.

Los impulsos son entonces invertidos y son aplicados a la base del transistor utilizado para disparar o encender los transistores de potencia con objeto de crear la salida PWM real.



Generación de los anchos de pulso dentro de variador

Señal invertida que alimenta la base de los transistores de potencia

Figura 5.14 Señales que perciben los transistores de potencia

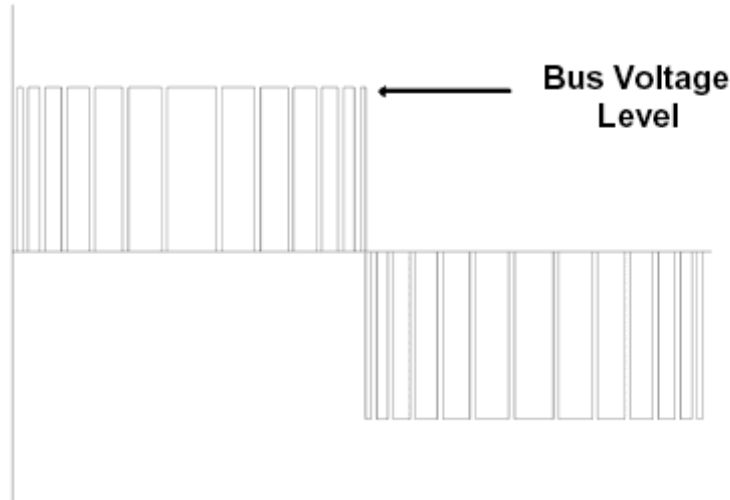


Figura 5.15 Señal de voltaje en la salida del drive (Variador de Frecuencia)

En la Figura 5.15 se describe la salida de voltaje PWM del equivalente de la señal de seno al motor. La frecuencia de la conmutación de positivo a negativo es determinada por el drive basado en la entrada de referencia de velocidad y el RMS o valor de voltaje promedio para esa frecuencia es determinado por el número y ancho de los impulsos. Si se varía o modula el ancho del impulso, varía el voltaje RMS al motor.

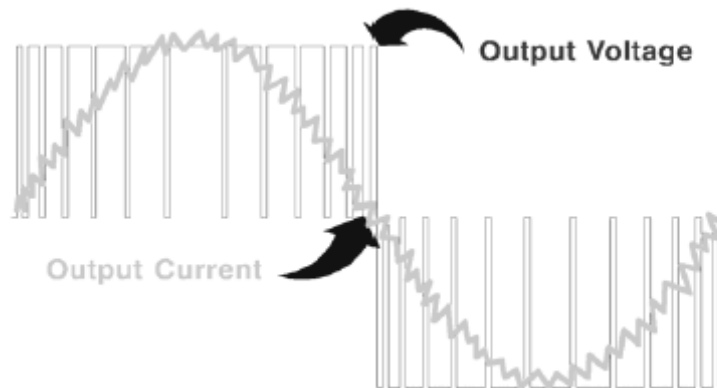


Figura 5.16 Señal de voltaje y corriente en la salida del drive (Variador de Frecuencia)

En la figura 5.16 se representa como el voltaje aplicado a una carga inductiva crea una onda de “corriente” en el motor que es muy cercana a la onda senoidal. Así pues, al modular o cambiar el ancho del voltaje y la frecuencia que aquellos impulsos crean, creamos una muy cercana aproximación a una onda de corriente senoidal. Este comportamiento permite minimizar las armónicas de bajo orden y maximizar la transferencia de energía en la frecuencia fundamental.

Es importante destacar que durante la aceleración, el inversor aplica diferentes frecuencias al motor. También cambia el voltaje pero en proporción directa a la frecuencia. Esto se conoce como voltios constantes por hertz y proporciona un torque constante mientras el motor se acelera. Estos se relacionan a las curvas de torque-velocidad a varias frecuencias, tal como se muestra en la figura 5.17

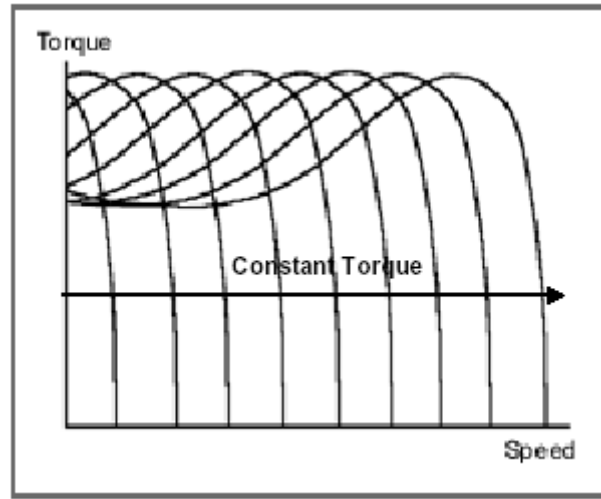


Figura 5.17 Torque vrs Velocidad

Una de las ventajas de los variadores es que permite un arranque suave de los motores, evitando que la corriente de arranque del motor sea mayor que la nominal.

5.2.4 Interfaz de operación

Para la operación del sistema se cuenta con la consola de comando que es el computador industrial con la siguientes características:

- Pentium 4 de 1.2GHz
- 512Mb de SDRAM
- 512kb de memoria caché
- Disco duro de 20Gb
- DVD-ROM 24x
- Floppy 3.5"
- Pantalla táctil de 17"
- Conectividad USBiv, Ethernet, serie, paralelo, PS2 y video
- Sistema operativo Windows 2000
- Diseñada para operación continua en ambientes hostiles

5.2.5 Componentes de protección

Para muchos dispositivos existen medidas de protección para corrientes y voltajes altos como lo son fusibles, disyuntores y apartarrayos. Por otro lado, los motores cuentan con su respectivo contactor y una protección térmica contra altas corrientes que se puedan dar por fallos en los motores.

La alimentación general se encuentra dividida para cada Bomba de agua a fin de independizar su función y mantenimiento.

Apartarrayos

Dentro del diseño implementado se consideró la instalación de un apartarrayos secundario código SDSA 3650.

Este equipo está diseñado para ser instalado en interiores o exteriores y proporcionar protección contra sobrecargas a acometidas eléctricas en tres fases, conectados a tierra de hasta 600V. Brinda un límite de corriente por fase de 40KA, tiene un peso de 0.45Kg y tiene protección térmica.



Figura 5.18 Apartarrayos para equipos trifásicos conectados a tierra

5.2.6 Supresores para la comunicación

En los ambientes industriales o en tramos de largas distancias el ruido eléctrico generado por agentes externos introducen interferencias a las señales de información entre los dispositivos unidos. Por esta razón se implementó supresores de transciendes para comunicación.

El código de este equipo es el UTB-30, el cual es un circuito que permite una protección a los equipos electrónicos sensibles. Disminuyendo la interferencia y las pérdidas.



Figura 5.19 Supresores de transciendes de comunicaciones

Algunas Características de estos módulos son:

- Facilidad en el diseño para el reemplazo
- Montaje en Rail Din
- Protección para sobrevotajes y sobre corrientes
- Suprime frecuencias superiores de 3MHz

Tabla 8 Configuración básica para la comunicación con el equipo de control

	Rangos AC (Vrms)			Rangos DC (Vpk)		
	Rango de supresión	Min	Max	Rangos de supresión	Min	Max
UTB 5	0-3V	0	5	0-5V	0	7
UTB 15	3-10V	3	12	5-15V	5	18
UTB 30	10-21V	10	23	5-30V	15	33
UTB 60	21-42V	21	45	30-60V	30	64
UTB 110	100-120V	42	150	60-120V	60	200
UTB S*, UTB T**						

5.2.7 Componentes de instrumentación

Sensores de nivel por medio de electrodos.

Para la automatización del acueducto, se requirió el uso de sensores de nivel, tal como el Zelio de control de nivel (RM4L). Este dispositivo permite seleccionar funciones de llegado o vaciado por medio de histéresis. Se puede ajustar el potenciómetro de temporización y la sensibilidad del líquido sentido. Este dispositivo utiliza electrodos ubicados dentro de los tanques o pozos.

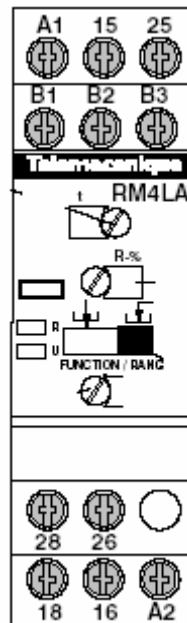


Figura 5.20 Sensor de nivel RM4L

Este dispositivo realiza un control de nivel, por medio de electrodos, utilizando histéresis. Este equipo esta compuesto por tres electrodos. Los cuales tiene el objetivo de indicar el máximo y el mínimo en un tanque o pozo. En la figura 5.20 se muestra un diagrama que representa el método del control de niveles por electrodos.

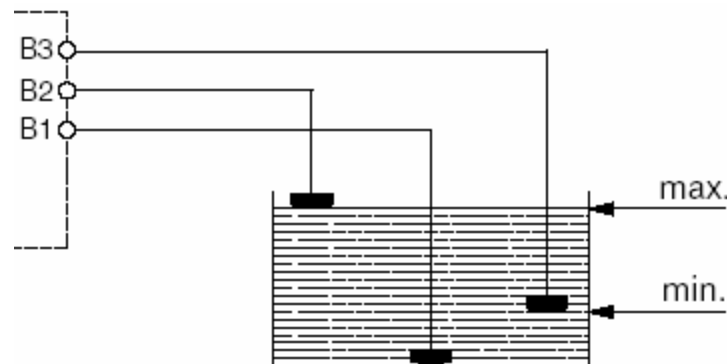


Figura 5.21 Método de Nivel

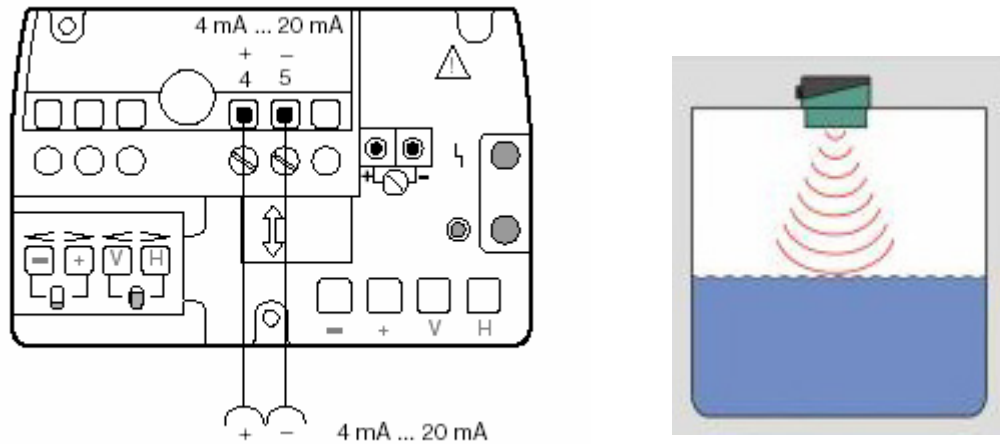


Figura 5.23 Imagen superior del sensor de nivel LUC-T y ubicación en el tanque

5.2.8 Comunicación del PLC con dispositivos inalámbricos

La comunicación entre los PLC, se realiza por medio de sistemas inalámbricos. El dispositivo utilizado es un transmisor de datos inalámbrico de marca FreeWave y el modelo es el DGR-115W. Este dispositivo trabaja a 900 MHz y 928 MHz.

Los enlaces de radio módem están formados por el radio-módem, el panel y la antena, constituyen el canal físico por donde se trasiega la información. Mediante transmisión inalámbrica se lleva a cabo el intercambio de datos. La transmisión inalámbrica consiste en equipos que convierten los datos en señal de radio que viaja a alta velocidad por el aire.

Son programables y se comunican al PLC por medio del puerto Serie y usando el protocolo modbus. Son transparentes en el proceso, es decir, no tiene interferencia en los protocolos utilizados ni en el sistema de red de comunicación establecido.

Esta programado para transmitir datos a un ancho de banda de 19200 Bits, datos de 8 bits, sin paridad, con un bit de Stop, con un check de paridad off. Pueden trabajar a una distancia de 51 millas a línea vista.

5.3 Descripción del software

Para el desarrollo del proyecto se recurrió a varios paquetes de *Schneider*, y de *telemecanique*. La cual es la compañía que desarrolla el software utilizado por dispositivos de marca Twido, Vijeo Look.

5.3.1 *TwidoSoft*

Este software fue utilizado para crear el código escalera de los *PLC*'s. En este se debe realizar toda la configuración pertinente en cuanto a la definición de qué *PLC* es, sus puertos de comunicación, archivos de programa, archivos de datos (estos pueden ser binarios, palabras, strings, timers, etc.). También se puede encontrar un detalle de las entradas, salidas, status del *PLC* y otra serie de datos. La forma de ejecución del código fuente es secuencial en forma cíclica por lo que se estructura el mismo en varios módulos por facilidad de entendimiento según la tarea.

El *PLC* tiene la función de verificar las condiciones y establecer todas las señales de control de los motores y generadores. Establece los valores iniciales en los distintos dispositivos e inicia las condiciones del dispositivo a encender, en los distintos puntos.

