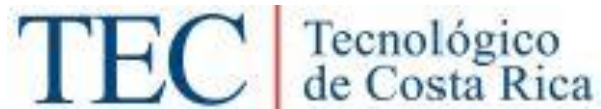


Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área académica de Ingeniería Mecatrónica



Empresa: Soluciones en Automatización Industrial



"Diseño de un sistema automatizado para el monitoreo y control de la estación principal de bombeo del acueducto de San Ramón, Alajuela."

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciado en Ingeniería Mecatrónica.

José Fabián Blanco Piña.

Cartago
Setiembre, 2015.

Hoja de información.

Estudiante:

Nombre: José Fabián Blanco Piña

Cédula: 5-0387-0977

Carné ITCR: 201024960

Dirección: Cartago, San José, Costa Rica

Teléfono: 8875-0384

Correo electrónico: josefabianblanco@gmail.com

Proyecto:

Nombre del proyecto:

"Diseño de un sistema automatizado para el monitoreo y control de la estación principal de bombeo del acueducto de San Ramón, Alajuela."

Profesor asesor: Ing. Ana Lucía Morera Barquero

Empresa:

Nombre: Soluciones en Automatización Industrial, SOATI

Dirección: Parque Industrial Condal, Oficina 54, Colima, Tibás, San José

Teléfono: 2241 0056

Actividad: Integrador de sistemas automatizados

Supervisor: Ing. José William Sánchez C.

Dedicatoria

Este proyecto de graduación es dedicado a mis padres que siempre han sido lo más importante de mi vida, los que me han dado su apoyo y amor incondicional y gracias a quienes soy lo que soy y he logrado alcanzar esta meta.

Agradecimientos

A Dios por permitirme alcanzar este logro, siempre bajo Su guía.

A mi familia, a mis amigos y a cada uno de los que estuvieron a mi lado y que siempre me dieron su apoyo en esta travesía universitaria.

A SOATI S.A. por darme la oportunidad de desarrollar mi proyecto de graduación con ellos.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

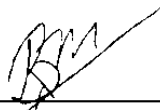
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

ACTA DE APROBACIÓN.

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

Miembros del Tribunal



Ing. Ronald Bolaños Maroto

Profesor lector



Ing. Carlos Adrián Salazar García

Profesor lector



Ing. Ana Lucía Morera Barquero

Profesor asesor

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 Carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, Noviembre de 2015


Carta 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, Noviembre 2015



José Fabián Blanco Piña

Céd: 5-0387-0977

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	13
Abstract.....	14
Capítulo 1. Introducción.....	15
Capítulo 2. Reseña de la empresa.....	20
2.1 Nombre de la empresa.....	20
2.2 Origen e historia.....	20
2.3 Ubicación.....	21
2.4 Estructura organizacional.....	22
Capítulo 3. Marco Teórico.....	26
3.1 Agua potable, trasiego y abastecimiento.....	26
3.2. Acueducto de San Ramón – Palmares.....	27
3.2.1 Áreas de captación de agua.....	29
3.2.2 Planta potabilizadora.....	30
3.2.3 Pozos y tanques de almacenamiento.....	30
3.2.4 Sistema de distribución.....	30
3.3 Estación principal de abastecimiento. (Bajo Barrantes).....	31
3.3.1 Criticidad de la estación Bajo Barrantes.....	32
3.4 Transferencia eléctrica.....	32
3.4.1 Tipos de transferencias e interruptores.....	34
3.5 Sistema de presión de agua constante.....	37
3.5.1 Controlador.....	38
3.5.2 Sensores de presión.....	40
3.5.3 Bomba de agua.....	42

3.5.4. Variador de velocidad.	44
3.6 Protocolos de comunicación industrial.....	46
3.6.1 Modelo OSI.....	47
3.7 Redes de comunicación industriales.....	48
3.7.1 Clasificación de las redes industriales.....	48
3.7.2. Topologías de red.....	50
Capítulo 4. Generalidades del proyecto.....	52
4.1 Entorno del proyecto.....	52
4.2 Alcance del proyecto.....	54
4.3 Definición del problema.	54
4.3.1 Generalidades.....	54
4.3.2 Síntesis del problema.....	55
4.4 Enfoque de la solución.....	56
4.4.1 Diagrama de Pareto.....	58
4.4.2 Diagrama causa-efecto.....	60
4.5 Objetivos.....	61
4.5.1 Objetivo general.....	61
4.5.2 Objetivos específicos.....	61
4.6 Procedimientos para la ejecución del proyecto.....	62
4.7 Metodología de trabajo.....	63
Capítulo 5. Desarrollo del proyecto.....	66
5.1 Diseño del sistema de control de presión.	66
5.1.1 Implementación de variador de velocidad.	67
5.1.1.1 Variador de familia Altivar.	67

5.1.1.2 Variador Altivar Process ATV650C	69
5.1.2 Sensor de presión.....	71
5.2 Diseño del sistema de transferencia eléctrica.	73
5.2.1 Alimentación eléctrica.....	74
5.2.2 Protección contra transientes.	75
5.2.3 Medidor de energía.....	76
5.2.4 Distribución de energía.....	80
5.2.5 Interruptores termomagnéticos.....	82
5.2.6 Transferencia eléctrica.....	85
5.3. Diseño de un sistema de alternancia de bombas.	90
5.3.1. Controlador RTU.....	91
5.4. Comunicación.	94
5.4.1 Red local.....	94
5.4.2. Red remota.	98
5.5 Sistema de refrigeración.	100
5.6. Sistema HMI-SCADA.....	101
Capítulo 6. Resultados.....	104
6.1. Construcción y configuración de gabinetes.	114
Capítulo 7. Resumen financiero.....	117
Capítulo 8. Conclusiones.	119
8.1 Recomendaciones	120
Bibliografía.	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Estructura organizacional de la empresa	24
Figura 3.1. Mapa del cantón de San Ramón	28
Figura 3.2. Mapa de red hidrográfica y nacientes	29
Figura 3.3. Mapa de ubicación, Bajo los Barrantes.....	31
Figura 3.4. Esquema simplificado de red de transferencia-alimentación	33
Figura 3.5. Ejemplo de rangos aceptables de voltaje de fuente eléctrica.....	34
Figura 3.6. Ejemplos de transferencias eléctricas	36
Figura 3.7. Diagrama de un sistema de presión constante	38
Figura 3.8. Estructura de un PLC.....	39
Figura 3.9. PLC Compact Mitsubishi: MELSEC FX3U.....	40
Figura 3.10. Gama de sensores de presión SITRANS P de SIEMENS	41
Figura 3.11. Esquema de un convertidor de frecuencias	46
Figura 3.12. Capas del modelo OSI	47
Figura 3.13. Diagrama de uso de redes industriales.....	50
Figura 3.14 Topologías de red	50
Figura 3.15. Características de topologías de red.....	51
Figura 4.1. Diagrama de Pareto del proyecto	58
Figura 4.2 Diagrama causa-efecto del proyecto.....	60
Figura 5.1. Familia de variadores Altivar	68
Figura 5.2. Variador de frecuencia Altivar Process ATV650C	69
Figura 5.3. Curva característica de operación de bombas	70
Figura 5.4. Sitrans P DS III.....	72
Figura 5.5. ERICO SES200.....	75

Figura 5.6. Medidor de energía PM8000	77
Figura 5.7. Medidor PM8000	78
Figura 5.8. Medidor PM8000 en su montaje para riel DIN	79
Figura 5.9. Barras flexibles de alimentación.....	81
Figura 5.10. Ejemplo de conexión mediante barras flexibles.....	82
Figura 5.11. Interruptor termomagnético serie NW	83
Figura 5.12. Chasis de montaje para Masterpact	84
Figura 5.13. Diagrama de conexiones de comunicación	85
Figura 5.14. Ejemplo de interenclavamiento eléctrico (IVE).....	86
Figura 5.15. Diagrama de conexión de transferencia	87
Figura 5.16. Segmento de programación para transferencia eléctrica	88
Figura 5.17. Diagrama de flujo de transferencia eléctrica	89
Figura 5.18. RTU SCADAPack 334E	93
Figura 5.19. Características del protocolo Modbus	94
Figura 5.20. Intercambio de datos maestro-esclavo	96
Figura 5.21. Configuraciones Modbus	97
Figura 5.22. Cable de par trenzado y conectores RJ-45	98
Figura 5.23. Cuadro comparativo entre medios de transmisión cableados	99
Figura 5.24. Diagrama del sistema de ventilación de gabinetes.....	101
Figura 6.1. Pantalla de operador para simulación.....	106
Figura 6.2. Pantalla de operador para simulación.....	107
Figura 6.3. Montaje de los interruptores termomagnéticos en gabinetes	108
Figura 6.4. Detalle de un interruptor de transferencia eléctrica.....	109
Figura 6.5. Barras de acometida eléctrica.....	109

Figura 6.6. Sección de programación para alternancia de bombas	111
Figura 6.7. Pantalla de planta potabilizadora.....	112
Figura 6.8. Pantalla 1 de estación de bombeo.....	112
Figura 6.9. Pantalla 2 de estación de bombeo.....	113
Figura 6.10. Pantalla 3 de estación de bombeo.....	113
Figura 6.11. Pantalla de tanque de almacenamiento	114
Figura 6.12. Diagrama de los gabinetes de variadores.....	115
Figura 6.13. Diagrama del cuerpo de gabinetes.....	116

ÍNDICE DE TABLAS Y ECUACIONES

Ecuación 3.1. Velocidad de un motor en corriente alterna.....	45
Tabla 4.1. Método de trabajo	63
Tabla 5.1. Características de HMI	103
Tabla 6.1. Características del variador de velocidad	105
Tabla 6.2. Características del sistema eléctrico.....	107
Tabla 6.3. Variables a manejar por el controlador.....	110
Tabla 7.1. Costos aproximados del proyecto	117

Resumen.

El presente informe da cuenta del desarrollo del proyecto que consiste en diseñar un sistema automatizado de control y monitoreo para una estación de bombeo de agua en la zona de San Ramón de Alajuela, Costa Rica.

Este documento abarca todos los aspectos de importancia que se tratan a la hora del diseño del sistema solicitado por la empresa Soluciones en Automatización Industrial, en adelante mencionada como SOATI, en la que se hizo el proyecto y de la que posteriormente se conocerá más a fondo.

En el caso particular del presente proyecto, la empresa encargada de brindar el servicio de agua potable a las regiones de San Ramón y Palmares de Alajuela, decide realizar una automatización de la estación principal de bombeo de dicho sector, para obtener así un sistema que permita saber, con gran precisión, con datos veraces y de la forma más rápida posible, cada una de los parámetros que intervienen a la hora de manejar y hacer llegar el líquido a cada uno de los lugares que lo necesitan.

Se presentan también los resultados obtenidos al finalizar el proyecto en cuanto al diseño del sistema, los equipos utilizados, aspectos financieros involucrados en el desarrollo del proyecto, así como los beneficios que se espera tener una vez que sea implementado lo que se diseñó y finalmente se muestran las conclusiones que evidencian el cumplimiento de los diferentes objetivos propuestos al inicio del proyecto de modo que puedan servir como una referencia a la hora de determinar el éxito del proyecto.

Palabras clave: acueducto, automatización, control, monitoreo, bombeo, agua, San Ramón.