Al programa también se le deben configurar los módulos que tiene instalados el *PLC*. Es posible conectarse con el *PLC* y ver en tiempo real la ejecución del código, para ello es requisito que se esté ejecutando el Drive de modbus ya que se encarga del manejo de la información. En el programa del *TwidoSoft*, si bien hay que definir los puertos de comunicación del *PLC* también hay que definir el controlador de software por el cual se realiza la conexión con el *PLC*.

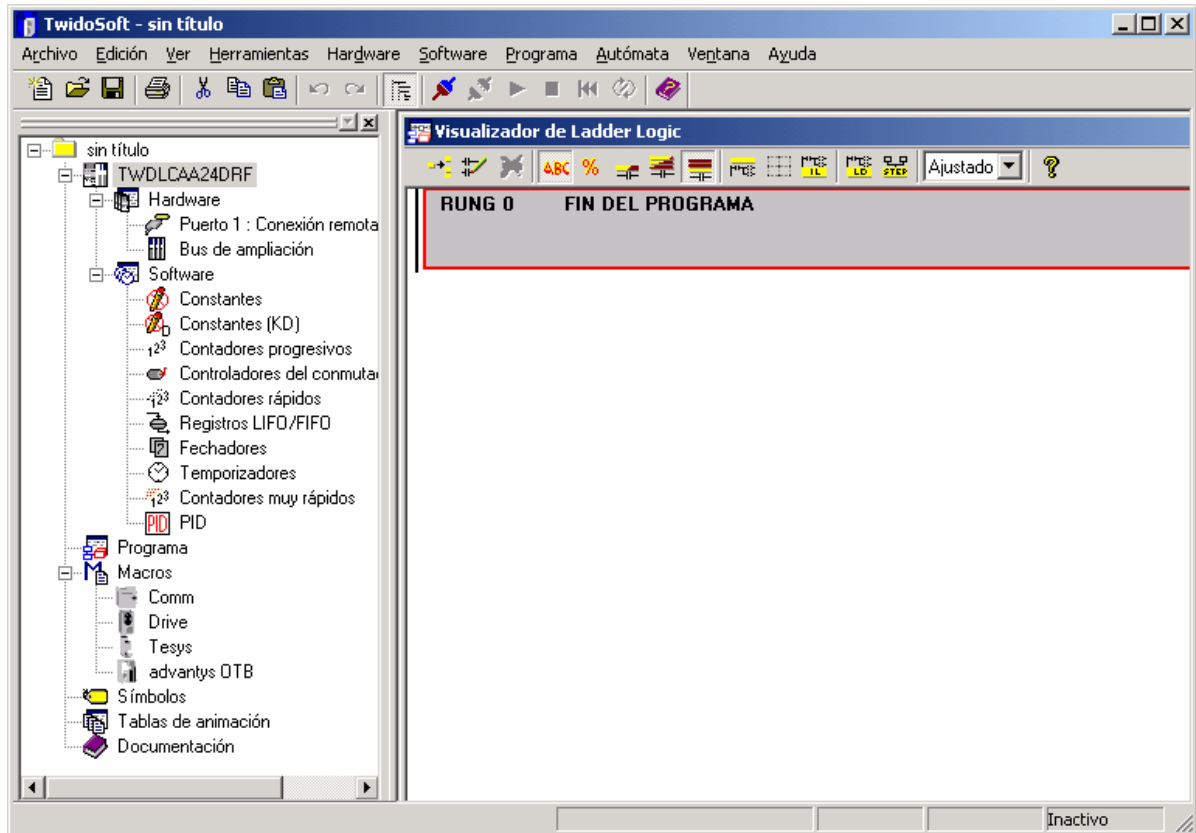


Figura 5.24 Muestra del ambiente del TwidoSoft

Este software implementado se basó en la programación en escalera, con la versión del TwidoSoft V3.

Programación en escalera

El código que se generó con *TwidoSoft* se divide en las principales tareas que son requeridas para manejar todos los procesos del sistema en general, dentro del programa se realizó bloques específicos que permiten el control de los motores y cálculo de las variables de salida, así mismo como la transmisión de datos al sistema SCADA, y la verificación de la comunicación de sistema inalámbrico.

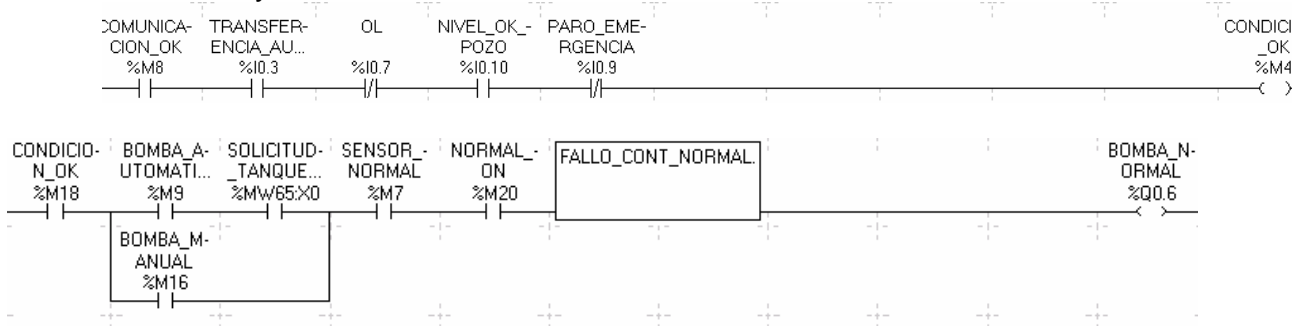


Figura 5.25 Muestra de un bloque en TwidoSoft

Por medio del programa escalera se pueden generar bloques de código que se encargan de tomar las variables del ambiente SCADA y relacionarlas con las variables de trabajo del TwidoSoft. Estas variables denominadas tags tienen asignadas diferentes posiciones de memoria y son las mismas tanto en el Vijeo Look como en el PLC. Es importante destacar que las variables que se transmiten al sistema SCADA, tienen que ser palabras (16 bits), estos son conocidos como tags, y pueden ser datos bidireccionales.

Los bloques de memoria de los motores tienen una estructura distribuida en palabras, un motor por palabra. En el caso de los datos de los motores utilizados en el Vijeo Look se maneja en una palabra por motor. En esta estructura se manejan las condiciones ok, modo manual / automático, condiciones para automático, modo automático activado, modo manual activo, paro Emergencia, Estado del generador, confirmación, errores, alarmas y selección de man/auto del panel.

El programa ofrece la posibilidad de generar salidas analógicas con cálculos y métodos de PID.



Figura 5.26 Diagrama de activación de un sistema PID

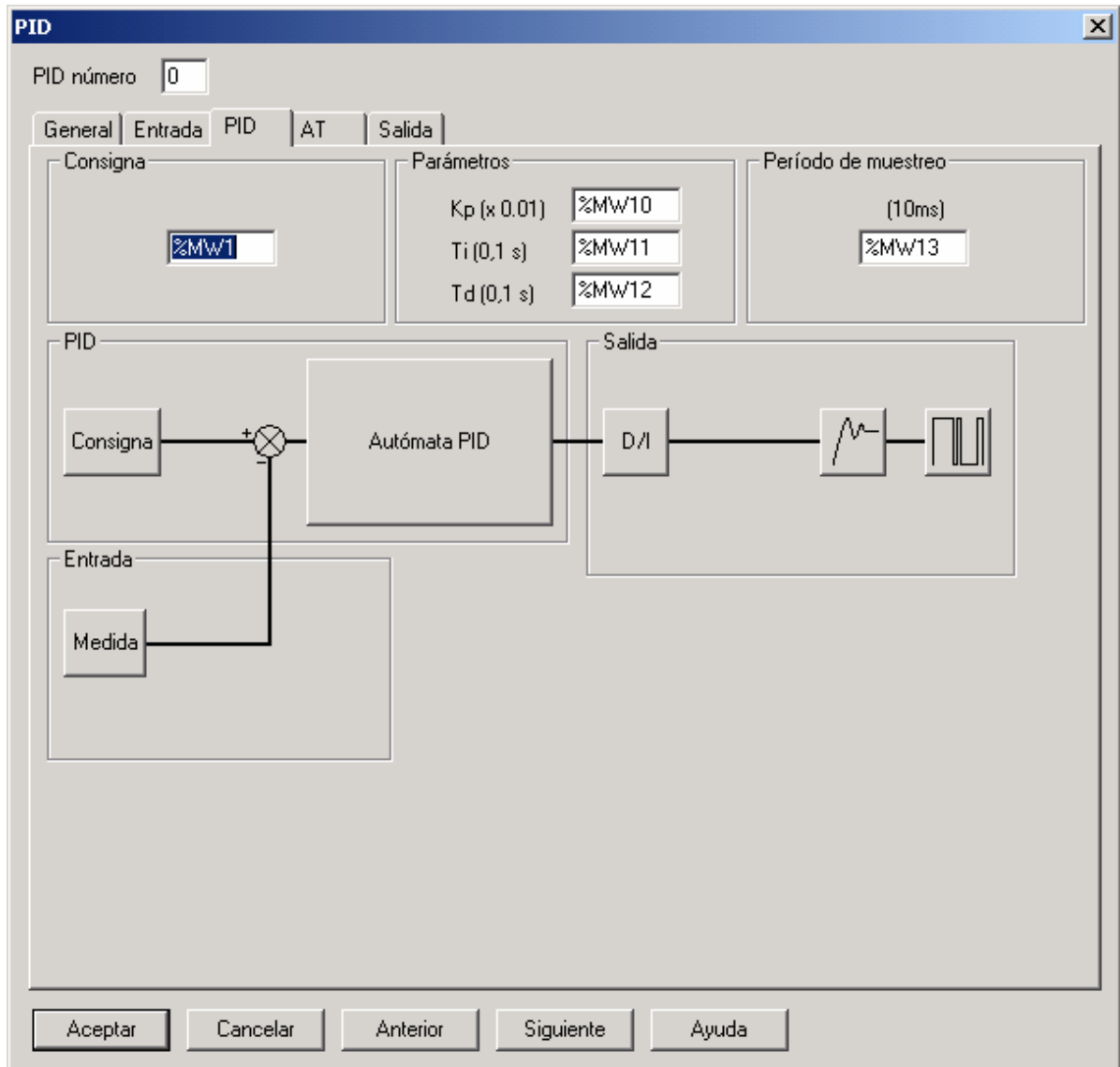


Figura 5.27 Configuración de PID en programa twidosoft

En la figura 5.26, se muestra un bloque de activación de la bomba de agua del pozo. Esta señal de salida, permite la activación de un contactor, el cual enciende un variador de frecuencia.

En la figura 5.27 se muestra una pantalla, en la cual se varían los valores de PID del sistema. Los valores calculados por el PID, son transmitidos por medio de una señal de 0 a 10V, al variador de frecuencia, el cual controla el trabajo de la bomba de agua. Los valores se establecen en el SCADA, y quedan almacenados. Las magnitudes de estas variables se observan en el capítulo 6 (análisis de resultados)

Dentro del programa se estableció un protocolo de comunicación en el cual si existe pérdida de comunicación por un periodo de 10 segundos los dispositivos tienen que indicar la falla y apagar los distintos dispositivos de potencia.

Con respecto a las señales analógicas que se reciben en los módulos de entradas de 4-20mA, estas son escaladas por el mismo dispositivo de control. La resolución que tienen estas señales es de 16 bits, por ello que se debe tomar este valor y escalarlo al rango de medición que representa en sus unidades respectivas. Para realizar esta operación se programa los módulos analógicos y se indican los rangos equivalentes.

Los escalamientos de señales analógicas se aplican en los sensores de presión, caudal, y el de nivel (el sensor ultrasónico). Dichas estradas se convierten a un rango de salida que puede almacenarse en una dirección de memoria.

Se tiene que destacar que los paneles distribuidos en el residencial, tienen que mantener un control adecuado del acueducto del residencial. Para lograr este fin, se realizó el diseño de manera que permita acoplar sistema de respaldo tal como los generadores.

El diseño de los paneles, permite sensor si existe energía en la comitada principal, y en la comitada de emergencia. En caso de ser necesario realizar una transferencia, el sistema realiza el procedimiento correspondiente, tanto para la transferencia como para la retransferencia.

Los tiempos de arranque y apagado del sistema de emergencia, son controlados por los operadores. También pueden ser monitoreados por medio del sistema SCADA.

5.3.2 Vijeo Look

En esencia, el propósito del Sistema de Control y Monitoreo Remoto SCADA consiste en recolectar y almacenar los parámetros operativos, distribuir esta información a los encargados y gerentes, para facilitar la toma de decisiones operativas, gerenciales, de mantenimiento y de desarrollo, así como permitir la variación de los parámetros operativos por telecomando para optimizar el uso de los recursos y brindar el mejor servicio posible.

El sistema de Control y Operación del acueducto de Cerro Colón se manejan dos estaciones remotas (RTU) y una estación maestra, en las cuales se transmiten datos sobre nivel, caudal, presión, parámetros eléctricos y se envían telecomandos a las válvulas y bombas.

En el sistema SCADA inalámbrico, como es este caso en particular, cada una de las estaciones remotas se comunican mediante radio-módem a 928 Mhz.

con la estación maestra, ubicada a 1.5 kilómetros de distancia de las RTU. Por medio del protocolo modbus.

El sistema SCADA está conformado por unidades, terminales remotas y la estación maestra. Las cuales fueron descritas anteriormente.

El software del sistema de Vijeo Look se compone de la base de datos y el programa de interfaz con el operador u usuarios. Los datos históricos del sistema se almacenan en la misma computadora donde opera el programa de adquisición de datos en una base de datos en Excel, transfiriendo a su vez la información a dos computadores con la Interfaz de Operador (HMI).

El programa de interfaz con el operador se utiliza constantemente por el operador de bombeo y por el operador del Centro de Control. Puede utilizarse desde otras computadoras simultáneamente.

Con este programa el Operador del Centro de control puede visualizar los parámetros de interés. Al accionar el acceso a la sección de Tanques se muestra la ventana principal de la sección de tanques. En los indicadores de los tanques se muestran los niveles varios tanques del sistema de distribución. Haciendo uso de varios colores esta ventana informa al operador sobre el estado del tanque, por ejemplo si existe una falla de comunicaciones se muestra el espacio del nivel con un fondo color negro. Si el tanque está críticamente lleno o críticamente vacío, el mismo espacio se muestra con fondo rojo. Si el nivel es moderadamente bajo o moderadamente alto el fondo es amarillo y finalmente si el nivel es normal el fondo es verde. A partir de esta ventana se puede acceder a la información detallada e histórica del comportamiento de cada tanque al presionar sobre el nombre del mismo.

Con este programa se desarrolló la interfaz gráfica con la que interactúa el operador con el proceso de control del acueducto. Este programa sirve para crear ambientes SCADA.

Es importante destacar que los sistemas SCADA, usan como base de comunicación un estándar conocido como OPC. El bus OPC (OLE for Process Control) es un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos. La función de la comunicación OPC es facilitar la gestión de proceso de los datos productivos en los sistemas SCADA y DCS.

Este estándar permite que diferentes fuentes de datos envíen datos a un mismo servidor OPC, al que a su vez podrán conectarse diferentes programas compatibles con dicho estándar. De este modo se elimina la necesidad de que todos los programas cuenten con drivers para dialogar con múltiples fuentes de datos, basta que tengan un driver OPC.

Por medio del uso de este protocolo, se evita el uso de controladores o drivers independientes. Esto impide la duplicación de esfuerzos ya que todos los

programas usarían un único driver para un determinado hardware, facilitando los ajustes a nivel de software causadas por los cambios de hardware. Otra de las ventajas es que disminuye los Conflictos de acceso.

El OPC proporciona un mecanismo para extraer datos de una fuente y comunicarlos a cualquier aplicación cliente de manera estándar. Los fabricantes de hardware pueden desarrollar servidores optimizados para recoger datos de sus dispositivos. Dando al servidor un interfase OPC permite a cualquier cliente acceder a dichos dispositivos.

El programa SCADA (*Vijeo Look*) toma las comunicaciones a través del OPC y las manipula para desplegar, comandar o modificar datos desde un ambiente amigable y con gran flexibilidad de opciones, facilitando que el operador pueda monitorear y control comandos dentro del conjunto de PLC.

Dentro de este Software, se debe especificar el nodo de red (*PLC*) con el que se está trabajando y una serie de tags (Etiquetas) que vienen a representar datos de memoria del mismo nodo.

El ambiente SCADA que se desarrolla tiene gran versatilidad en el despliegue de información. Se puede crear una cantidad indefinida de pantallas que muestren datos en diferentes formatos desde la forma numérica convencional hasta histogramas. Es posible generar bases de datos desde el *Vijeo Look* con la información obtenida en los diferentes PLC, conectados al OPC. Igualmente soporta la creación de rutinas en *VisualBasic* y otra serie de opciones que le facilitan la generación de reportes.

En este programa se pueden manejar opciones como servidores de *OPC/DDE*, estado de las comunicaciones, registro de datos, manejo de tags derivados con que se pueden calcular expresiones, detección de eventos, manejo de macros, y control de pantallas de acción. Igualmente se pueden controlar niveles de seguridad mediante el manejo de usuarios, así como recetas de datos que puedan ser bajadas o extraídas del controlador.

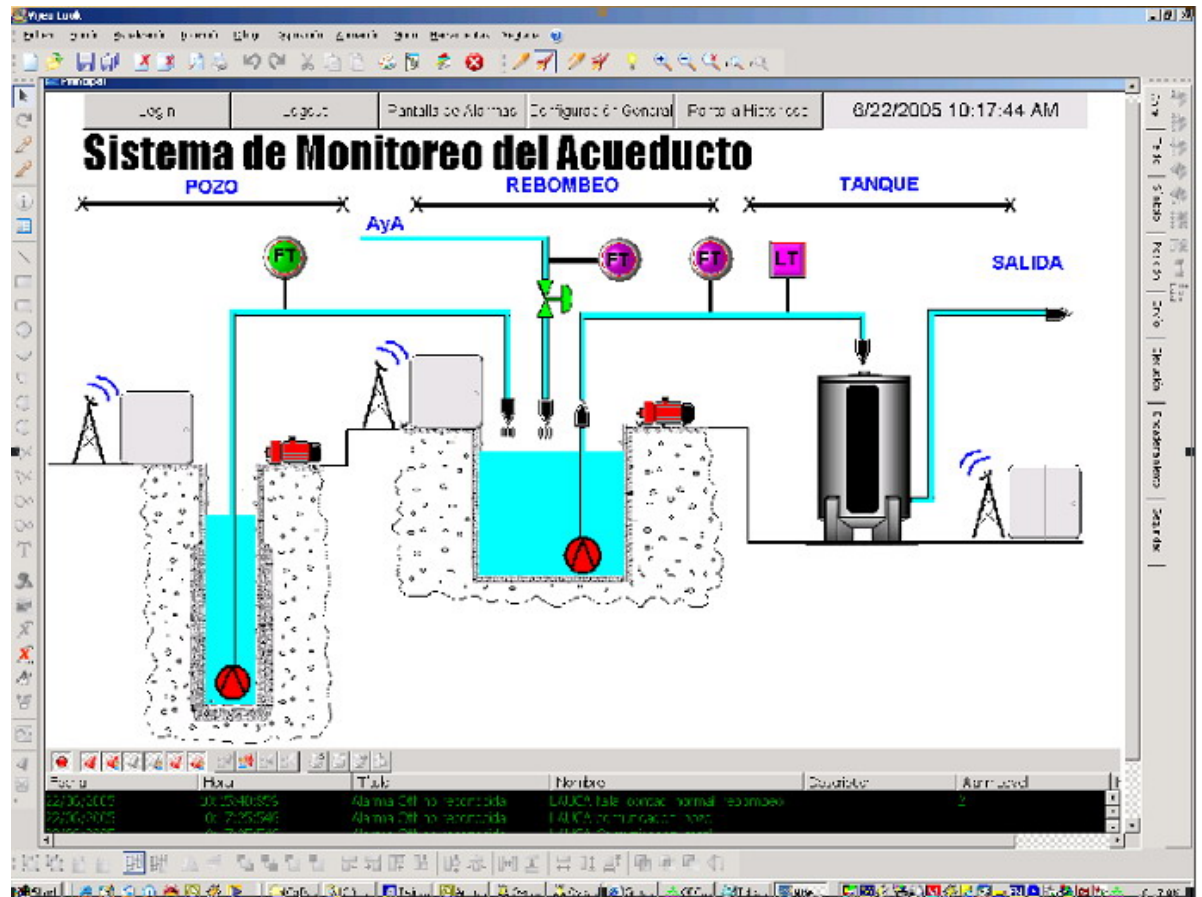


Figura 5.28 Muestra del ambiente del Vijeo Look

En la figura 5.28 se muestra una de las pantallas del sistema donde se observan algunos botones para realizar acciones así como despliegue de estado de alarmas del sistema. También se observa el menú de proyecto para la creación de la interfaz.

En el ambiente que se creó en el Vijeo Look se puede realizar una serie de tareas. La pantalla de inicio (figura 5.28) es la que corresponde al panel de Control Principal.

Desde esa pantalla se puede monitorear el modo de operación de cada uno de las bombas. Todas las pantallas, desde éste se pueden realizar la mayoría de los accesos a otras pantallas o acciones para comandar las distintas bombas. En las figuras se muestran las diferentes acciones que se pueden tomar. Entre ellas destacan: vista general de los motores, de los generadores, flujos y niveles de agua en cada uno de los puntos.

Dentro de las funciones del SCADA se encuentra indicar las fallas de sus correspondientes equipos. El PLC transmite las alarmas al sistema Scada. El

programa SCADA, indica al operador la falla presentada, le indica de manera gráfica y textual. Y genera un registro de falla.

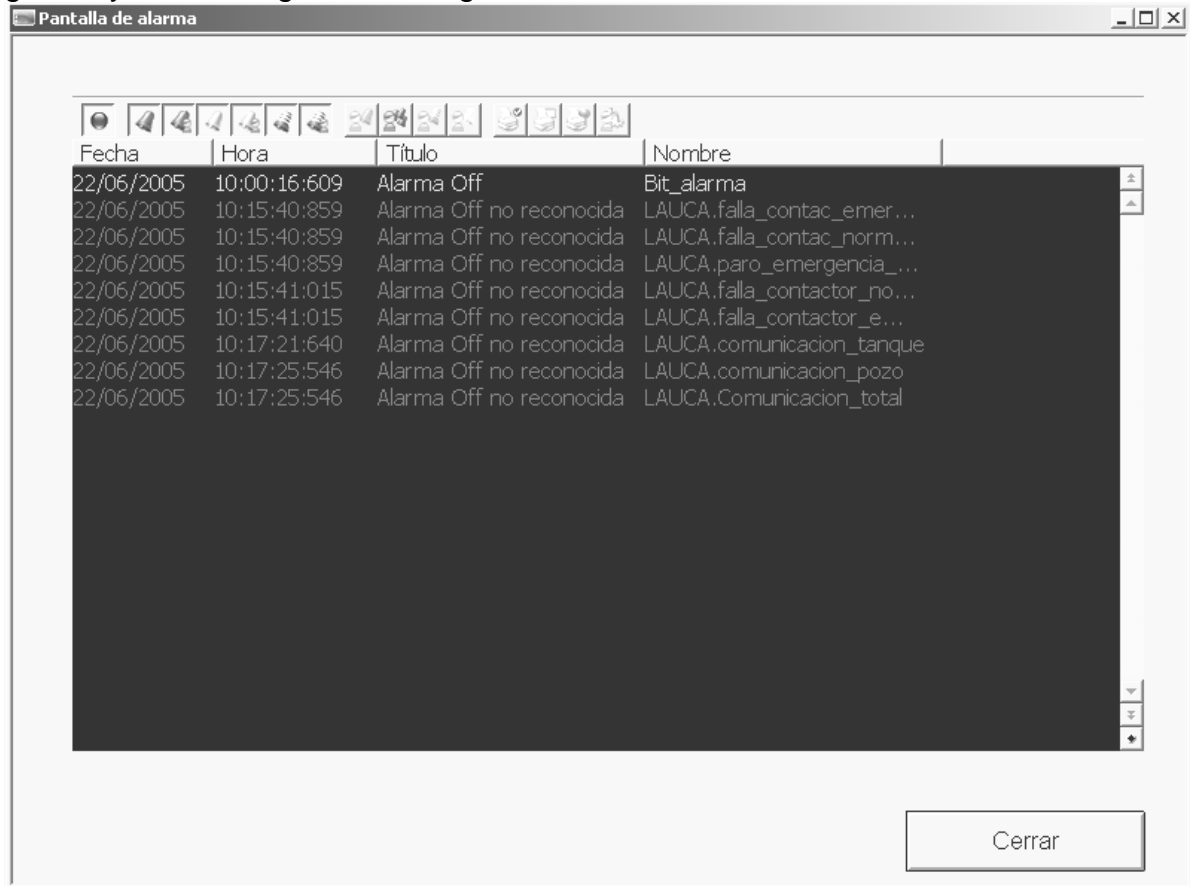


Figura 5.29 Pantalla de SCADA que despliega las fallas del sistema

Por medio de la programación de las pantallas del Scada Vijeo Look se procedió a configurar y monitorear las distintas terminales en cuanto a los puertos de comunicación, niveles de usuarios, alarmas y tags. Una vez realizada esta configuración inicial se comienza a generar las pantallas con las lecturas y comandos a realizar.

En la pantalla de alarmas (figura 5.29) se pueden ver las alarmas que se encuentran activas y las que han sido silenciadas o reconocidas.