Abstract.

This report describes the development of the project that consists of designing an automatic control and monitoring system for a water pumping station in San Ramón of Alajuela, Costa Rica.

This document covers every important aspect that is involved in the design of the system that was requested by the company Soluciones en Automatización Industrial, hereinafter known as SOATI, where the project was developed and which will be subsequently known more thoroughly with a review of its origins, productive activities and other characteristics of the institution that will allow the reader to have a better perspective about the environment in which the project will be made.

In this case the company that gives the service of providing drinking water for the San Ramón and Palmares region in Alajuela decides doing an automation of the main pumping station of that sector in order to obtain a system that allow the user to know, with great precision, with real data and as fast as possible, each one of the parameters that intervenes in handling and getting the liquid to each of the clients.

Here are also described the results that were obtained at the end of the project in the matter of system design, used electronic equipment, financial aspects involved in the development of the project and the benefits that the implementation of the designed system would bring.

Finally there are some conclusions that show the fulfillment of the different goals that were proposed at the beginning of the project, and those will serve as a reference in establishing the success of the project.

Keywords: aqueduct, automation, control, monitoring, pump, water, San Ramón.

Capítulo 1. Introducción.

La automatización de procesos actualmente tiene un crecimiento exponencial en su implementación en muchas áreas industriales que tienen que ver con la vida cotidiana. Un claro ejemplo de esto son las instituciones y entidades que tienen a cargo el brindar servicios básicos a la población. En este caso concreto es una institución encargada de dar el servicio de agua potable a una región de Costa Rica, la que ve como una alternativa el hacer la mejora de sus sistemas mediante la automatización de los procesos que se llevan a cabo durante la adquisición, almacenamiento, trasiego y distribución de este líquido hasta que logra ser llevado a cada uno de los hogares y lugares que son clientes finales de dicha entidad.

Para ello se decide diseñar un sistema que sea capaz de medir las variables y parámetros más importantes que se deben tomar en cuenta para asegurar las condiciones del servicio que se mencionaron con anterioridad. El tener la posibilidad de registrar variaciones, detectar anomalías y corregirlas, seguir el trayecto del líquido, así como realizar el manejo de los equipos utilizados en la planta de una forma automática, supone para la institución una mejora sustancial en comparación con el sistema actual que no es automático. Dicha mejora se espera que se vea reflejada tanto para los encargados de la planta como para los usuarios del servicio. De esta forma es que se procede a realizar dicho diseño. Un sistema que permita saber los valores de los parámetros del sistema, que haga posible el control automático de los equipos de la planta de forma que, si se dan eventualidades, el sistema sea capaz de realizar las modificaciones necesarias para que no se perjudique el servicio de distribución de agua potable hacia los usuarios.

Con dicho plan se pretende obtener beneficios en cuanto a calidad y facilidad en la prestación del servicio, de manera que la empresa vea mejorado el funcionamiento de la planta y los usuarios sean quienes de primera mano obtengan réditos por la implementación de la automatización de plantas industriales, obteniendo un flujo de

agua potable acorde a sus necesidades y que cumpla con las normas y estatutos nacionales e internacionales que regulan dicha actividad.

Primeramente se realiza un apartado en el que se explican las propiedades del proyecto realizado, desde su descripción, antecedentes del mismo, situación que da origen al proyecto y la definición de la problemática o necesidad que se quiere contrarrestar con la implementación del sistema diseñado.

Las estaciones de bombeo y plantas potabilizadoras son los principales nodos de los sistemas de manejo de agua. Estas son las encargadas de brindar un líquido apto para el consumo humano, cumpliendo con una serie de rigurosas especificaciones dictadas por entes tanto nacionales como internacionales en cuanto a niveles de calidad y potabilidad del agua que se vende. Es por esto que dichas partes del sistema deben ser cuidadosamente monitoreadas y controladas, en todas sus variables, asegurando así que el servicio pueda brindarse de la mejor manera.

Al ser un servicio de primera necesidad se debe tomar en cuenta que debe asegurarse la calidad y continuidad del mismo puesto que si no se logra esto se tendrán graves repercusiones en diferentes ámbitos, como por ejemplo el monetario e inclusive en la salud de las personas que necesitan el agua.

Y es que el control de los sistemas de acueductos es de crítica importancia debido a que el agua es indispensable para la vida y también desarrolla un papel preponderante en muchos de los procesos industriales que se desarrollan actualmente. Es por esto que existe la necesidad de mantener un flujo constante hacia los clientes, algo que se logra mediante el monitoreo incesante del manejo que se hace del líquido.

A partir de un conocimiento más amplio del entorno en que se desarrolla el proyecto y de las funciones que debe cumplir el diseño solicitado, se procede a generar una

serie de posibles soluciones o alternativas de solución que podrían ser implementadas. Cada una de ellas será evaluada, con el uso de criterios de factibilidad, viabilidad y rentabilidad de forma que se pueda escoger, basados en dicha evaluación, la alternativa que presenta los mayores beneficios tanto para la empresa como para el cliente y quien lo realiza.

Cuando se tiene una alternativa seleccionada, se procede a la definición de la forma de trabajo que se llevará a cabo. Se definen las etapas en las que se dividirá el proyecto y los plazos para la finalización de cada una de ellas de forma que, al llegar a la fecha límite de realización del proyecto, se haya conseguido llenar las expectativas del cliente y la empresa con la entrega de un proyecto exitoso.

En cuanto al conocimiento necesario para la consecución de metas a lo largo del tiempo de ejecución del proyecto, se presenta un marco teórico que explica los conceptos básicos para lograr un entendimiento de lo que se hace en cada etapa del diseño. Este apartado representa una gran importancia tanto para quien realizó el proyecto, como para quienes leen este documento. Esto porque da las nociones básicas necesarias de forma que se logre determinar a lo largo y al final del desarrollo del proyecto, la corrección de las etapas de diseño realizadas.

A continuación y tomando en cuenta la situación en que se realiza el proyecto, se hace una justificación de la ejecución del proyecto en donde se explica el por qué resulta viable y beneficioso el realizar un diseño como el que se presenta.

Dentro del desarrollo de este documento se presenta también una descripción de cada una de las etapas del proceso a controlar de forma que se subdivide el mismo para ser abordado de una forma más fácil y sistemática, resolviendo partes pequeñas hasta llegar a la integración de todo el sistema en el diseño final. Además, se presentan los pormenores de los requerimientos para cada una de esas etapas de forma que, cuando se presentan los resultados de diseño se tiene una guía para

comprobar si se logró alcanzar todas las metas propuestas, en cuanto al funcionamiento requerido.

Una vez subdividido el proyecto se continúa con la etapa de diseño. Aquí se inicia solucionando cada uno de los problemas que se tienen en las diferentes etapas que se van a monitorear durante el funcionamiento del sistema. En esta sección se da la escogencia de cada uno de los diferentes componentes necesarios en el diseño de forma que se satisfagan las diferentes solicitudes que le realizó el cliente a la empresa. Esta escogencia debe tomar en cuenta factores de disponibilidad, logística, funcionamiento e integración con otros equipos del sistema, precio y rentabilidad de forma que no solo se logren hacer las funciones que el cliente desea que el sistema haga, sino que también se obtenga un beneficio para la empresa que lo implementará tanto en prestigio, por el nivel de corrección y buen funcionamiento del proyecto, como en el campo financiero.

En esta parte del desarrollo se presenta también simulaciones del sistema diseñado, diagramas de estados que representen el funcionamiento del mismo y demás elementos que permitan una mejor visualización y entendimiento de las etapas que se monitorean y controlan.

Seguidamente se hace un análisis económico y financiero en donde se evidencien los movimientos de dinero que se espera hacer y finalmente los balances que se obtienen con la implementación del diseño. Esto con el fin de comprobar la rentabilidad del proyecto para la empresa que lo pondrá en marcha, así como para tener un registro de movimientos y establecer un precio que sea accesible para el cliente sin caer en pérdidas económicas para la entidad que provee el servicio.

Además de todo esto se realizan una serie de recomendaciones, las cuales vienen pensadas con el fin de mejorar alguno de los aspectos de desarrollo y ejecución del diseño. También son pensadas de forma que si se implementa el sistema se tengan

las guías adecuadas para que dicha puesta en marcha sea lo más fácil posible, obteniendo los mejores beneficios y dejando una estación que tenga un mejor funcionamiento que antes de la automatización.

Finalmente se obtienen las conclusiones del proyecto que pretenden evaluar el cumplimiento a cabalidad de cada uno de los objetivos propuestos al inicio del proyecto. Estos son indicadores de la correcta o incorrecta ejecución y desarrollo del diseño de forma que pueden ser tomadas como evidencia de que el estudiante realizó o no un buen trabajo.

Capítulo 2. Reseña de la empresa.

2.1 Nombre de la empresa

La compañía en la que se realizó el proyecto se llama Soluciones en Automatización Industrial, conocida como SOATI. Su principal actividad consiste en, como su nombre lo indica, brindar soluciones a problemas de ingeniería mediante la aplicación de sistemas automatizados en procesos industriales.

2.2 Origen e historia.

La empresa surge como un emprendimiento de dos personas quienes, por su experiencia en el campo laboral y su grado profesional, vieron la oportunidad de crear una compañía especializada en la solución de problemas de ingeniería basándose en la implementación y el desarrollo de sistemas automáticos para un amplio y variado rango de clientes.

A partir de esta idea es que en el año 2010 nace SOATI. Pequeña empresa que inicia con la misión de:

“Proveer soluciones de automatización a la industria, suministrando excelencia en la calidad, el servicio y en el tiempo de respuesta, con el compromiso de mejora continua y personal altamente capacitado en los procesos productivos de nuestros clientes”. (Página web SOATI).

y con la visión de:

“Ser reconocidos en el sector industrial como la empresa líder en proveer las mejores soluciones en automatización para así convertirse en un aliado de confianza de las empresas nacionales y de la región.” (Página web SOATI).

Desde su nacimiento y hasta la actualidad, la empresa se ha desarrollado como una de las más destacadas en su campo, ganando inclusive el premio a la Mejor PYME del año 2014 en el área de servicios, galardón que es otorgado por el Ministerio de Economía, Industria y Comercio de Costa Rica, y que puso en evidencia el crecimiento acelerado que tuvo en sus primeros años de existencia y que ha logrado mantener hasta la actualidad, consolidándose así como una pequeña empresa con grandes alianzas y con una amplia y excelente capacidad en el desarrollo de proyectos de automatización para la industria nacional e internacional.

Una ventaja es que su principal actividad es brindar soluciones, de forma que no se limita su campo de trabajo a un sector en específico, sino que adecúa su modelo para poder laborar con empresas desde el sector agroindustrial hasta las del sector medicina, energías y demás, siendo esto una de las características importantes que tienen a la hora de competir con otras compañías dedicadas a la automatización pero de un campo en específico.

2.3 Ubicación.

La empresa tiene su sede en la ciudad de San José, específicamente en el Parque Industrial Condal, ubicado en Colima de Tibás. Es aquí donde desarrolla sus actividades, desde la cotización de productos y proyectos hasta las etapas finales de armado de sistemas y puesta en marcha de los mismos. En dicho lugar cuenta con sus oficinas administrativas así como con un taller y bodega para tener la posibilidad de sustentar la demanda de equipos y dar un servicio completo desde la planificación y diseño de los proyectos, hasta la finalización de los mismos ya sea mediante la entrega de algún producto o con la implementación de un sistema.