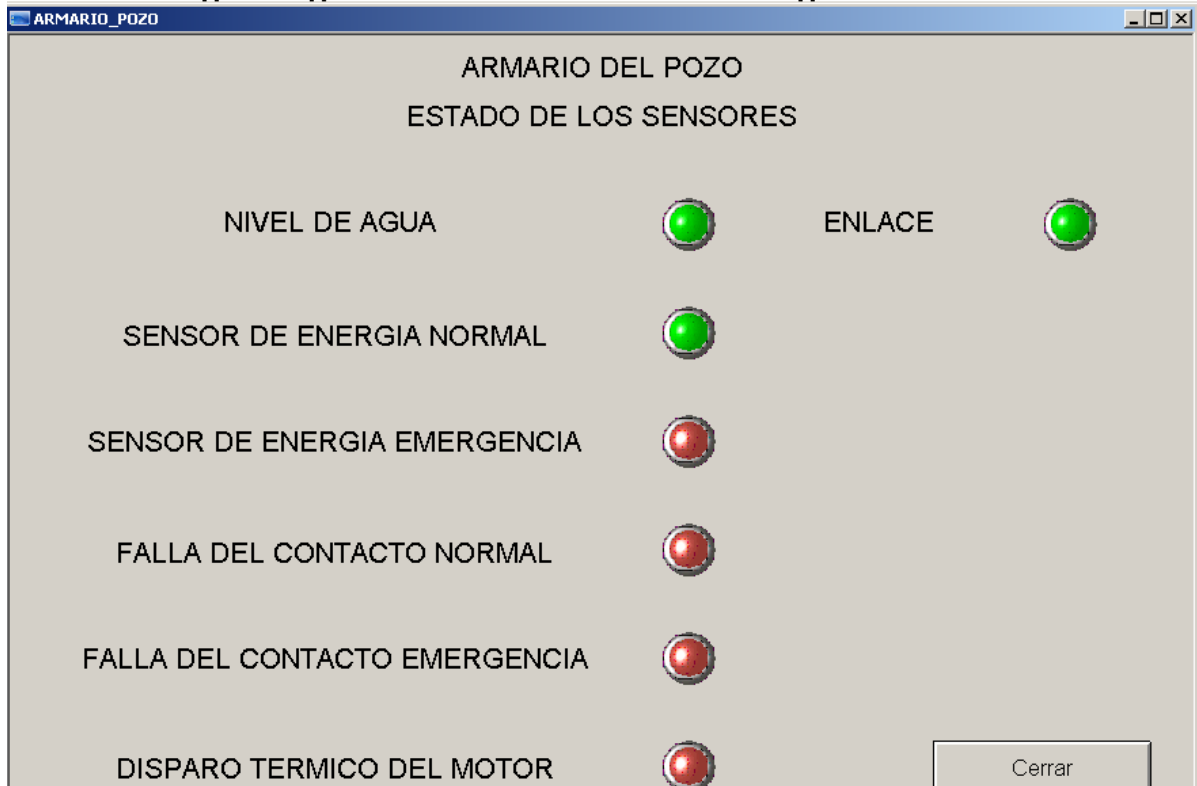


Figura 5.30 Pantalla de SCADA que despliega estado de los sensores

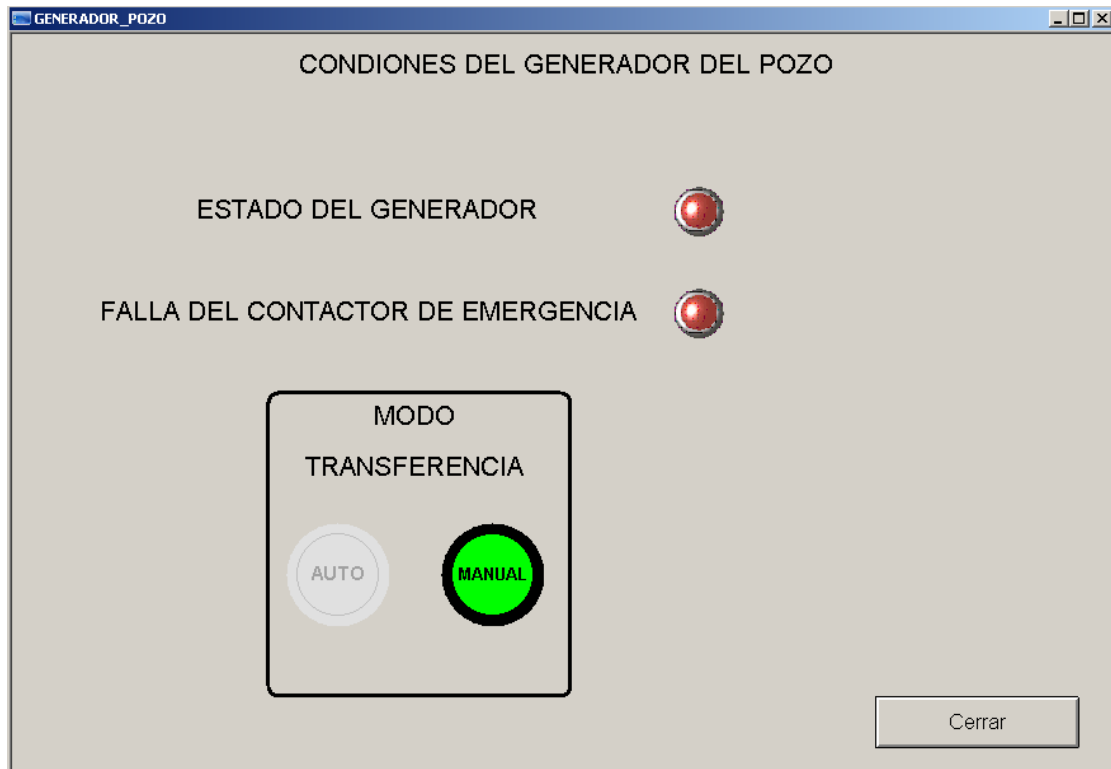


Figura 5.31 Pantalla de SCADA que despliega estado de los generadores

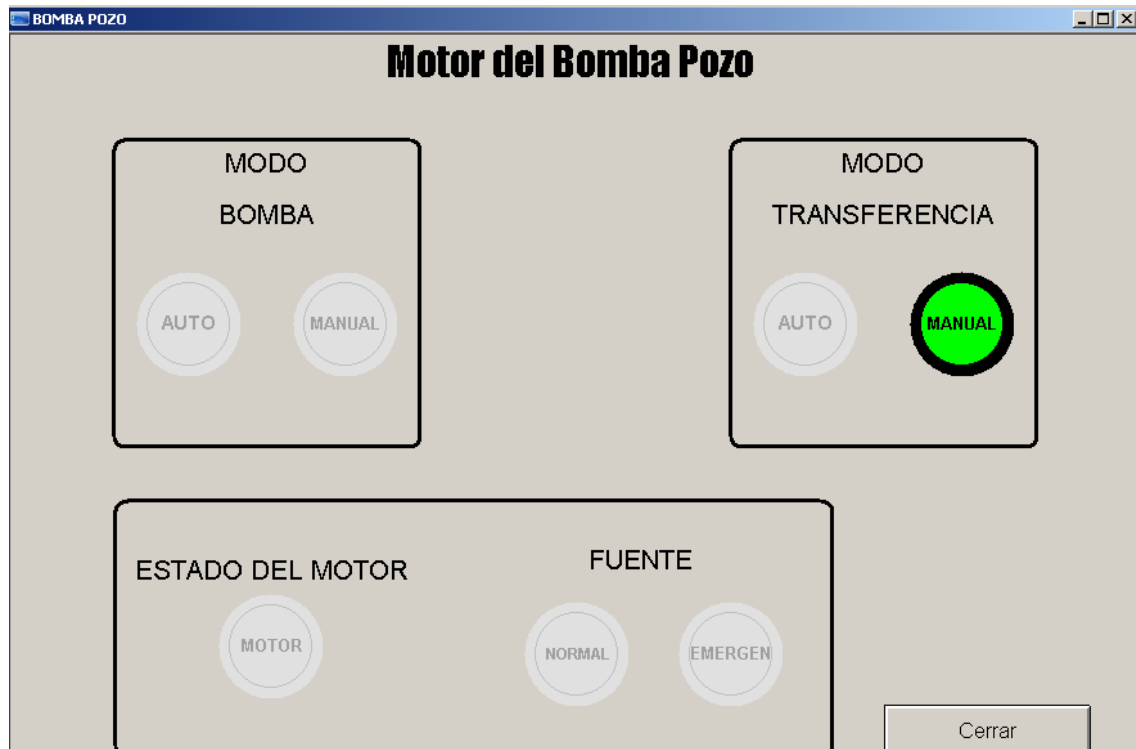


Figura 5.32 Pantalla de SCADA que despliega estado de los motores

En la figuras 5.30, 5.31 y 5.32 se ejemplifican algunas de las diferentes pantallas de programa de SCADA, en dichas pantallas se muestran los estados de los distintos sensores del panel de pozo, el estado del generador, y las características del motor correspondientemente.

En las distintas pantallas se pueden realizar cambios de parámetros, pero tiene que ser el administrador del sistema SCADA. Los demás usuarios solo tiene la opción de monitorear el sistema.

5.3.3 Programación de los variadores de frecuencia

Los variadores se pueden configurar de manera manual o por medio de una herramienta de software.

PowerSuite es una herramienta de ayuda para la configuración y la supervisión de equipos de control de motores eléctricos, permitiendo descargar al Variador o a la PC, las diversas disposiciones del programa, también muestra los parámetros de comunicación asociados.

Proporciona acceso a un conjunto de acciones que permiten editar o transferir configuraciones y conectarse a los equipos, y brinda un ambiente de navegación asocia a cada tipo de equipo una interfaz de configuración que permite controlarlo, ajustarlo y supervisarlos.

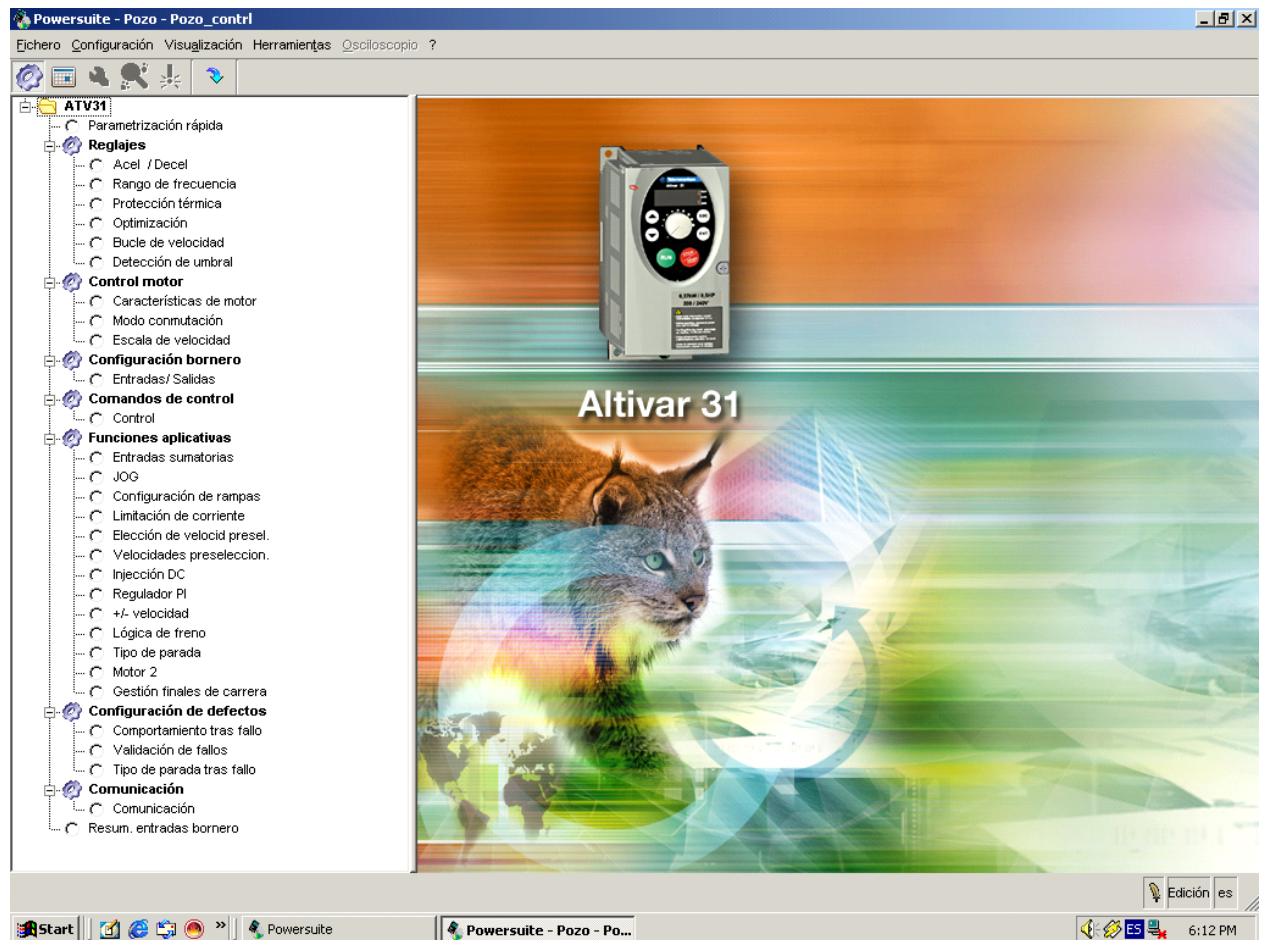


Figura 5.33 Muestra del ambiente el programa para configurar variadores

Capítulo 6: Análisis de Resultado

6.1 Resultados:

6.1.1 Pozo

Las secuencias de arranque, paro y regulación de cada bomba de agua, así como las acciones ante perturbaciones, se detallan en las figuras que se muestran a continuación.

ESQUEMA DEL POZO

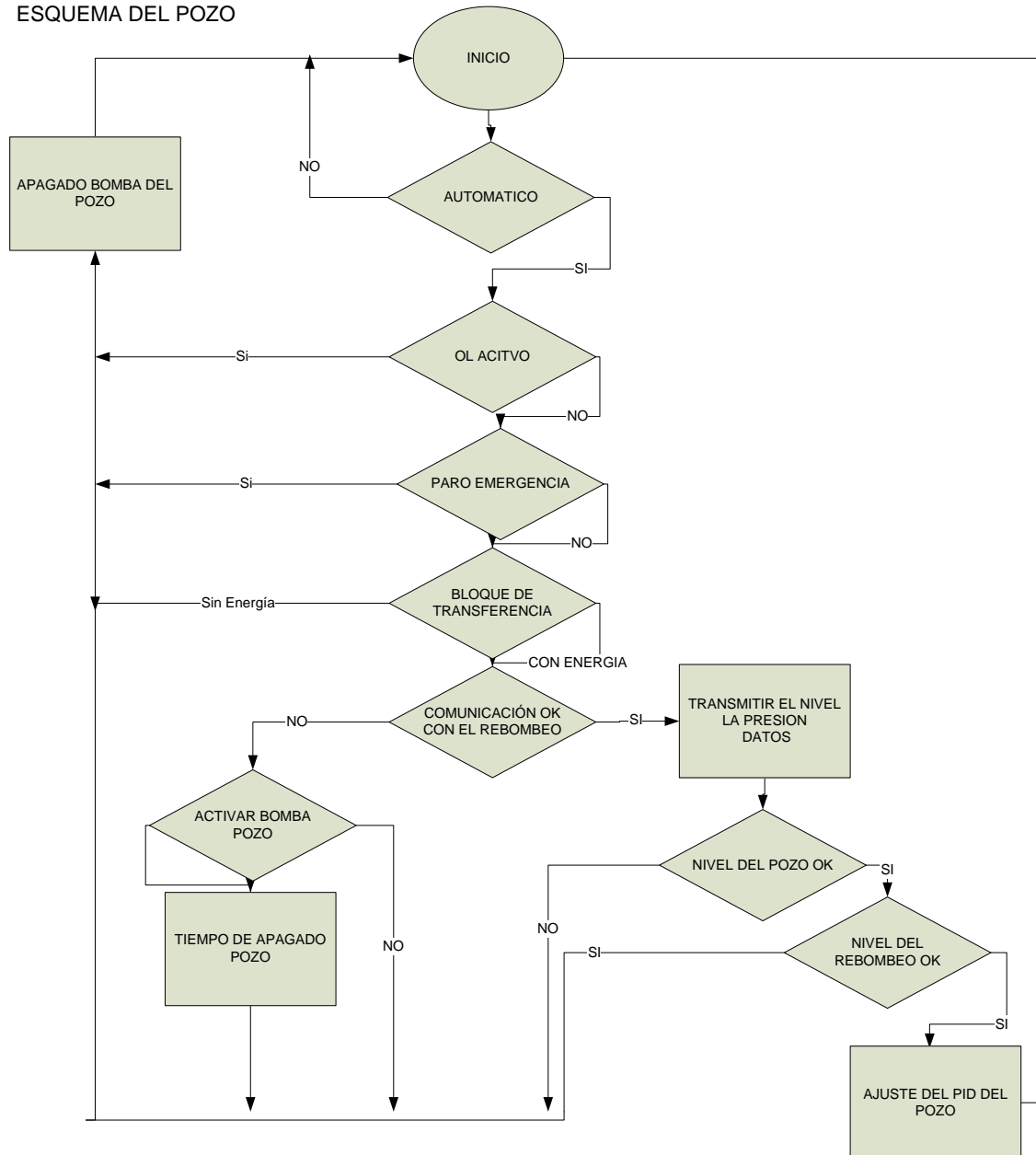


Figura 6.1 Diagrama de flujo para el panel del pozo

Tabla 9 Señales utilizadas para en control del pozo

Señal	Descripción
Sensor flujo	Entrada del sensor de flujo
Señal de activación del variador en automático	Salida que indica al variador estar en automático
Transferencia auto	Entrada del modo de transferencia en automático
Sensor normal	Entrada que indica energía de la cometida del ice
Sensor emergencia	Entrada que indica energía de la cometida del generador
Bomba automático	Entrada que indica que la bomba de agua esta en automático
OL	Entrada que indica el disparo térmico
Confirmación normal	Entrada que brinda la verificación del contactor
Paro emergencia	Salida que de indicación de emergencia
Nivel ok pozo	Salida que de nivel normal de pozo
Bomba manual	Entrada que indica activación de la bomba en manual
Confirmación emergencia	Entrada que brinda verificación del contactor generador
Sensor de presión	Entrada analógica de presión
Sensor de nivel	Entrada analógica de nivel
Salida al variador	Salida analógica
Puerto	Comunicación con el tanque de rebombeo
Falla en el variador	Señal que indica falla en el variador

En la tabla 9, se indican las distintas señales utilizadas para el control de panel del pozo. Por medio de estas señales se realiza el control de los distintos dispositivos, así como el comportamiento de la bomba del pozo.

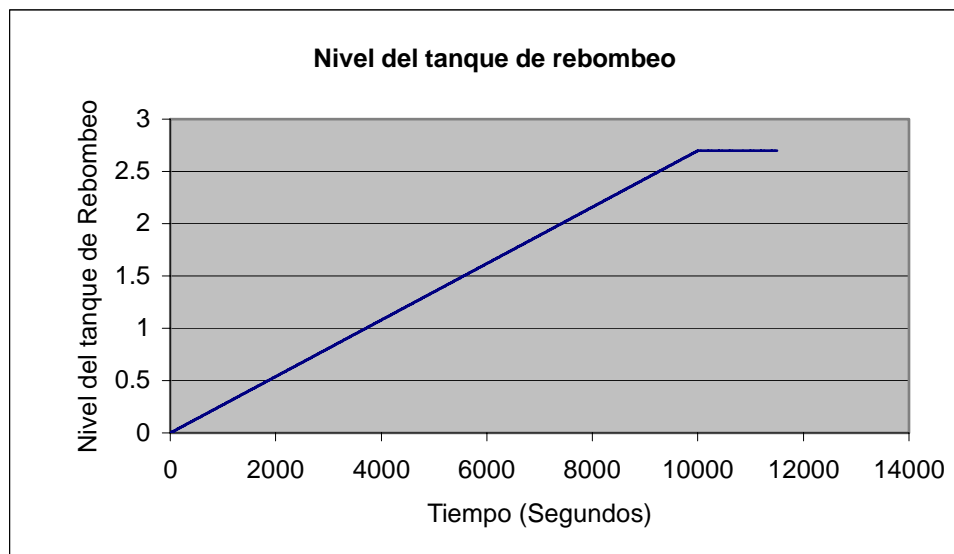


Figura 6.2 Comportamiento del llenado del tanque de rebombeo.

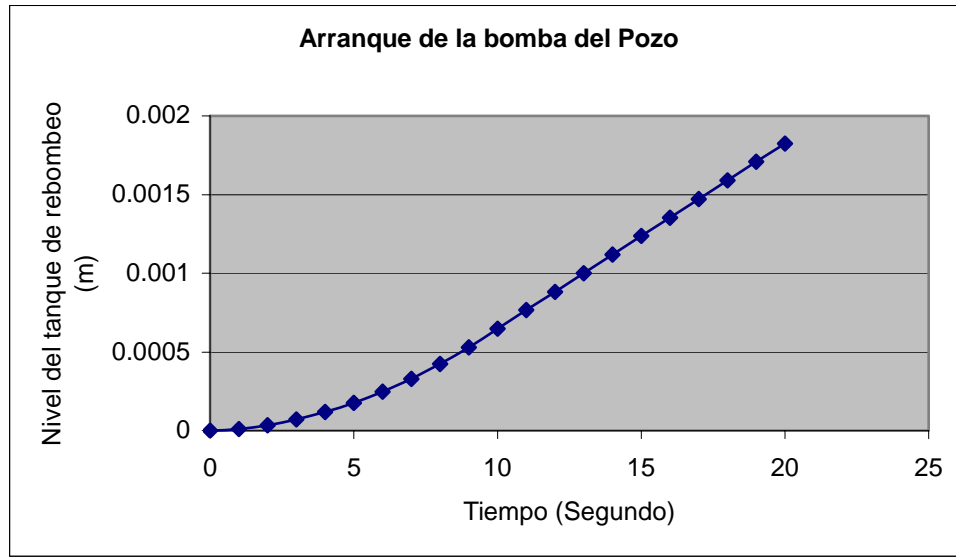


Figura 6.3 Arranque de la bomba del pozo.

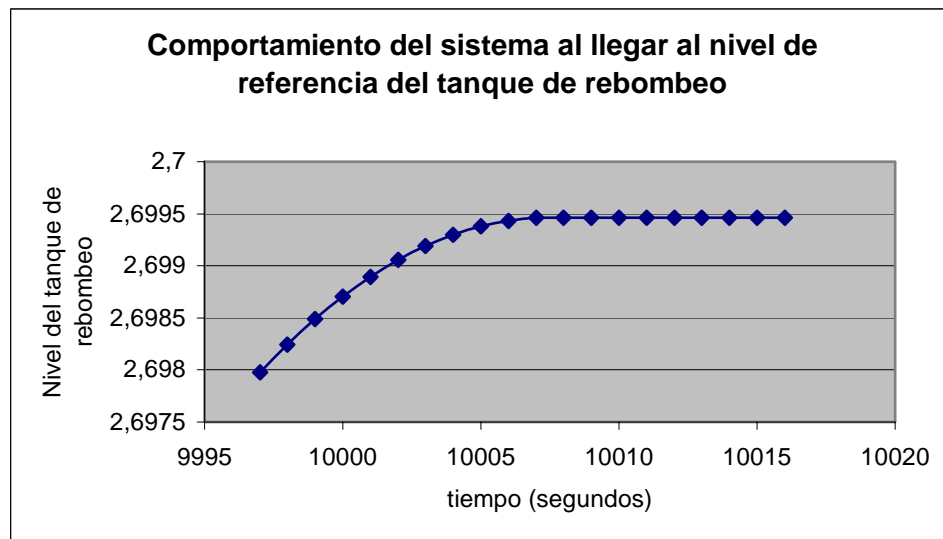


Figura 6.4 Comportamiento del nivel al llegar a la referencia.

En la figura 6.2 muestra el nivel del tanque de bombeo al general una señal de escalón en la bomba del pozo. Se observa que el nivel del tanque de bombeo se estabiliza a los 2.7 metros de altura. Debido a que a esta altura, se aproxima al límite máximo del tanque del pozo, y se tiene capacidad en el tanque de $20m^3$ aproximadamente.

Por medio del variador de frecuencia se estableció un arranque suave en el motor (ver la figura 6.3), durante los primeros 10 segundos. Con el objetivo de aumentar la vida útil de la bomba del pozo, disminuir la corriente de arranque del

motor. Se tiene que tomar en cuenta que los arranques de los motores a plena carga desgastan las escobillas del estator del motor (cuando se utilicen motores que las empleen), y la corriente consumida por el motor es de aproximadamente seis veces la corriente nominal. Por medio del variador de frecuencia se incrementa la vida útil pues el motor no sufre un estrés tan severo. Se eligió un tiempo de 10 segundos, ya que es un tiempo suficiente, en el cual la bomba de agua ingresa el líquido al sistema, sin acusar un golpe de presión considerable en el sistema de tuberías.

Se observa en la figura 6.4 el comportamiento del nivel del tanque de rebombeo, en los instantes en que el valor de referencia se aproxima al nivel de referencia. La bomba reduce su trabajo con el objetivo de aproximarse al valor de referencia. El tiempo aproximado en que el variador de frecuencia disminuye su intensidad de trabajo es de aproximadamente de 10 segundos.

Los niveles mostrados en las figuras 6.2,6.3 y 6.4 son transmitidos del tanque de rebombeo al panel ubicado en el pozo, para que este último realice los cálculos correspondientes y compensar el sistema de manera que se mantenga un nivel de constante en el tanque de rebombeo.

6.1.2 Tanque de Rebombeo

Las secuencias de lectura de los sensores y dispositivos del panel de rebombeo, así como las condiciones de estabilidad se detallan en las figuras que se muestran a continuación.