Y es que no solamente desarrolla proyectos a nivel nacional, sino que dentro del auge que ha tenido el negocio durante estos años, ha sido partícipe y desarrollador de obras a nivel internacional, juntando experiencia en lugares como Nicaragua, El Salvador y actualmente desarrolla un proyecto para ser entregado en Guatemala. De esta forma se puede saber la calidad del trabajo que se realiza en SOATI, dando soluciones completas a los problemas que presenten los clientes.

2.4 Estructura organizacional.

En cuanto a su organización, la empresa cuenta con 15 colaboradores en puestos fijos que están divididos en dos grandes departamentos: el comercial y el de ingeniería.

La empresa está conformada por dos socios que tienen a su cargo labores de gerencia y de proyectos, teniendo así una participación completa en las funciones que desarrolla la empresa.

El departamento comercial es encabezado por Wilder Sequeira, uno de los dueños y gerente comercial de la compañía, quien tiene a cargo además la representación legal de la empresa, así como las tareas propias de la gerencia financiera del comercio. A él se une un jefe de departamento y otras dos personas encargadas de las funciones propias de cotización y venta de proyectos y equipos a los potenciales clientes.

Se tiene además una dependencia de este departamento que es la sección de logística y bodega. El encargado de esto es quien lleva sobre sus hombros el trabajo de velar por el mantenimiento y abastecimiento de equipos para los distintos proyectos que se desarrollan. Esta es una parte clave del funcionamiento de la empresa, puesto que la logística en cuanto a solicitud y manejo de equipos es crítica

por la necesidad de tenerlos de la manera más expedita posible para lograr cumplir los tiempos de entrega previstos ante el cliente. Un fallo en esta cadena de movilización y adquisición de equipos desencadenaría en un retraso crítico y una pérdida tanto monetaria como de prestigio para la compañía.

Por otro lado el departamento de ingeniería es liderado por Eddy Morales, el otro dueño y gerente del ramo. Él es acompañado por un jefe de ingeniería y por un administrador de proyectos en los mayores puestos de este sector de la compañía. Este último también desarrolla un papel sumamente importante en el engranaje que supone hacer funcionar la empresa de una forma óptima y eficiente. El administrador de proyectos es el encargado de velar por el desarrollo y ejecución de los mismos, vigilando cada una de las tareas que se deben realizar y los plazos en que las mismas deben estar terminadas para asegurar una finalización satisfactoria, tanto para el cliente como para la compañía, de cada proyecto que se presenta.

Además cuenta con tres ingenieros de proyectos que son los encargados y responsables de cada uno de los proyectos asignados a ellos por parte de la jefatura y la administración. Responsable puesto que el éxito o el fracaso del proyecto recaerán sobre ellos una vez que sea terminado el mismo. Son ingenieros de profesión y tienen a su cargo encontrar la solución que mejor calce ante cada una de las necesidades presentadas por los clientes.

Como anexo al departamento de ingeniería se tienen las secciones de diseño gráfico, que es una persona encargada de modelar y diseñar todo lo que concierne a pantallas, publicidad, gráficos y aplicaciones e interfaces de usuario que son ofrecidas con la solución para el cliente, y también se tiene al encargado de la elaboración de planos tanto de construcción como eléctricos de los equipos y gabinetes que serán entregados con los sistemas implementados en el proyecto.

Finalmente se cuenta con dos técnicos fijos, aunque en momentos donde se necesitan más se los contrata por períodos, quienes son los gestores del armado y puesta en marcha de los gabinetes de control y los equipos de cada proyecto. Son de los últimos eslabones de la cadena de desarrollo y ejecución de los proyectos pero significan la muy importante parte de la entrega de la solución al cliente. De modo que finalizan el proyecto con la puesta en marcha del mismo y la aprobación del funcionamiento por parte del comprador.

La empresa ofrece diversos servicios entre los que se puede citar consultorías en automatización, administración de proyectos, armado de gabinetes eléctricos, instrumentación y puesta en marcha, venta de equipos eléctricos y de automatización, adquisición y procesamiento de datos de producción entre otros, habiendo desarrollado proyectos en plantas cementeras, de biodiesel, de tratamiento de aguas, transferencias eléctricas, sistemas de presión constante, plantas de energía eólica e hidroeléctrica, entre otros. Lo anterior supone una relación con empresas e instituciones de renombre como bancos, cooperativas y empresas de producción eléctrica, compañías médicas, etc.

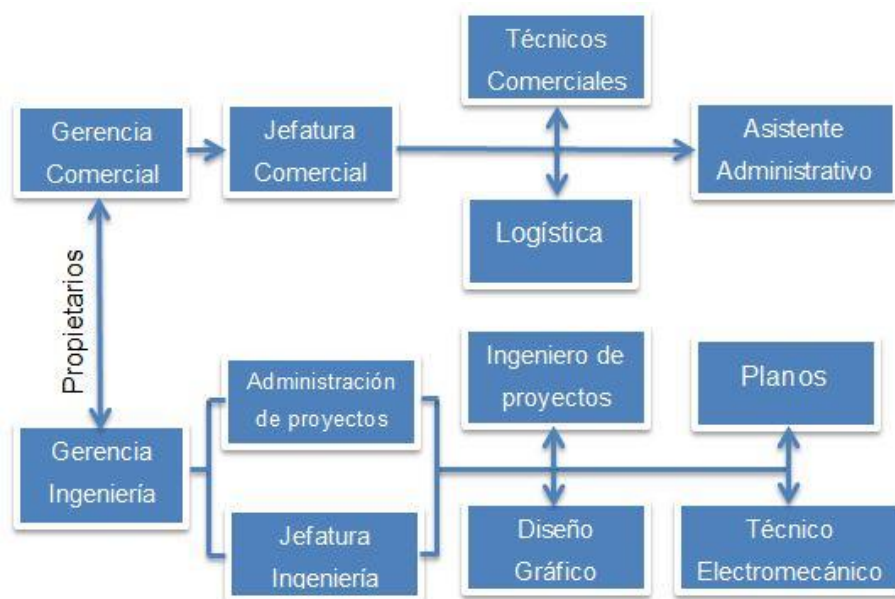


Figura 2.1. Estructura organizacional de la empresa.
(Fabián Blanco Piña, 2015)

Desde sus inicios la empresa ha tenido un rápido crecimiento y ha logrado establecer alianzas con grandes y reconocidas empresas de sectores de electricidad, electrónica y automatización, de forma que también se ha convertido en un aliado de éstas quienes ven la posibilidad de delegar algún proyecto a que sea realizado por SOATI, teniendo la confianza de que el resultado será de calidad y que va a satisfacer todos los requerimientos planteados por el cliente.

Capítulo 3. Marco Teórico

En este capítulo se incluyen los conocimientos necesarios y utilizados para el desarrollo del proyecto y la solución del problema identificado en cuanto a la estación de bombeo de agua donde se implementaría el sistema. De esta forma se logrará introducir al lector a las nociones y principios teóricos que rigen los pasos seguidos durante el desarrollo del proyecto.

Para lograr un entendimiento claro y completo de los demás apartados de este documento, será necesario tener conocimiento de varias y diferentes áreas por la naturaleza integradora de la carrera de mecatrónica. El hecho de que la disciplina agrupe elementos de ramas como la electrónica, la electricidad, sistemas mecánicos y demás, hace que los conceptos a los que concierne referirse, tengan un variado origen y complejidad, de modo que se tratará de expresarlos de la forma más clara para lograr una comprensión del proyecto y al final un juicio sobre el éxito del mismo.

3.1 Agua potable, trasiego y abastecimiento.

Como se dijo en apartados anteriores el trasiego de agua potable desde las nacientes y zonas de captación hasta los usuarios finales, es un proceso complejo que tiene varias etapas. Todas y cada una de ellas deben ser controladas y monitoreadas de forma crítica para mantener un servicio de calidad en todos los aspectos.

Los sistemas de acueductos están conformados por una serie de bloques más pequeños entre los que se incluyen las tomas de captación del líquido, los tanques de almacenamiento, planta potabilizadora, estaciones de bombeo y rebombeo y una intrincada red de tuberías de distribución que juntos permiten el manejo del líquido.

3.2. Acueducto de San Ramón – Palmares.

El abastecimiento de agua potable para las zonas de San Ramón y Palmares de Alajuela es manejado mediante un sistema de acueducto compartido, el cual tiene la responsabilidad de brindar el servicio a aproximadamente 75000 habitantes de esa región. En el caso de la parte del acueducto en San Ramón, esta es la encargada de la captación de la totalidad de agua que se ve trasegada por este sistema.

La decisión de que fuese un acueducto compartido surge por la falta de agua que se presenta, también, en el sector de Palmares. Pero al ser Palmares un cantón relativamente pequeño y de una población reducida, se hace el abastecimiento con el agua proveniente de San Ramón.

Por otra parte, la sección del acueducto que abastece a Palmares no cuenta con ningún pozo o naciente, sino que se encarga solamente del rebombeo del agua hacia ese sector. Finalmente el sistema completo está conformado por 15 estaciones.

Este servicio debe cumplir con normas de alta calidad al ser agua para consumo humano. Es por ello que su control es regulado mediante pautas tanto nacionales como internacionales de forma que se asegure que el producto brindado a los clientes no represente ningún tipo de amenaza o efecto negativo para su salud.

La región en cuestión tiene una particularidad y es que posee de un limitado acceso a fuentes de agua, es decir, en el sector de San Ramón no hay gran abundancia de fuentes naturales de agua. Es por esto que el manejo de la poca que hay y que se utiliza para hacerla llegar a los habitantes de este lugar, se hace de la forma más cuidadosa y tratando de cuidar el recurso lo más posible.

3.2.1 Áreas de captación de agua

El acueducto y la región, como se dijo anteriormente, cuentan con pocas nacientes y fuentes de agua para el abastecimiento de los pobladores. De hecho la mayoría de ellas se encuentran en el distrito de Piedades Sur, mientras que también en las zonas del norte del cantón, como el distrito de Peñas Blancas, se encuentran otras pocas.

En cuanto a hidrografía en general, el territorio cuenta con gran cantidad de quebradas, pero estas no son significativas para las captaciones del acueducto. Los que sí mantienen un nivel grande de flujo de agua son principalmente el Río Barranca y el Río Piedras, que son los más cercanos a la estación que se automatizará en este proyecto.