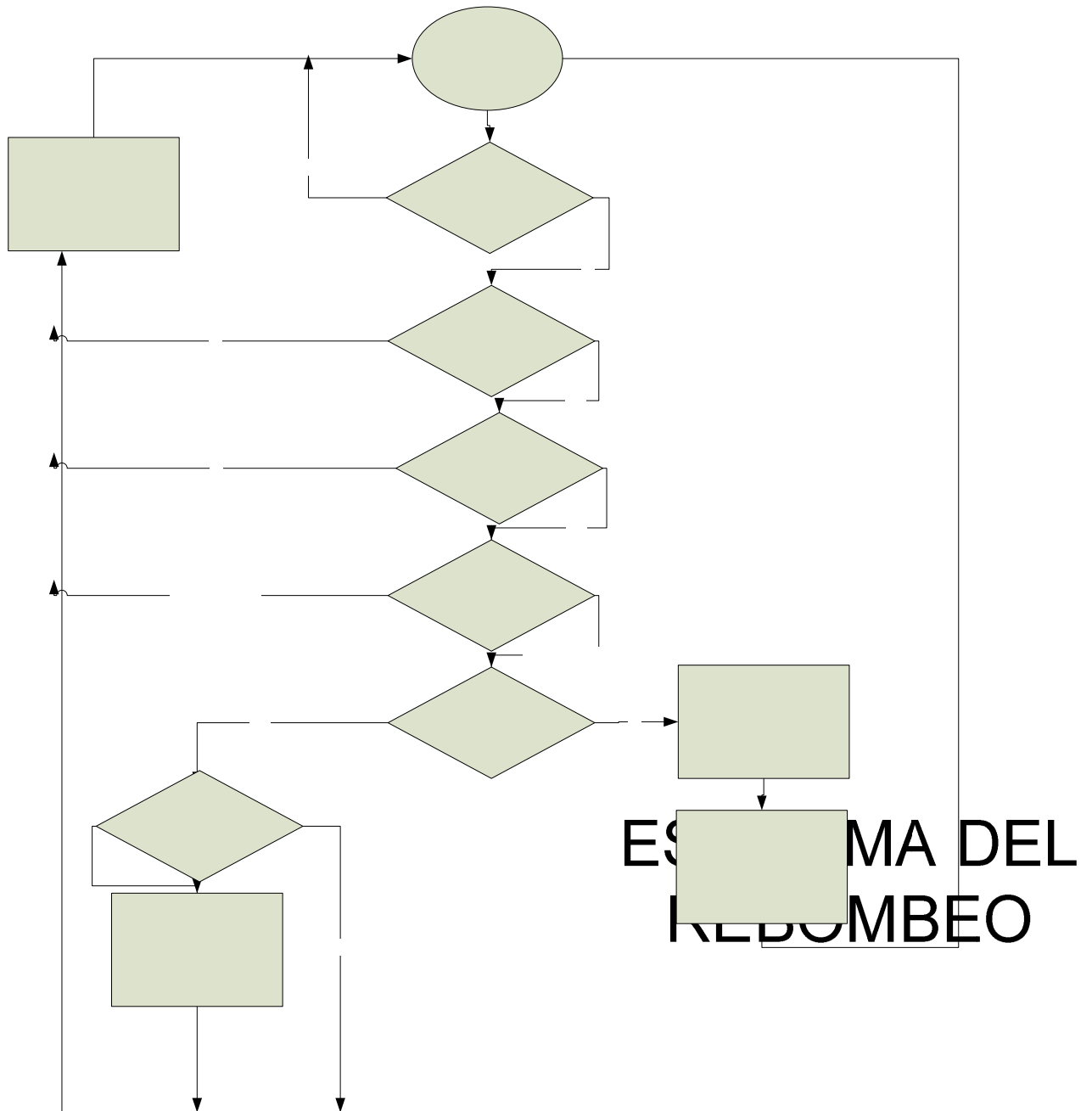


Figura 6.5 Diagrama de flujo para el panel del tanque de Rebombeo

Tabla 10 Señales utilizadas para en control del tanque de rebombeo

Señal	Descripción
Sensor flujo 1	Entrada del sensor de flujo del pozo
Sensor flujo 2	Entrada del sensor sensor de flujo del aya
Activar el variador en automático	Salida que indica al variador de frecuencia que se encuentra en modo automático
Transferencia auto	Entrada que indica el modo de transferencia en automático
Sensor normal	Entrada que indica energía de la cometa del ice
Sensor emergencia	Entrada que indica energía de la cometa del generador
Bomba automático	Entrada que indica que la bomba de agua esta en automático
OL	Entrada que indica el disparo térmico
Confirmación normal	Entrada que brinda la verificación del contactor
Paro emergencia	Entrada de indicación de emergencia
Nivel alto	Entrada nivel alto del tanque
Nivel medio	Entrada nivel medio del tanque
Bomba manual	Salida de activación de la bomba en manual
Confirmación emergencia	Entrada que brinda la verificación del contactor generador
Sensor de presión	Entrada analógica de presión
Sensor de nivel	Entrada analógica de nivel
Salida variador	Salida analógica para el control de trabajo de la bomba
Válvula aya	Salida que activa la válvula del aya
Falla del variador	Entrada que indica falla en el variador
Puerto 2	Comunicación con el tanque de almacenamiento y el pozo

En la tabla 10, se indican las distintas señales utilizadas para el control de panel del Rebombeo. Por medio de estas señales se realiza el control de los distintos dispositivos, así como el comportamiento de la bomba del tanque de rebombeo.

Se muestra que los dispositivos tal como los variadores de frecuencia y los contactores tienen una señal de confirmación. Dicha señal tiene el objetivo de verificar si se realizó la acción solicitada y poder indicar el estado por medio del SCADA.

Nivel del tanque de almacenamiento

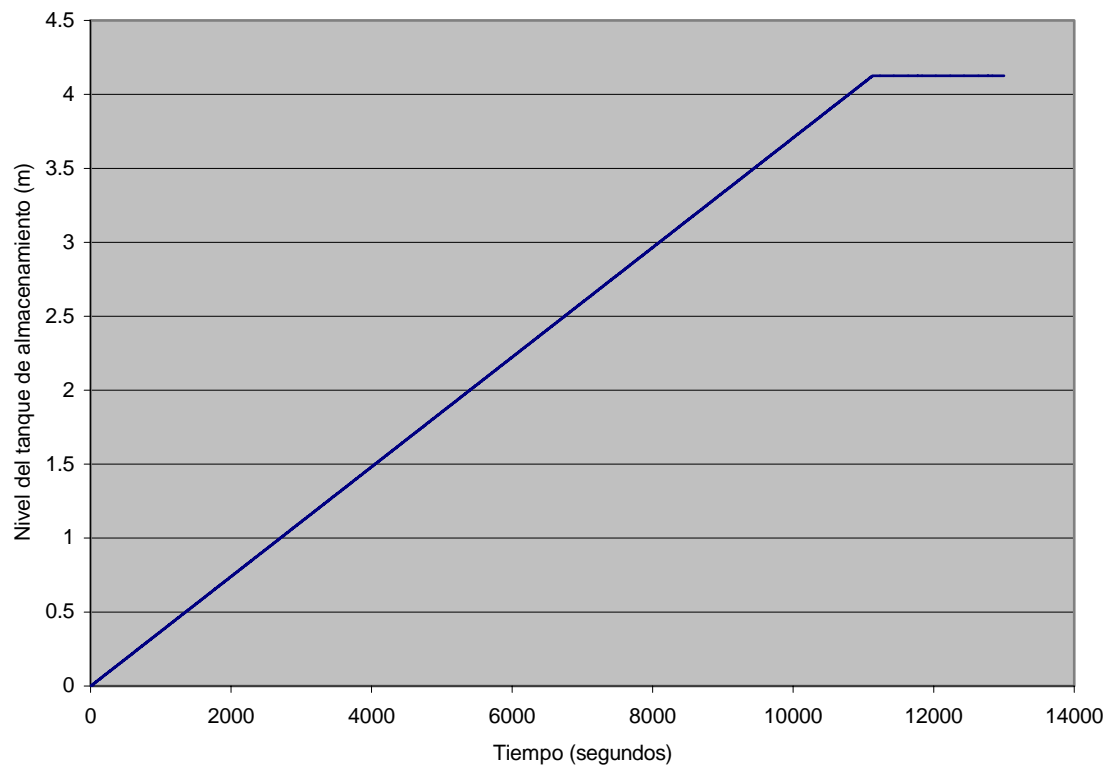


Figura 6.6 Comportamiento del llenado del tanque de Almacenamiento.

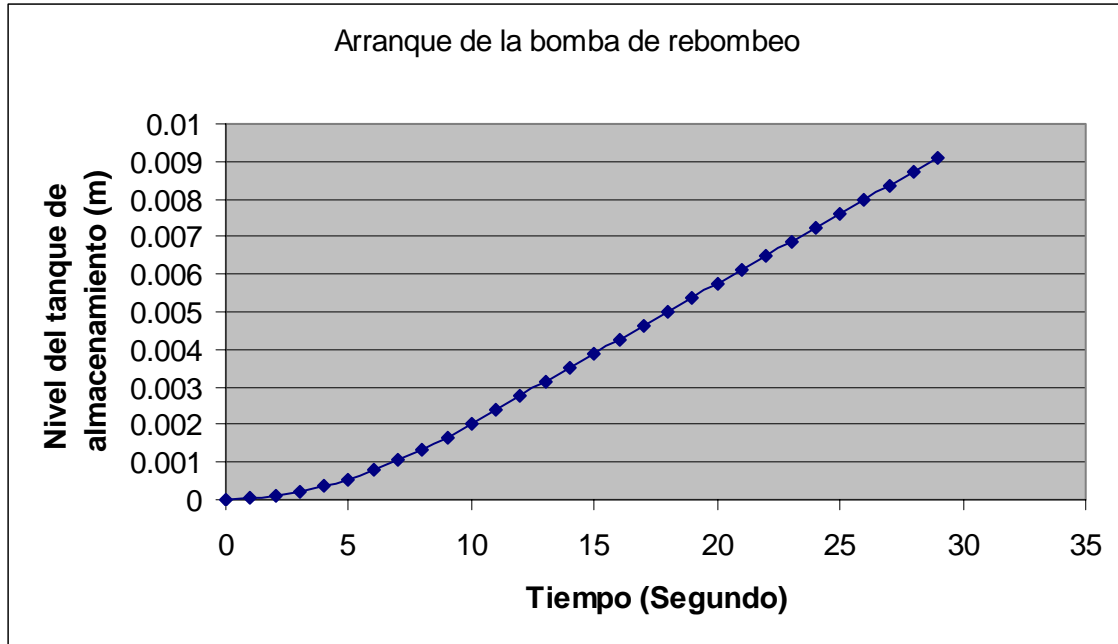


Figura 6.7 Arranque de la bomba de rebombeo

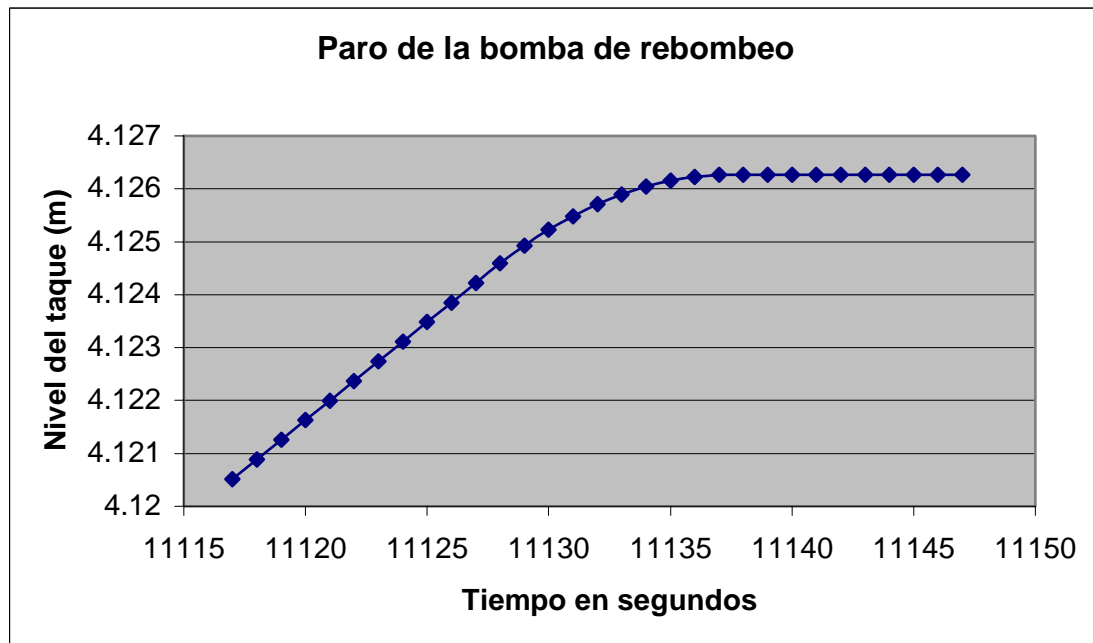


Figura 6.8 Comportamiento de la bomba de rebombeo.

En la figura 6.6 muestra el nivel del tanque de almacenamiento al generar una señal de escalón en la bomba del rebombeo. Se observa que el nivel del tanque de almacenamiento se estabiliza a los 4.12 metros de altura. Debido a que a esta altura se aproxima al límite máximo del tanque, y se tiene capacidad en el tanque de $70m^3$ aproximadamente.

Por medio del variador de frecuencia se estableció un arranque suave en el motor (ver la figura 6.7), durante los primeros 10 segundos. Con el objetivo de aumentar la vida útil de la bomba del pozo, y dicho motor consume menos corriente de arranque. Este tiempo se ajustó experimentalmente, ya que evita un cambio abrupto de presión que daña las tuberías y reduce el golpe de ariete.

Se observa en la figura 6.8, el comportamiento del nivel del tanque de almacenamiento, en los instantes en que el valor de referencia se aproxima al nivel de referencia. La bomba reduce su trabajo con el objetivo de aproximarse al valor de referencia.

Los niveles mostrados en las figuras 6.6, 6.7 y 6.8 son transmitidos del tanque de almacenamiento al panel ubicado en el depósito de rebombeo, para que este último realice los cálculos correspondientes y compensar el sistema de manera que se mantenga un nivel de constante en el tanque de almacenamiento.

6.1.3 Tanque de almacenamiento

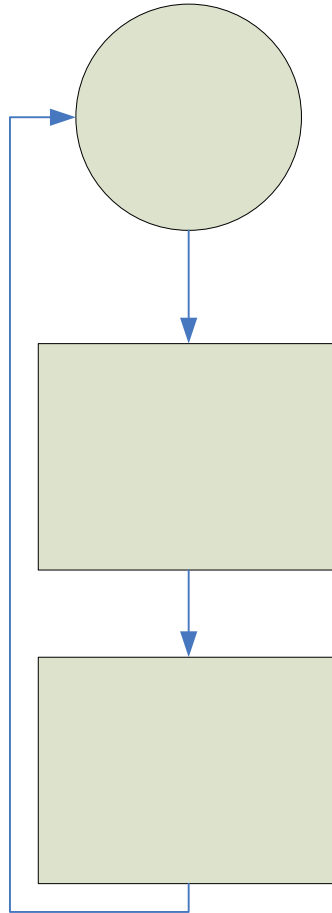


Figura 6.9 Diagrama de flujo para el panel del tanque de almacenamiento

Tabla 11 Señales utilizadas para en control del tanque de almacenamiento

Señal	Descripción
In_nivel_alto	Sensor de nivel alto
In_nivel_bajo	Sensor de nivel bajo
In_sensor_nivel	Sensor ultrasónico
In_sensor_presion	Sensor de presión
Run_stop	Arranque y para del plc manual

En la tabla 11, se indican las distintas señales utilizadas para el control de panel del tanque de almacenamiento.

En las figuras de 6.9, se representa un diagrama de flujo genérico, en el cual se describe el funcionamiento del panel de almacenamiento.

Este panel tiene la responsabilidad de brindar la información de su nivel de agua, por medio de un sensor ultrasónico de nivel, para que el tanque de rebombeo

suministre la cantidad de agua necesaria, para mantener un nivel constante del líquido.

Desde este punto se distribuye el agua a todo el residencial por medio de la gravedad, ya que este se encuentra ubicado en la parte más alta del residencial. Para equilibrar las presiones dentro de tal residencial, se utiliza reductores de presión localizados en puntos estratégicos, previamente establecidos.

Debido a su localización, el dispositivo de control de este punto, se encuentra energizado por medio de una batería. Por esta razón, el dispositivo de control transmite el estado de batería.

6.2 Análisis de resultados

6.2.1 Valores del PID

Para lograr los resultados obtenidos se representan en las figuras 6.2, 6.3, 6.4, 6.6, 6.7 y 6.8 (gráficas se muestra los distintos comportamientos en los tanques), se requirió un método de ajuste de parámetros de un PID existente propuesto por Ziegler y Nichold con bucle abierto, y posteriormente un ajuste en las variables.

Este método consiste en colocar el regulador en modo manual y aplicar un escalón en el sistema, luego determinar puntos de cambio en la respuesta del sistema, y por medio de aproximaciones determinar valores adecuados para el PID de sistema a controlar.

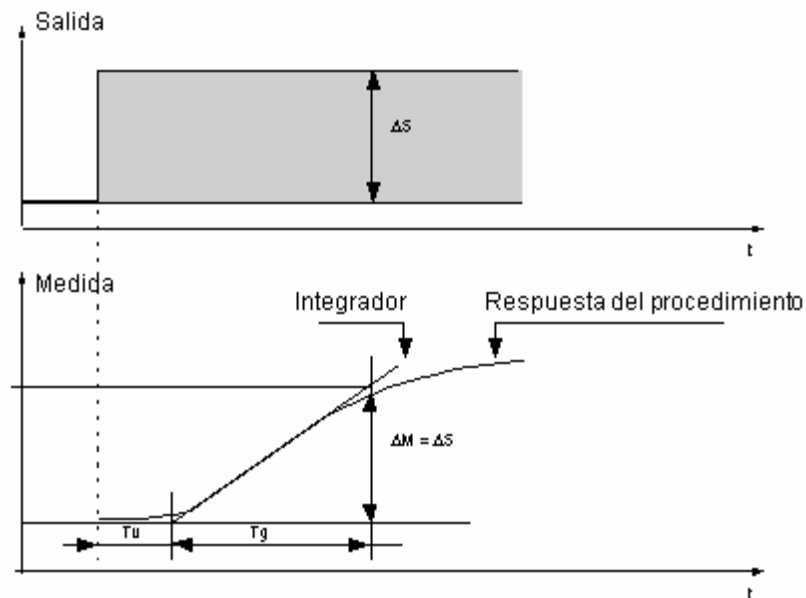


Figura 6.10 Método de Ziegler y Nichold con bucle abierto

Una vez obtenidos los valores de los tiempos del proceso sin compensador, se procedió a las aproximaciones de las constantes. En la tabla 12 se muestra como se calculan los valores de PID.

Tabla 12 Aproximaciones de las variables de PID del sistema

-	Kp	Ti	Td
PID	$-1,2 T_g/T_u$	$2 x T_u$	$0,5 x T_u$
PI	$-0,9 T_g/T_u$	$3,3 x T_u$	-

Las aproximaciones se basaron en la tabla 12, y se tomaron en consideración los siguientes tiempos:

Tabla 13 Aproximaciones de los tiempos en la respuesta de los sistemas

VARIABLE	MAGNITUD
Tanque de Almacenamiento	
Tu	10 segundo
Tg	10000 segundos
Tanque de Rebombeo	
Tu	10 segundo
Tg	11100 segundos

En la tabla 13 se relejan los tiempos obtenido de los puntos donde se requiere sistemas PID. Los Valores de la variable proporcional y integral y derivativa se calcularon y se muestran en la tabla 8

Tabla 14 Aproximaciones teoricas de las variables de PID del sistema

-	Kp	Ti	Td
Tanque de Almacenamiento			
PID	-900	33	* No aplicó
Tanque de Rebombeo			
PID	-999	33	* No aplicó

Los datos mostrados en la tabla 14, son solo una aproximación del compensador por utilizar; por tanto, se requirió realizar correcciones de ajustes, tomando en cuenta el comportamiento y las consecuencias de las variaciones de los parámetros

Este comportamiento se logró ajustando valores en los parámetros del PID. En los ajustes realizados se analizó que la influencia de la constante proporcional interviene en la velocidad de respuesta del proceso. Cuanto más elevada sea la ganancia en el compensador, más se acelerará la respuesta y más disminuirá el error estático, pero conjuntamente disminuirá la estabilidad.

Para encontrar un equilibrio entre velocidad y estabilidad. Se ajustó la variable Kp obteniendo un comportamiento similar al de la figura 6.11

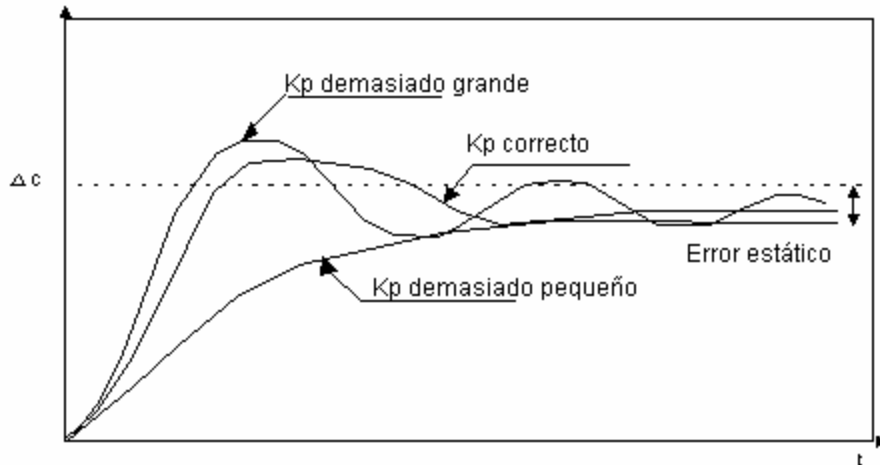


Figura 6.11 Comportamiento de los sistemas PID al variar los valores de K_p .

Con el objetivo de reducir el error estático entre la medida de la señal y el valor de la consigna, se aumentó la magnitud de la variable de la acción integral (TI). Se observó que cuando se tiene una acción integral de pequeña magnitud el tiempo de error de estado estacionario es alto y conforme aumenta dicho valor mejora el tiempo estabilidad del sistema, pero si es muy elevado, el sistema comienza a generar un sobre impulso. Este fenómeno se describe en la figura 6.12

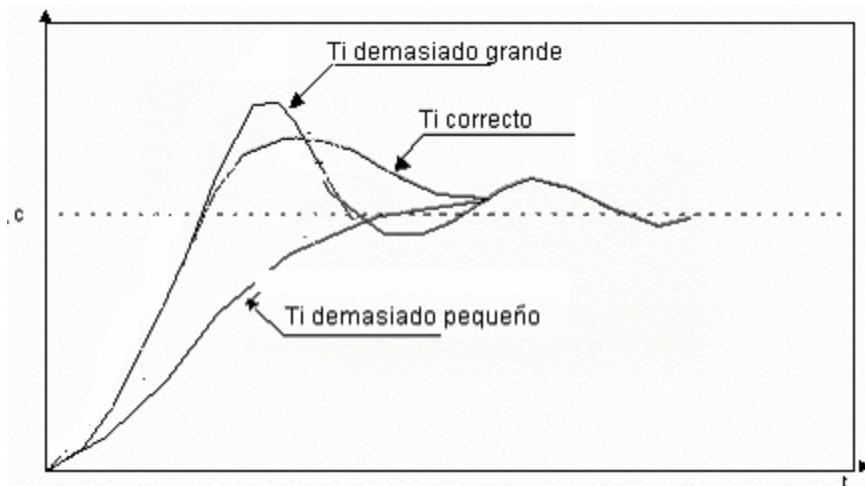


Figura 6.12 Comportamiento de los sistemas PID al variar los valores de T_i .

Dentro de las características del PID se encuentra el parámetro de acción derivativa, la cual toma en cuenta el tiempo de variación de la desviación, Dicha variable es la conocida como anticipadora.

Esta variable tiene como objetivo anticiparse ante un cambio, acelerando en la respuesta. Cuanta más alta sea la acción derivada (T_d grande), más se acelerará la respuesta, Este comportamiento se encuentra en la figura 6.13.

Para el caso del proyecto de control del acueducto no fue necesario implementarlo debido a lo lento del sistema, y que el sistema responde adecuadamente con los valores de establecidos de K_p y T_I .

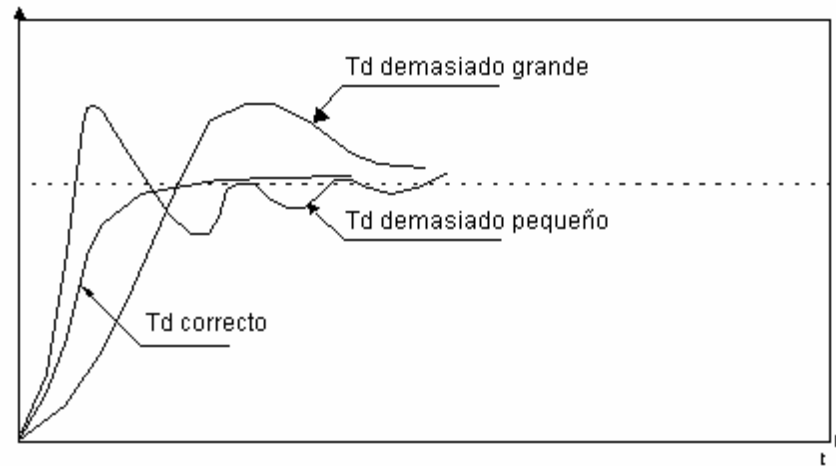


Figura 6.13 Comportamiento de los sistemas PID al variar los valores de T_d .

Los valores finales después de los ajustes en el sistema se muestran en la tabla 9.

Tabla 15 Valores finales de las variables de PID del sistema

-	K_p	T_i	T_d
Tanque de Almacenamiento			
PID	850	29	* No aplicó
Tanque de Rebombeo			
PID	900	29	* No aplicó

Los valores mostrados en la tabla 15, cumplen con una respuesta rápida y un error en estado estacionario pequeño, menor al 5%. Los resultados obtenidos con estos valores se reflejan en las figuras 6.2, 6.3, 6.4, 6.6, 6. y 6.8.

Tabla 16 Comparación de los valores Teóricos con los Experimentales

-	Tanque de almacenamiento			Tanque de rebombeo		
	PID Teórico	PID Experimental	% Error	PID Teórico	PID Experimental	% Error
Kp	900	850	5.56	999	950	4.90
Ti	33	30	9.09	33	30	9.09

Los valores mostrados en la tabla 16, refleja el porcentaje de error, del valor teórico con respecto al valor experimental, de los valores de Kp y Ti implementados en la planta de compensador.