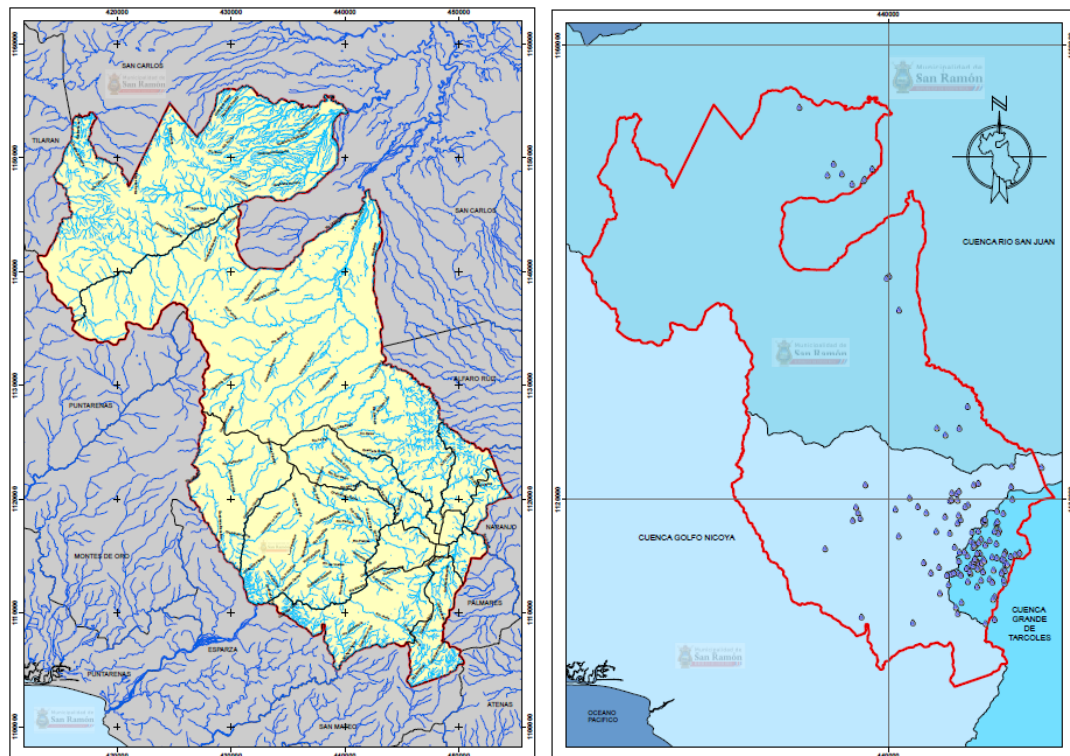


Figura 3.2. Mapa de red hidrográfica y nacientes.
(Atlas cantonal de Costa Rica)

3.2.2 Planta potabilizadora.

Como cualquier otro acueducto, el de San Ramón también cuenta con una planta de potabilización del agua. La misma es la encargada de llevar la pureza del agua a los niveles que se consideran aptos para el consumo humano y hacerla llegar a los sistemas de distribución de la mismas hacia el poblado.

3.2.3 Pozos y tanques de almacenamiento.

El sistema de acueducto cuenta con 4 pozos, los cuales son la principal fuente de agua del mismo. De ellos se extrae el líquido que luego será llevado a la estación de potabilización para luego ser distribuido.

3.2.4 Sistema de distribución.

El acueducto cuenta además, con una red de distribución que hace llegar el líquido a cada uno de los beneficiarios del servicio. La misma se compone de una serie de tanques de almacenamiento que permiten un abastecimiento continuo de agua, y estaciones de bombeo, que son las encargadas del trasiego del fluido a través de las tuberías, las cuales son el nodo final en la red de distribución.

Estas últimas cuentan con diferentes características, dependiendo del volumen de agua que transportan y las presiones que soportan.

3.3 Estación principal de abastecimiento. (Bajo Barrantes).

El presente proyecto se enfoca en la estación de Bajo Barrantes en el distrito de Piedades Sur del cantón de San Ramón. Esta es la principal fuente de abastecimiento para el acueducto y los pobladores del sector.

Esta estación capta el agua de un pozo perforado que llega a una fuente subterránea. De ahí toma el líquido y lo bombea al tanque Los Tremedales, desde donde es llevado a las siguientes estaciones en el proceso de potabilización y distribución de la misma.

Esta estación se encuentra en el sector conocido con el mismo nombre, Bajo Barrantes, y llamada así puesto que el lugar es un tipo de depresión topográfica. Se ubica a aproximadamente quince kilómetros del centro de San Ramón en dirección oeste.

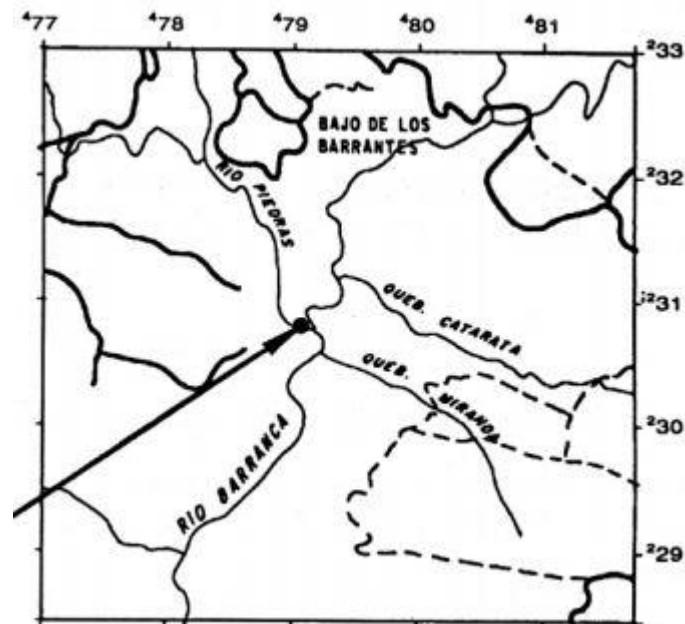


Figura 3.3. Mapa de ubicación, Bajo los Barrantes.
(Revista geológica América Central, 1993)

3.3.1 Criticidad de la estación Bajo Barrantes

Bajo Barrantes es la estación principal de captación y bombeo de agua del acueducto. Esto supone que lleva la tarea de mantener su operación ininterrumpida, permitiendo un flujo continuo del líquido hacia los clientes finales.

Se destaca que el sistema que se implemente debe tener una confiabilidad muy alta puesto que una falla sería crítica y supondría el corte del servicio hacia los usuarios, algo que es muy negativo para el funcionamiento e imagen de la empresa que brinda dicho servicio.

Y es que la funcionalidad de la estación y su capacidad de entrega de agua es tan crítica que se considera que si esta falla, en tan solo una hora y media se vería afectado el abastecimiento y se dejaría a gran cantidad de las personas sin el servicio de agua. Al ver esto se puede poner en perspectiva anotando que en otros sectores el tiempo que puede permanecer detenida una estación, sin verse afectado el suministro de agua, puede ser de hasta el doble o más que en este caso de Bajo Barrantes. Un claro ejemplo, y con el que se trabajó en un proyecto anterior en la empresa SOATI, es en el acueducto de Limón, donde este tiempo era de tres hora de baja.

Así que esto hace ver la alta confiabilidad que debe tener el sistema que se diseñe y luego se implemente para la mantención del servicio de forma continua y correcta.

3.4 Transferencia eléctrica.

Una transferencia eléctrica consiste en un sistema, generalmente compuesto por una serie de interruptores, que permite el manejo de cargas entre dos o más fuentes de alimentación. Esta conmutación de fuentes se realiza debido a algún tipo de fallo o

fluctuación en los parámetros de alguna de ellas que puedan tener efectos perjudiciales sobre el funcionamiento de las cargas conectadas.

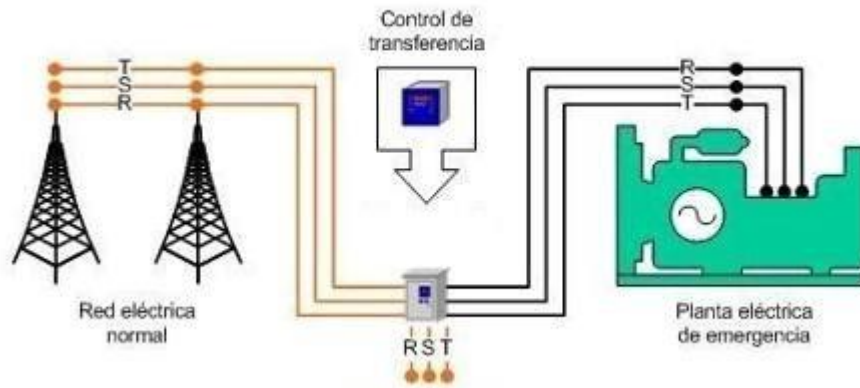


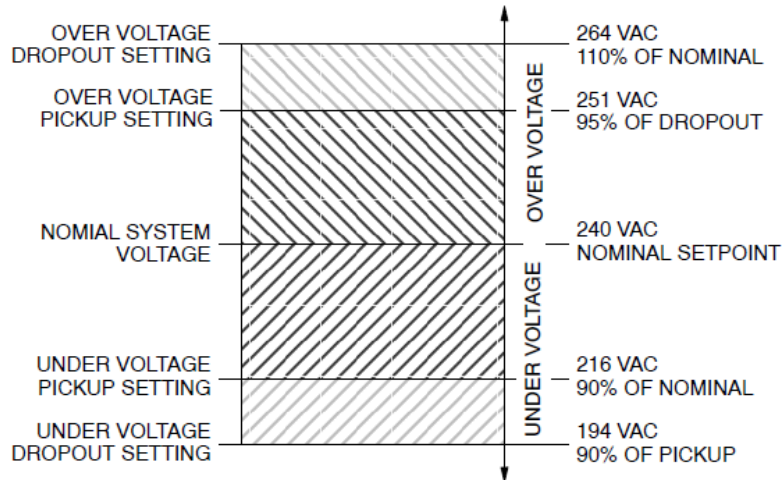
Figura 3.4. Esquema simplificado de red de transferencia-alimentación.

Los interruptores de la transferencia son generalmente automáticos, esto con el fin de proveer un sistema que no necesite la operación manual, sino que al detectar una anomalía, realice el cambio necesario para mantener la regularidad del servicio. Es por esto que se tiene que conjugar con un medidor de parámetros eléctricos que es quien le dirá a los interruptores el momento en que se da un evento crítico en la alimentación eléctrica. Dichos medidores mantienen un nivel constante de vigilancia del circuito eléctrico, asegurando así el correcto funcionamiento de la transferencia en cualquier momento.

Los parámetros que principalmente se ven monitoreados son el voltaje y la frecuencia, aunque en otras ocasiones también se controla la corriente u otras variables de importancia.

Para determinar el momento en que es necesario realizar una transferencia a una fuente alternativa, se designan niveles aceptables de cada uno de los parámetros medidos de forma que si se encuentran por sobre o por debajo de dicho rango, se da la señal a la transferencia para realizar la conmutación. El rango es establecido según la criticidad que representa la continuidad de alimentación eléctrica para la

planta o sistema, pero en general se toman valores de entre un 90% y hasta un 110% del funcionamiento normal como los límites del rango de funcionamiento aceptable.



**Figura 3.5. Ejemplo de rangos aceptables de voltaje de fuente eléctrica.
(Cummins Transfer Switches – Application Manual)**

El funcionamiento del interruptor de transferencia se da cuando se detecta un problema en la fuente primaria de energía. En ese momento se inicia el proceso de arranque del generador de respaldo. Una vez que dicho generador esté funcionando y haya estabilizado el voltaje correcto, el interruptor cambiará la potencia al generador.

Una vez realizada la transferencia a la fuente secundaria o alternativa, el interruptor seguirá vigilando la fuente primaria de modo que si la fuente principal se restablece, se hará la retransferencia, en esta ocasión desde el generador hacia la fuente primaria.

3.4.1 Tipos de transferencias e interruptores.

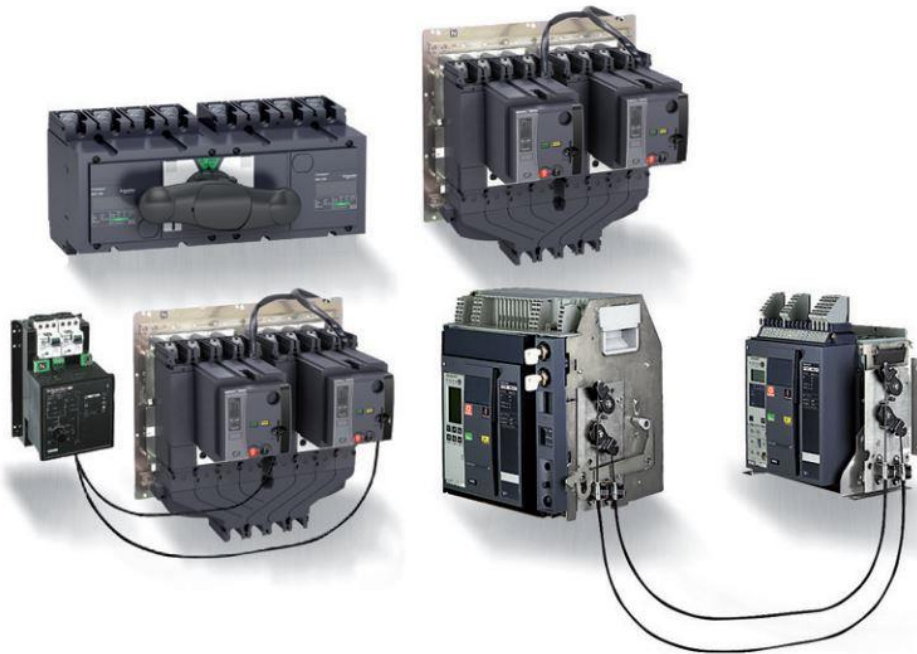
La principal división en cuanto a transferencias eléctricas, se basa en su modo de accionamiento. Estos sistemas pueden ser automáticos o manuales y en casos

específicos se utiliza una combinación de ambos modos para el control de distintos sectores de las plantas que son alimentadas.

Primeramente se tienen las transferencias automáticas. Estas se encargan de monitorear en todo momento los parámetros de alimentación de la fuente de energía y detectar cuando se dan fallos para, con una señal propia, realizar el procedimiento de encendido del generador y la conmutación entre las alimentaciones. Este tipo de transferencias permiten un control continuo de la línea de modo que no es necesario mantener un operario vigilando los datos eléctricos del sistema, sino que se tiene la seguridad de que la correcta actividad de la transferencia permitirá una alimentación constante y apta para los procesos de la planta o industria.

De igual manera se tienen transferencias manuales. Las mismas son capaces de monitorear las variables del circuito eléctrico, pero no realizan el cambio de fuentes de forma automática, sino que solamente envían una señal sobre la necesidad de realizar dicha acción y esta se efectúa mediante el accionamiento de un elemento manual por parte de un operario.

Finalmente existen sistemas que combinan ambos modos de intervención. Se tiene una sección de las cargas, de las cuales la necesidad de una alimentación eléctrica continua y estable se considera crítica para funcionar, que son conectadas a una transferencia automática, mientras que las demás, en las que no es esencial un mantenimiento continuo de la alimentación, sino que permiten variaciones menores en las variables eléctricas, son manejadas de forma manual.



**Figura 3.6. Ejemplos de transferencias eléctricas
(Catálogo de transferencia de redes, Schneider Electric)**

En cuanto a beneficios, cualquiera de los dos tipos de transferencias dará resultados parecidos, siempre y cuando sean usadas acorde a las necesidades del sistema. En el caso de las automáticas se debe tomar en cuenta que no se necesita mantener una persona a cargo de realizar el cambio, como sí se hace en las manuales, de forma que se puede ahorrar tiempo y es un sistema de conmutación más fácil pues no se tiene la injerencia del personal.

Cabe mencionar que generalmente se asocian con fuentes de alimentación ininterrumpida (UPS por sus siglas en inglés) que, durante los pequeños instantes en que se da el cambio de alimentación, permiten al sistema seguir funcionando.

3.5 Sistema de presión de agua constante.

Unos de los principales factores que se deben tener en cuenta a la hora de realizar manejo de líquidos, en este caso concreto, agua, es la presión que se brinda a la salida del sistema de bombeo. Esto porque de acuerdo a esta presión es que se logrará llevar el fluido a los diferentes sectores que lo necesitan. Una baja presión traerá consigo falta de abastecimiento para los usuarios del servicio y una muy alta presión podría generar hasta rupturas en las tuberías de los acueductos.

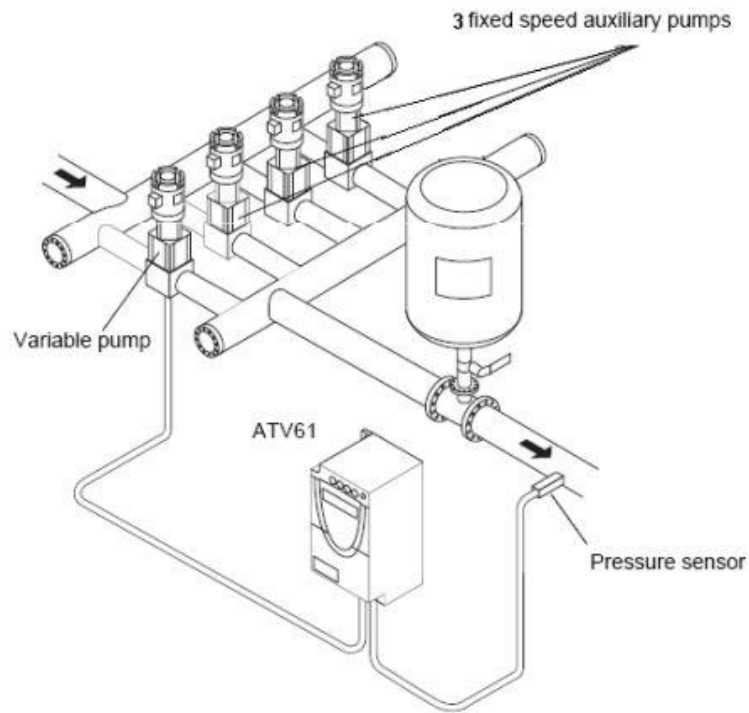
Es por la importancia de mantener esta variable bajo control, que se implementan sistemas que permitan conservar la presión de la estación dentro de un rango de valores aceptables, establecido de acuerdo a las necesidades particulares del acueducto.

Esta función de variación o adecuación de la presión se realiza mediante el control de las bombas impulsoras de agua. Para esto, se usan dispositivos de medición de los que se obtienen los valores a los que se encuentra el sistema y de acuerdo a parámetros establecidos en el control, se realizan modificaciones a las velocidades de las bombas o a la apertura de válvulas, logrando así llevar esos valores a los esperados.

Para determinar los parámetros adecuados de funcionamiento de las bombas se tuvo que realizar un exhaustivo análisis mecánico que incluía determinación de las características físicas de los equipos, obtención de curvas de rendimiento, entre otros.

Al igual que en el apartado anterior de transferencias eléctricas, en el caso de los sistemas de presión constante se debe hacer un monitoreo constante de esta variable para permitir una acción inmediata o lo más rápido posible ante variaciones

en la misma. Además se cumple con una regulación dinámica de la presión, logrando así una alta efectividad ante fluctuaciones.



**Figura 3.7. Diagrama de un sistema de presión constante.
(Catálogo Altivar, ATV61, Schneider Electric)**

El sistema para lograr la presión constante de agua se compone de una serie de elementos que juntos permiten el control de dicha variable. A continuación se detallan estos para establecer el papel que juega cada uno dentro de la configuración.

3.5.1 Controlador.

El cerebro del sistema consiste de un controlador que generalmente es un PLC (controlador lógico programable), que tiene a su cargo el obtener todos los datos del sistema y tomar decisiones de acuerdo a la información recopilada de los otros dispositivos.

Tiene en su programación los parámetros de funcionamiento del sistema de modo que logra determinar, mediante funciones planteadas en su memoria, cuándo es que se necesita hacer una variación en las estaciones de bombeo para lograr mantener la presión de agua en los niveles aceptables.

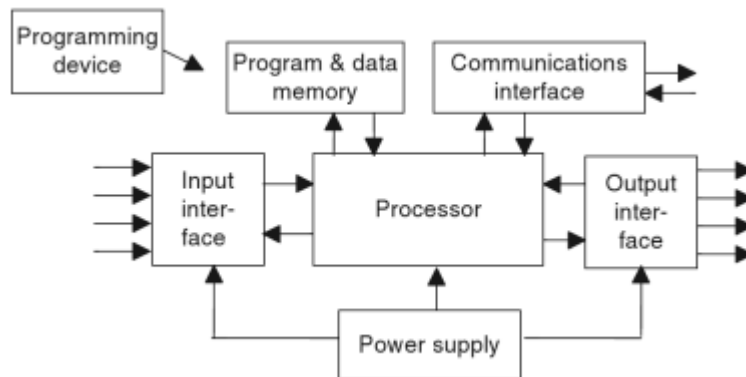


Figura 3.8. Estructura de un PLC
(Bolton, W. 2009)

Además de recopilar información, es el encargado de gestionar la comunicación entre los dispositivos que conforman el sistema. Para ello hace uso de diferentes protocolos de comunicación industrial, de los cuales la mayoría es un estándar a nivel mundial, logrando la integración de sistemas.

Es en su programación donde se toman los datos obtenidos de los sensores ubicados en la planta, se realizan una serie de operaciones lógicas, algebraicas y matemáticas para que finalmente él mismo pueda intervenir en el control de las bombas y de esta forma regular la presión del agua en las tuberías. Dicho control se hace, en la mayoría de los casos, mediante variadores de velocidad o frecuencia que modifican el funcionamiento del sistema de bombeo.

Actualmente se pueden utilizar PLCs de propósito general, que son los que no funcionan para una aplicación en específico por lo que tampoco cuentan con funciones especiales, así como controladores dedicados a este tipo de sistema.

Estos últimos cuentan con una serie de herramientas pensadas para el control de presión de sistemas de fluidos. Los mismos tienen una fácil operación pues integran una programación principal a la que solo se deben ingresar los parámetros de operación deseados y él se encarga de establecer las variaciones que se deben implementar dependiendo del caso de fluctuaciones que se tenga.



Figura 3.9. PLC Compact Mitsubishi: MELSEC FX3U
(Bolton, W. 2009)

Además, actualmente los controladores traen incorporados métodos de alternancia automática de bombas, establecimiento de niveles de referencia de forma fácil, protecciones y alarmas ante errores y fallas, métodos de diagnóstico tanto del sistema como de él mismo y otras características que hacen que su uso haya crecido aceleradamente en los últimos años. Inclusive se pueden encontrar sistemas integrados que, en un solo paquete incluyen la bomba, el controlador de frecuencia, el controlador principal y el sensor de presión, como un beneficio para el usuario.