Los valores teóricos son obtenidos por medio del método de Ziegler y Nichold, aplicado en la planta teórica.

Se observa que el porcentaje de error es menor del 10%. Esta diferencia se debe a la falta de linealidad de los actuadores del sistema y a pequeñas perdidas en las tuberías.

Este margen de error, por tanto, se encuentra dentro de los rangos permitidos tomando como referencia los valores teóricos.

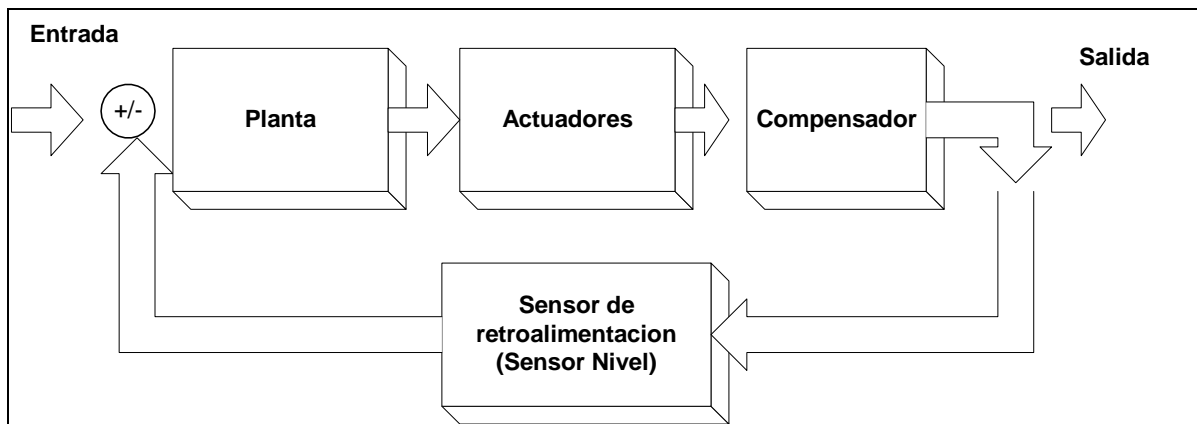


Figura 6.14 Bloques del sistema modelado.

6.2.2 Activación de los sistemas de alimentación de emergencia.

Para los puntos de pozo y rebombeo, los sistemas de alimentación de emergencia consisten en generadores trifásicos de 480V.

El diseño del panel a nivel de hardware y software evita, que en la línea de alimentación de la bomba exista la posibilidad de que el sistema de emergencia y la cometida del ICE proveen de energía al dispositivo al mismo tiempo.

Esto se debe a que existe un tiempo denominado “tiempo muerto” que desconecta la bomba de las fuentes de alimentación. Este tiempo se respeta en la transferencia como en la retransferencia.

En el residencial de Cerro Colón se pueden programar los tiempo muertos (no menos de 5 segundos), los tiempos de ejercitador semanal del generador.

Debido a que la empresa Lauca aun no va a implantar los generadores, no se realizaron pruebas en planta con esta etapa, pero se comprobó su buen funcionamiento gracias al intercambio de señales en los sensores de voltaje.

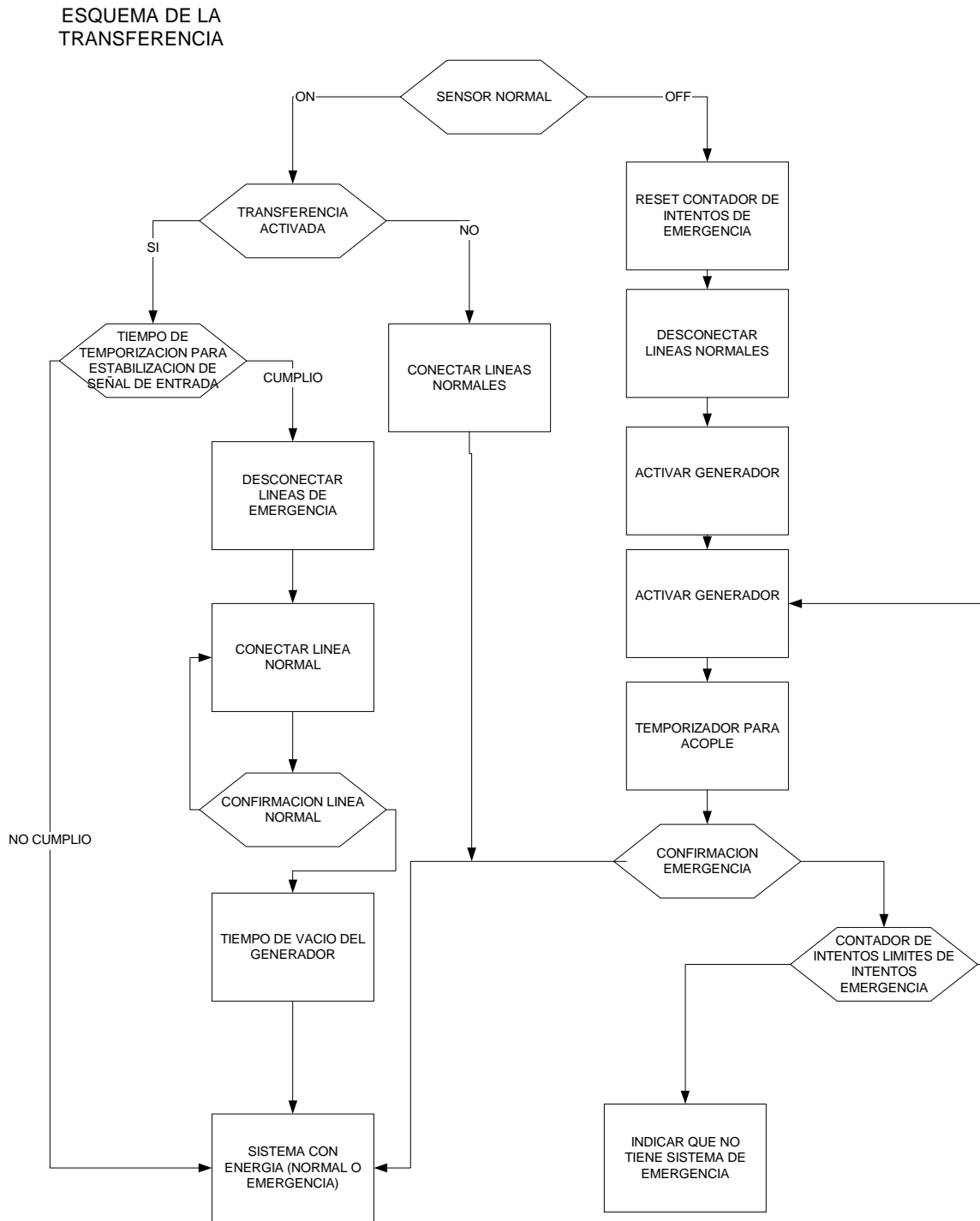


Figura 6.15 Diagrama del flujo para los sistemas de transferencias

En la figura 6.15 se describe el diagrama de flujo que detalla la secuencia de arranque de los motores. En esta sección del código de programación se especifica el orden y las condiciones bajo las cuales se van activando cada uno de los dispositivos de la planta que participan en el proceso de producción. Se cuenta con un módulo de estos, para el arranque de cada uno de los generadores de las distintas paneles.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

1. Por medio del Método de Ziegler y Nichold con bucle abierto, se pueden obtener compensadores de una manera práctica y eficiente de modo que satisfagan las características mínimas requeridas por la planta.
2. El valor de KP mayor al requerido aumenta la velocidad de respuesta del compensador pero disminuye la estabilidad.
3. El valor de TI mayor al requerido disminuye el error del estado estacionario pero aumenta el sobre impulso del sistema.
4. El método recomendado en el enlace de los módulos inalámbricos empleados es el de multipunto y halfduplex, para aumentar la eficiencia y disminuir los tiempos de comunicación.
5. El rango de frecuencias en las cuales los motores o bombas trabajan más eficientemente, disminuyendo el desgaste de empaques está entre los 40Hz y los 60 Hz.

7.2 Recomendaciones

1. Si se va a trabajar con variadores de frecuencia, con señales analógicas, se recomienda el uso de señales de 4 a 20 mA, ya que permite al variador determinar si el lazo se encuentra con un corto circuito o un abierto.
2. En la elaboración de un proyecto es imprescindible que quienes realicen las labores de instalación electromecánica tengan conocimiento en interpretación de planos. En caso de no ser así debería de asignarse dentro del cronograma una capacitación para los mismos.
3. Las señales críticas de los paneles tienen que estar controlador por el PLC y por dispositivos mecánicos o eléctricos distintos y externos del control automático.
4. El sistema de seguridad del panel debe ser independiente y autónomo de la lógica controlada por el dispositivo de control.

Capítulo 8: Bibliografía

Hayt, W. “**Análisis de Circuitos en Ingeniería.**” 3 era ed. México: McGraw–Hill / Interamericana, 1993.

Serway, “**Física Tomo I**”, McGraw-Hill interamericana Editores S.A, Cuarta Edición 1997 México.

Barrientos Antonio, “**Control de sistemas Continuos Problemas resueltos**”, McGraw-Hill interamericana de España S.A, Cuarta Edición 1997 España.

DiStefano, Stubberud, “**Retroalimentación y sistema de control**”, McGraw-Hill interamericana S.A, segunda Edición 1992 Colombia.

Benjamín C. Kuo,” **Sistemas de control automático**”, Prentice may, setima edición, México.

Munson Ypung Okiihsi, “**Fundamentos de mecánica de fluidos**”, LIMUSA, primera edición 1999 Mexico.

Apéndices

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

1. **A y A:** Acueductos y alcantarillados
2. **Panel de control:** Conjunto de dispositivos eléctricos o mecánicos que permiten el control de un proceso.
3. **PM:** Power Meter., medidor de potencia de las líneas de alimentación.
4. **FT:** Sensor de Flujo
5. **LT:** Sensor de Nivel
6. **Vijeo look:** Programa SCADA orientado al monitoreo y control de PLC's. Paquete de software para diseñar e implementar sistemas SCADA, desarrollado por TELEMECANIQUE.
7. **Modbus:** Protocolo abierto de comunicación.
8. **Scada:** Programa de Supervisión, Control y Adquisición de Datos
9. **PLC:** Controlador Lógico Programable, por sus siglas en inglés.
10. **Presostato:** Interruptor accionado por una presión definida.
11. **UPS:** Fuente Ininterrumpida de Poder por sus siglas en inglés. Es una fuente de poder que cuenta con una batería para mantener la entrega de potencia cuando falta el fluido eléctrico de la alimentación.
12. **PID:** Proporcional - Integrativo - Derivativo. Técnica utilizada para sistemas de control automático. Con la definición de constantes proporcional, integrativo y derivativo se establece la respuesta que tiene un sistema ante el comando de una variable de control así como perturbaciones en la variable de proceso.
13. **Firmware:** Sistema operativo almacenado en memoria de estado sólido en algún dispositivo. Cuando este se almacena en memoria FLASH puede ser actualizado.
14. **ODBC:** Open Data Base Connectivity. Formato de bases de datos universal de Windows para la conectividad de bases de datos de diferentes programas.
15. **VisualBasic:** Lenguaje de programación de la compañía Microsoft.
16. **HIM:** Módulo de Interfaz Humana, por sus siglas en inglés. Es el módulo de un dispositivo que se utiliza para comandar un dispositivo manualmente.

A.2 Información sobre la empresa

La empresa Automatización Avanzada (AASA) es parte del grupo GD Ingeniería grupo que tiene 13 años de fundado. A este grupo pertenecen además de AASA, la empresa GDI, la empresa CODIEL, y la empresa REISA.

El gerente administrativo del grupo se llama Hector Calderón, y el gerente técnico se llama Giuseppe Daniele. El grupo cuenta con 18 empleados y se estableció que la empresa AASA empezara sus operaciones con el ING. Juan Carlos Brenes, ingeniero que cuenta con amplia experiencia en el desarrollo de proyectos de automatización industrial dentro y fuera del país.

Automatización Avanzada(AASA), tiene 1año de fundada y es una empresa que presta servicio en el área de automatización e integración de sistemas industriales.

En AASA se revisa todos y cada uno de los detalles con el fin de ofrecer opciones que protejan las inversiones previas, garanticen una inversión inteligente y protejan a sus clientes de altas inversiones en el futuro. También ofrece servicios completos de integración de sistemas y proyectos llave en mano.

Entre los servicios ofrecidos por Automatización Avanzada se tiene: estudios conceptuales y de factibilidad, diseño de paneles de automatización, programación de PLC's, Implementación de redes de comunicación industriales tales como DH+, ModbusPlus, RIO, DeviceNet, Ethernet TCP/IP, etc, programación de interfaces de operación hombre-máquina(HMI), instrumentación en general, control de movimiento, sistemas de telemetría, aplicaciones en Visual Basic, servicios de puesta en marcha, servicios de campo, sistemas de registro automático de datos de proceso y reportes, entrenamiento.