3.5.2 Sensores de presión.

La realimentación del sistema se logra mediante el uso de sensores en los puntos de salida al sistema de distribución del acueducto. Estos son los encargados de tomar datos sobre los valores de presión en las tuberías y transmitirlos, mediante diferentes

señales al controlador principal para que este tenga información actualizada y correcta del estado en que se encuentra la estación.

Los sensores de presión, o transductores, son elementos que transforman una variable física, como es la presión, en una señal eléctrica, de modo que sea entendible para los elementos computacionales de automatización en el procesamiento de datos y que son encargados de incluirlos en la lógica de control para obtener respuestas ante las alteraciones en dicha señal.

Para cubrir todas las necesidades del mercado se cuenta con una amplia gama de transductores que varían en condiciones de protección, rangos de medida, precisión, protocolos de comunicación y forma de construcción.



**Figura 3.10. Gama de sensores de presión SITRANS P de SIEMENS
(Siemens Automation and Instrumentation)**

Para medir la presión se usan sensores que están dotados de un elemento sensible a esta variable y que emiten una señal eléctrica al variar la presión o que provocan operaciones de conmutación si esta supera un determinado valor límite.

Existen varios tipos de sensores de presión entre los que destacan los sensores electromecánicos y mecánicos. Estos últimos divididos en los de medición directa y los elásticos. Algunos de los más usados son los elásticos que, como se dijo anteriormente, cuentan con un elemento sensible a la presión y que normalmente toman mediciones de esta mediante la determinación de la deflexión o deformación sufrida por los elementos dichos. Teniendo esta medida de deformación se hace una serie de relaciones físicas y matemáticas para lograr determinar la presión en el sistema.

3.5.3 Bomba de agua

Una bomba está definida como una máquina que transforma la energía mediante la cual es accionada en energía para un fluido, de forma que el mismo es presurizado o movilizado, dependiendo de las necesidades bajo las que son instaladas. Esta adición de energía, en este caso al líquido, es la que incrementa la presión del mismo.

En los sistemas de acueductos son uno de los principales y más importantes elementos. Esto porque permiten el movimiento del agua a través de los diferentes ductos de distribución hasta hacerla llegar a los usuarios del servicio. Un acueducto sin el sistema de bombeo no tendría razón de ser, puesto que aunque existen medios, por ejemplo por la acción gravitatoria, de trasegar el agua a diferentes lugares, es muy difícil que la configuración completa del sistema permita que este método sea usado en la totalidad del acueducto.

3.5.3.1 Clasificación de bombas según su principio de funcionamiento.

- Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas: basan su funcionamiento en principios de hidrostática, donde el aumento de presión se da debido a variaciones en las paredes las cámaras del dispositivo. Se tiene un propulsor que es el encargado de generar cierto volumen positivo en cada ciclo de inclusión de líquido. Entre esta clasificación destacan las de émbolo alternativo y las volumétricas rotativas o rotoestáticas.
- Bombas rotodinámicas: estas se rigen por la hidrodinámica y el intercambio de cantidad de movimiento entre el líquido y la máquina. En este tipo de máquinas existe un aparato giratorio que genera campos de presión, transfiriéndola al fluido. En este caso el flujo del fluido es continuo puesto que el movimiento del aparato interior también lo es. A su vez este tipo de bombas se dividen en radiales o centrífugas, que son de las más usadas, axiales y diagonales o helicocentrífugas.

3.5.3.2 Clasificación de bombas según el tipo de accionamiento.

Las bombas pueden tener distintos métodos de accionamiento, osea la forma en la que estas son activadas. Debido a los diferentes tipos de configuración de los sistemas hidráulicos se pueden accionar las bombas de variadas formas, dependiendo de esto se distinguen los siguientes tipos:

- Electrobombas: son aquellas accionadas, de forma genérica, por un motor eléctrico. No deben confundirse con las motobombas que son las accionadas por motores de combustión interna.
- Bombas neumáticas: Son bombas en las que la energía de entrada es

representada por energía neumática, proveniente normalmente de aire comprimido, y es por medio de esta que se da la acción de bombeo.

- De accionamiento hidráulico: son aquellas accionadas por la misma acción del agua.
- Bombas manuales: como su nombre dice son las que necesitan de la acción humana para ser operadas. Si no es así no cumplirán la función de bombeo.

En la actualidad y en el escenario que es Costa Rica, cada acueducto cuenta con estaciones de bombeo y rebombeo que se encargan de mantener la presión en las tuberías de forma que el servicio no se vea interrumpido. Estos dispositivos son los que se dirigen para controlar el trasiego del líquido bajo parámetros adecuados.

En una de estas estaciones de bombeo es que se desarrollará el presente proyecto, controlando principalmente la velocidad de las bombas de forma que se obtenga una presión constante a la salida del circuito hidráulico, de acuerdo a las demandas del cliente.

3.5.4. Variador de velocidad.

Desde los inicios de la industria los motores de corriente continua fueron usados de forma generalizada por la facilidad que, entre otras ventajas, supone variar la velocidad a la que funcionan los mismos. Pero tenían otras deficiencias en su funcionamiento y aplicación como las chispas y desgaste que se daba en las escobillas y el colector y la necesidad de usar motores de corriente alterna para equipos que así lo requerían.

El problema técnico que surgía con éstos era la dificultad para modificar su velocidad, que es uno de los parámetros más importantes de controlar para el funcionamiento de las máquinas.

Debido a esta problemática, surge la necesidad de controladores de velocidad que puedan utilizarse en corriente alterna y que den una modificación eficiente de esta característica. Para subsanar esta necesidad se implementan los variadores de velocidad o frecuencia que, como su nombre lo indica, realizan una función de control y variación sobre la velocidad de funcionamiento de los motores. Esto lo logran variando la frecuencia de la alimentación eléctrica de las máquinas.

En la descripción de los motores se tiene una ecuación donde se observa la relación de los parámetros de funcionamiento de los mismos para la obtención de un valor determinado de giro del mismo. Esta es la que se muestra a continuación y que permite ver que lo que modifica la velocidad (N) es la frecuencia (f) y el número de polos (p) que tiene el motor.

$$N = \frac{60*f}{p} \quad (3.1)$$

Ecuación 3.1. Velocidad de un motor en corriente alterna.

(Álvarez, M., 2000)

Una de las opciones para variar la velocidad era la modificación del número de polos del motor. Pero esto era una solución impráctica y engorrosa puesto que se debía o desarmar el motor o inventar un sistema que pudiera sacar o meter polos a funcionamiento, de forma dinámica.

La otra opción es la variación de la frecuencia de operación, y aquí es donde aparecen los variadores o convertidores, que son los encargados de tomar la frecuencia normal de entrada y convertirla según la velocidad necesaria en el motor.

Para más claramente explicar el funcionamiento, lo que hace es que a partir de la corriente de entrada, que no siempre tiene la frecuencia deseada, genera una nueva corriente alterna con la frecuencia y tensión necesarias para accionar el motor a la velocidad deseada. Dicha regulación y transformación de la frecuencia se realiza mediante una serie de componentes de un circuito electrónico que tienen a su cargo dicha función.

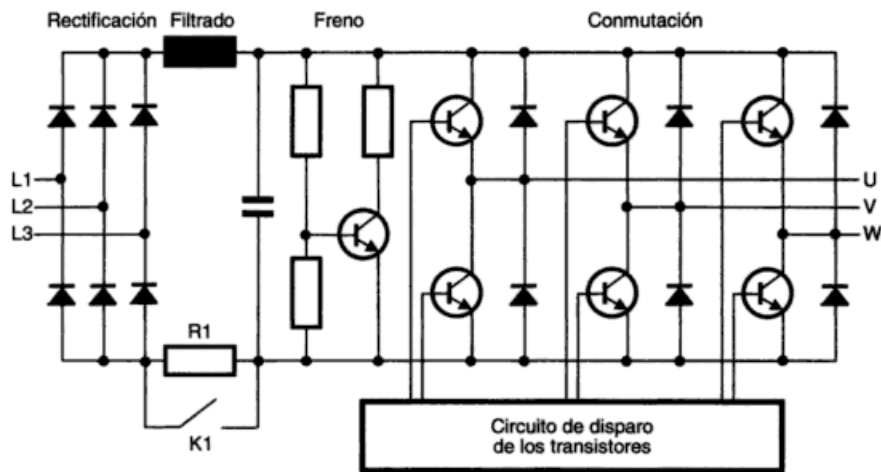


Figura 3.11. Esquema de un convertidor de frecuencias
(Álvarez, M. 2000)

3.6 Protocolos de comunicación industrial.

En la industria actual se escucha constantemente el término de protocolos de comunicación. Este es uno de los componentes más importantes de un sistema automatización en el que se cuente con una red de diversos dispositivos de control y monitoreo.

En principio un protocolo de comunicación es un conjunto de reglas o normas que permiten el intercambio de datos e información entre una serie de dispositivos en una red. Esto es, el lenguaje que permite que estos diferentes elementos hablen entre sí. Es por esto que en caso de que sea necesario comunicar dos o más dispositivos, de

forma que compartan datos del proceso o del sistema, estos deben poder hablar un mismo idioma o un mismo protocolo

3.6.1 Modelo OSI

Actualmente se tiene un modelo internacional estandarizado llamado OSI (Open System Interconnection), creado por la ISO (International Standards Organization) y que se publicó en la norma ISO 7498 en la que se da una serie de bases comunes para la descripción de todas las redes informáticas de forma que se logre una comunicación universal entre los dispositivos industriales.

El modelo OSI cuenta con 7 capas en las que cada una describe una parte de los elementos necesarios para la comunicación y que tienen características comunes para cumplir sus funciones. Van desde la capa que describe los posibles soportes físicos para la transferencia de información, hasta la última que indica el nivel de aplicación de usuario que son los programas finales con los que trabaja el personal.

A continuación se observa una imagen en la que se describen cada una de las 7 capas del modelo OSI.

N°	Capa OSI	Función de la capa	Ejemplos
7	Aplicación	Es el interface con el usuario; hace llegar las peticiones a la capa de presentación	HTTP, SMTP, POP3, FTP, Modbus.
6	Presentación	Define como se representará la información, de tal manera que cualquier sistema la interprete.	HTML, XML.
5	Sesión	Garantiza las correctas comunicaciones y conexiones entre los sistemas. Define la apertura de las sesiones sobre los equipamientos de la red.	ISO8327, RPC, Netbios.
4	Transporte	Permite establecer una comunicación de un extremo a otro, segmentar y montar datos, controlar el flujo, detectar errores y repararlos.	TCP, UDP, RTP, SPX, ATP.
3	Red	Se ocupa del transporte de paquetes (datagramas) a través de la red.	IP, ICMP, IPX, WDS.
2	Conexión	Permite establecer, a través de un soporte físico, una conexión libre de errores.	ARCnet, PPP, Ethernet, Token ring.
1	Física	Define los protocolos para el intercambio de bits y los aspectos eléctricos, mecánicos y funcionales del acceso a la red.	CSMA, RS-232, 10 Base-T, ADSL.

Figura 3.12. Capas del modelo OSI
(Redes Industriales Schneider Electric, Capítulo 9)

3.7 Redes de comunicación industriales.

En este apartado se explica uno de los niveles inferiores de la pirámide de automatización, que es en la que se encuentran los dispositivos de campo. Esos son los que actúan e influyen directamente los diferentes procesos productivos.

Las comunicaciones en este nivel deben cumplir una serie de criterios de forma que la información que es manejada sea transmitida correctamente, en cuanto a tiempos de transferencia, dado que generalmente se necesitan datos en tiempo real o con bajos períodos de actualización, así como la adecuación de las transmisiones al ambiente en el que se llevan a cabo puesto que usualmente no es perfecto en cuanto a condiciones físicas así como ruidos electromagnéticos, entre otros problemas que se puedan dar dependiendo del lugar en que se obtiene y maneja la información.

3.7.1 Clasificación de las redes industriales.

Según el entorno en que son instaladas, en un ámbito industrial se diferencian varios tipos de redes:

1. Red de factoría: este tipo de redes son utilizadas en las zonas de la industria que son especialmente dedicadas a tareas administrativas, como por ejemplo las de oficinas, contabilidad, almacenes, logística, etc. La característica de estas es que manejan grandes volúmenes de información pero los tiempos de transmisión y respuesta no son críticos.

2. Red de planta: son utilizadas principalmente para la comunicación de módulos de fabricación entre sí y también con sectores como diseño y planificación. Las características de esta es que los mensajes son de tamaños variables y cubren áreas muy extensas. Además de esto, deben contar con un amplio ancho de banda para

poder así enviar paquetes de datos con ficheros completos del tipo de archivos CAD/CAM o inclusive voz y video.

3. Red de célula: caracterizadas por su uso especialmente con máquinas y equipos cuyo funcionamiento es secuencial, como por ejemplo robots, máquinas de control numérico (CNC), controladores programables (PLC), entre otros y por su capacidad para gestionar mensajes cortos de forma eficiente, incluyendo mecanismos de detección de errores y uso de prioridades, lo que hace que sean redes de alta confiabilidad.

4. Bus de campo: este tipo de red es utilizado como sustituto del cableado entre los dispositivos de control y los sensores y actuadores. Su principal necesidad es la transmisión y recuperación de datos en tiempo real, detectando y corrigiendo errores, brindando así una alta fiabilidad y facilitando la interconexión de dispositivos.

En fin y como características generales se tiene que las redes industriales, especialmente a nivel de célula y buses de campo, tienen como principales ventajas una mejor calidad y cantidad de flujo de datos, ahorro en el costo del cableado e instalación, facilidad en cuanto a ampliar o reducir la cantidad de elementos que conforman el sistema, así como la reducción de errores en la instalación y transferencia de información.

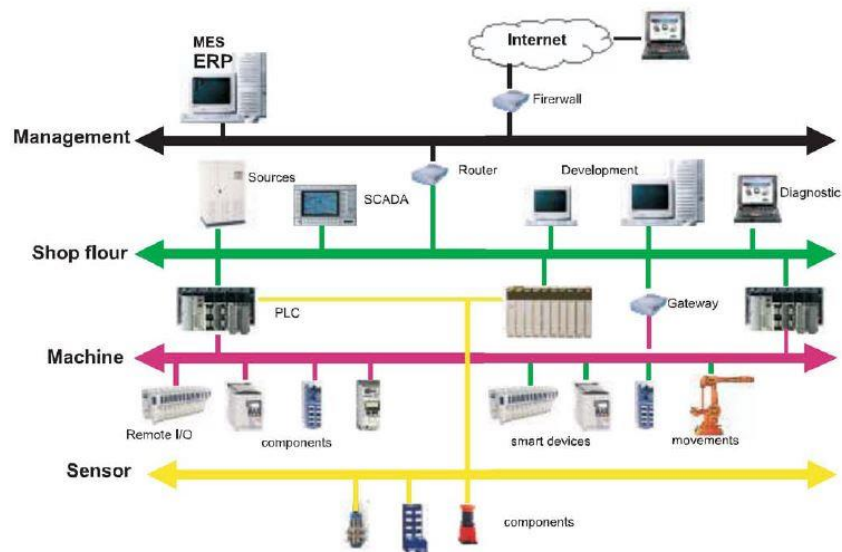


Figura 3.13. Diagrama de uso de redes industriales.
(Redes Industriales Schneider Electric, Capítulo 9)

3.7.2. Topologías de red.

La conexión de los distintos dispositivos en la red se puede realizar de diferentes maneras y esta interconexión puede adoptar diferentes formas físicas. Cada una de estas configuraciones es denominada una topología de red. Esta configuración tiene gran influencia en el rendimiento de la red y la comunicación entre los nodos.

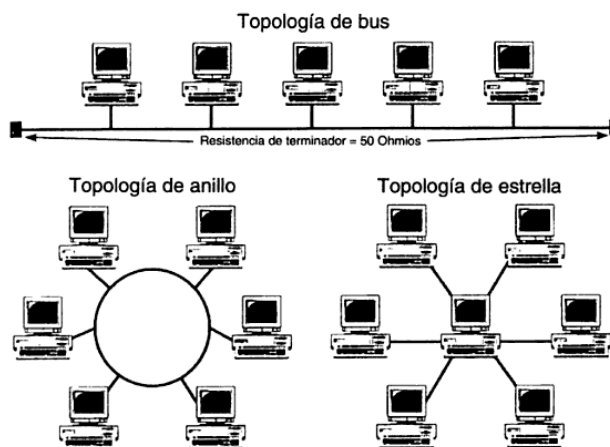


Figura 3.14 Topologías de red.
(Dembowski, K. 1999)

Cada una de estas tiene características definidas que se pueden observar en la siguiente imagen.

TOPOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS	ARQUITECTURA
Bus	Las PCs se conectan a un único cable, que se extiende a lo largo de toda la red, por donde circulan los paquetes de datos.	Ethernet
Estrella	Cada PC se conecta a un concentrador (hub o switch) a través de un cable; el concentrador reenvía los datos a las demás PCs.	Ethernet
Estrella-Bus	Una mezcla de las dos anteriores, que se utiliza para unir dos redes estrella mediante un cable, conectando un concentrador con otro. También suele usarse para subdividir una red grande en subredes.	Ethernet
Anillo	Similar a la topología bus, se extiende mediante un cable central por el cual se conectan las PCs, con la diferencia de que el cable no es lineal, sino que ambos extremos se unen para formar un círculo o anillo.	Ethernet
Estrella-Anillo	Adopta la forma física de una topología estrella, pero los datos se mueven en anillo. Al igual que en dicha topología, hay un concentrador que recibe el nombre de Mau.	Token Ring

**Figura 3.15. Características de topologías de red
(Revista Redes Avanzadas)**

Capítulo 4. Generalidades del proyecto.

4.1 Entorno del proyecto.

El proyecto se desarrolla en un contexto en el que un cliente se presenta a la empresa con el objetivo de buscar una solución para realizar un proceso de automatización a una estación de bombeo de agua potable. Dicha solicitud se realiza planteando una serie de especificaciones técnicas, de ejecución y funcionalidad que van asociadas al desarrollo y finalización del proyecto.

El proceso a automatizar consta de varias partes, entre las cuales se encuentra el diseño de un sistema de alternación que prevenga una carga de trabajo desbalanceada entre cada uno de los motores que funcionan en la estación. Esto tendrá como consecuencia el hecho de que se haga un uso adecuado de cada uno de los motores y así evitar que se den desgastes en solo algunos de ellos. Con ello se logrará que el funcionamiento de los mismos sea distribuido uniformemente logrando un uso parejo con el objetivo de mantener los motores en un estado similar de deterioro y mantenimiento.

Otra de las secciones que se busca hacer automáticas es el diseño de un controlador que permita obtener una presión constante a la salida del sistema de bombeo. Esto puesto que variaciones en la alimentación eléctrica de las bombas puede ser causa de oscilaciones en la presión de salida del agua hacia la siguiente parte del acueducto. Lo anterior no es aceptable puesto que si las oscilaciones llegan a determinada magnitud y la presión cae demasiado, esto hará que los usuarios no reciban la cantidad o presión de agua que deberían.

Finalmente se debe diseñar un sistema capaz de cambiar la fuente de alimentación eléctrica para las bombas en cuestión. Esto porque en caso de que la alimentación proveniente de la red pública nacional sea inadecuada o falle, se debe poder hacer

una transición entre dicha red de alimentación y un sistema secundario de apoyo, permitiendo mantener el servicio de agua ininterrumpido.

Con el diseño adecuado y posterior implementación de este proyecto, en todas sus secciones, se logrará tener una estación de bombeo de agua completamente monitoreada y controlada, de forma que el cliente tenga una mayor facilidad para brindar los servicios a sus usuarios y para que estos últimos lo reciban con calidad y confiabilidad. De esta forma, con la consecución de un buen diseño se logrará dar beneficios a ambas partes, tanto a la empresa encargada del acueducto como a sus clientes.

Estos beneficios se podrán ver reflejados de diferentes formas, como por ejemplo el ahorro de tiempo y dinero que percibirá la empresa por no tener la necesidad de mantener personal en la labor de monitoreo y comprobación manual o en el campo de las funciones del sistema, sino que mediante los componentes del control a diseñar, logrará hacer estas tareas de una manera remota con alta confiabilidad y facilidad. Por otra parte, los usuarios tendrán también beneficios puesto que el servicio que van a recibir mantendrá menos alteraciones y fallos puesto que un control automático de las variables involucradas en el sistema de bombeo permite tener la seguridad de que no va a hacer falta el líquido que es tan imprescindible.

Todo el proyecto será realizado como un diseño para una estación de bombeo ya existente, la misma, como el proyecto indica, se encuentra en el sector de San Ramón de Alajuela y se hace como la solución a una solicitud presentada por le empresa encargada del bombeo de este líquido.

Aquí se verán involucradas varias áreas de la ingeniería, principalmente la solución de problemas pero también el uso de sistemas de control, conocimientos en el campo mecánico y de máquinas a la hora de realizar la manipulación de los

motores y bombas, aspectos eléctricos para el manejo de los sistemas de alimentación y alternación, así como aptitudes de diseño, consideraciones financieras y valoraciones de las posibles consecuencias en el caso de la implementación del diseño propuesto.

4.2 Alcance del proyecto

El diseño debe contemplar la integración de cada una de las estaciones de bombeo y demás sistemas definidos del acueducto en cuestión en un centro de control automatizado. Las definiciones que se den en el diseño deben cumplir con los estándares de calidad específicos para cada una, así como con las especificaciones técnicas establecidas por el contratista.

Además se debe tomar en cuenta el control y monitoreo de cada una de las estaciones mediante los enlaces que brindará la empresa administradora del acueducto. Esta función debe cumplir también con requerimientos técnicos y de funcionamiento de modo que se tenga la información precisa y actualizada.

4.3 Definición del problema.

4.3.1 Generalidades.

El proyecto surge, como se dijo anteriormente, como la solución a una solicitud presentada por un cliente. Lo que se tiene es una situación en la que una estación de bombeo de agua no tiene un sistema adecuado de control y monitoreo, por lo que surge la necesidad de diseñar un sistema capaz de mejorar el funcionamiento de la planta y permitir que la empresa encargada de ella pueda mantener un registro del funcionamiento en el que se haga constar la normalidad de los parámetros que están siendo monitoreados a la hora de estar operando o, en caso de que exista

algún inconveniente o problema con alguno de ellos, se generen alarmas e indicadores que permitan la atención del imprevisto a la mayor brevedad posible. Esto con el fin de mantener el abastecimiento de forma estable y también brindar un servicio de mayor calidad al que ofrece actualmente.

El problema principal es la falta de información exacta y expedita sobre el funcionamiento de la estación de bombeo y sus componentes, de manera que cuando se dan fallos o averías en alguna parte del sistema, se deben realizar inspecciones de campo sin una guía previa o sin indicio alguno de donde pondría estarse originando dicho desperfecto. Lo anterior puede desembocar en pérdidas de tiempo y de dinero por no tener una capacidad de respuesta en tiempo real.

Además de esto, en el caso de que existan fallos en el suministro eléctrico para los motores de la estación o que se den alteraciones en la presión del agua saliente de las bombas, se verán afectados los usuarios ya sea por la falta total o parcial del líquido y esto tendrá repercusiones para la empresa en cuanto a confiabilidad, se recibirán gran cantidad de quejas y se tendrá un disgusto generalizado ante los defectos del servicio.

De igual manera al tener este problema la empresa podría ser sancionada por no cumplir con sus obligaciones, además de que podría ver su reputación dañada por la misma situación.

4.3.2 Síntesis del problema.

No se cuenta con un sistema automático que monitoree y brinde información veraz y en tiempo real, sobre el correcto funcionamiento de la estación de bombeo de agua para así mantener un abastecimiento constante y correcto del líquido hacia los clientes de la empresa.

4.4 Enfoque de la solución.

A partir del problema planteado anteriormente se procede a averiguar una posible solución a esto. En primera instancia se analizaron los aspectos principales que deben ser controlados o monitoreados de manera que se logre obtener información veraz y en tiempo real sobre el desempeño de la estación de bombeo. En este caso se establecieron los parámetros principales que están involucrados en el funcionamiento de las bombas, los cuales serían la fuente de alimentación eléctrica, el voltaje y corriente de entrada a los motores, la presión saliente de las bombas hacia los usuarios y la forma de actividad que realizan los diferentes motores.

Con las principales variables del sistema ya establecidas se procede a formular una serie de posibles soluciones de manera que luego se pueda hacer la escogencia de la que da las mejores prestaciones tanto a la empresa como al usuario.

El proceso que se realiza, concretamente, es el bombeo de agua mediante una serie de cuatro motores, de los cuales se ponen en funcionamiento de a tres por cada período de función. Después de pasado este periodo de tiempo se alterna uno de los motores con el que se encontraba apagado para permitir un uso balanceado de los cuatro. Estos son los responsables de bombear el agua que seguirá por el acueducto para finalmente llegar a los usuarios.

La alimentación eléctrica proviene de la red pública pero, en caso de que suceda un imprevisto o fallo en la red, se cuenta con un generador de apoyo para prevenir interrupciones en el flujo de líquido. Este debe empezar a funcionar cada vez que se dé una fluctuación significativa o un corte en el fluido eléctrico.

Finalmente, uno de los aspectos más importantes del proceso en cuestión, es el mantener una presión constante de agua en las tuberías de salida, esto porque los niveles preestablecidos de presión permiten que los usuarios reciban la cantidad de agua adecuada y a una fuerza apropiada.

A partir de un entendimiento exitoso de las etapas del proceso de bombeo y de la identificación de los principales factores y variables involucrados en este, se procede a realizar una propuesta de solución ante dicha situación.

En el caso de la alternancia en el funcionamiento de los motores se busca diseñar un sistema automático mediante un controlador programable que realice el proceso de apagado y encendido de cada uno de ellos luego de cierto periodo de tiempo en función. El controlador debe ser capaz de llevar un registro con el tiempo que ha estado funcionando cada uno de los propulsores y, cuando se cumpla el tiempo establecido, encienda el cuarto motor y apague el que ha cumplido su periodo de servicio. El mismo debe seguir una secuencia de modo que se apague el que lleva más tiempo funcionando. Dicha secuencia igualmente estará previamente programada en el controlador.

Para el cambio entre el la red eléctrica principal y el sistema de alimentación de emergencia se propone, ya sea en el mismo controlador anterior o en un módulo aparte, incluir algún sensor o medidor que permita saber cuando existan variaciones perjudiciales para la estación o cuando se haya cortado completamente el suministro eléctrico. Al saber esto, el controlador posibilitará un cambio automático entre las diferentes fuentes de alimentación de manera que el sistema de bombeo se vea lo menos afectado posible, al igual que el flujo de agua por el acueducto.

En cuanto a mantener la presión de agua constante, al igual que en punto anterior, se debe tener un medidor, de manera que se sepa cuándo la presión pasa de los límites deseados, tanto superior como inferior. Al tener una lectura en tiempo

real se procede a diseñar el modo en que se modifiquen los valores eléctricos de entrada a los motores, de forma que, al modificarlos, se logre un cambio en la propulsión del agua y así se pueda regular eficientemente la presión de salida de la misma. Al ser necesario un control automático de esta variable e inapelable el hecho de que debe ser regulada de la manera más rápida posible para mitigar los efectos de las fluctuaciones en el flujo eléctrico, se debe hacer un modelo de la planta y sintetizar un controlador adecuado que responda de la mejor manera a la hora de que sea implementado.

4.4.1 Diagrama de Pareto

En la figura 4.1 se muestra un diagrama de Pareto con los principales factores a considerar a la hora del diseño del sistema y la importancia de cada uno. Se evidencia aquí el principio para el que es usado el diagrama de Pareto que es el de visualizar que la mayor importancia recae sobre pocas actividades que deben realizarse y se establece de mejor manera las que son críticas para un proyecto exitoso.

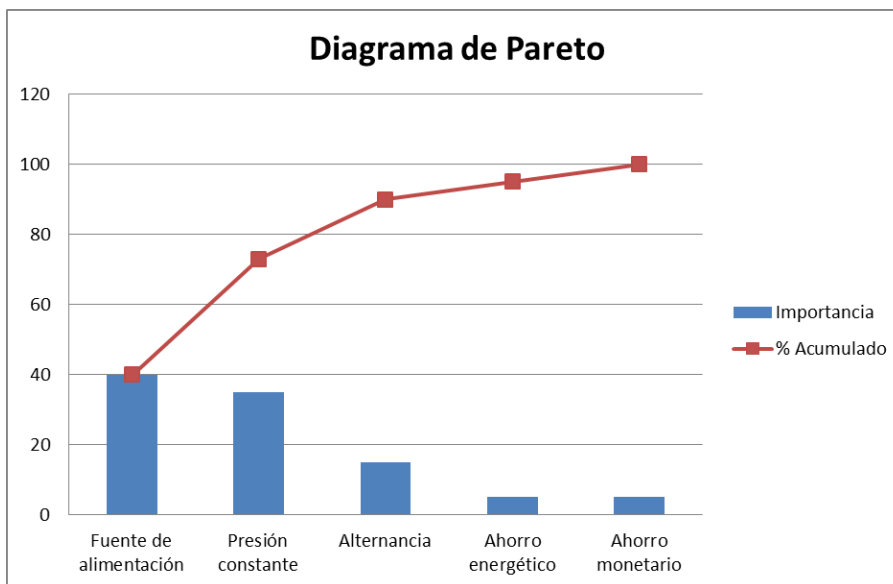


Figura 4.1. Diagrama de Pareto del proyecto.
(Fabián Blanco Piña, 2015)

En cuanto a la factibilidad de la solución que se propone, se considera apta puesto que toma en cuenta cómo solucionar cada uno de los problemas o factores que podrían ser problemáticos, lo que permite solventar las necesidades propuestas por el cliente.

Además, aunque se debe refinar la propuesta y ahondar en los aspectos técnicos que se implementarían, se considera una selección idónea puesto que presenta una facilidad de desarrollo y permite obtener beneficios mediante una inversión moderada. También se determina que, al complacer todas las peticiones del cliente se obtendrá su completa satisfacción al culminar el proyecto.

4.4.2 Diagrama causa-efecto

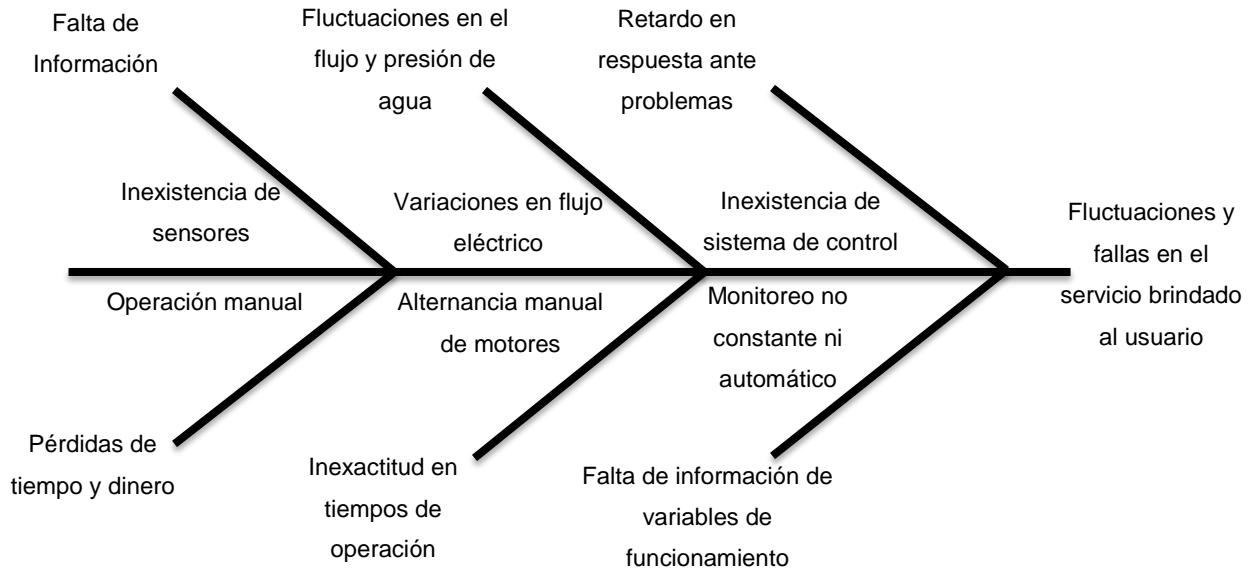


Figura 4.2 Diagrama causa-efecto del proyecto.
(Fabián Blanco Piña, 2015)

En la gráfica anterior se pueden observar las causas de los diferentes factores que afectan el proceso en cuestión. Mediante este se puede hacer una mejor organización y visualización de las mismas, lo que brinda un mejor entendimiento del por qué la necesidad planteada por parte del cliente y además identifica cuales son las causas que se deben mitigar para primeramente cumplir con el objetivo y especificaciones dadas por el cliente y solventar el problema o las carencias que actualmente se presentan.

4.5 Objetivos

4.5.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de control para monitorear la estación principal de bombeo de agua para el acueducto de San Ramón, Alajuela, de modo que se obtenga un sistema más confiable y eficaz que el actual.

4.5.2 Objetivos específicos

1. Crear una aplicación que maneje las variables de presión y la fuente de alimentación eléctrica, las cuales van a estar involucradas en el funcionamiento de la estación, de forma que responda automáticamente ante variaciones en los factores antes mencionados.
2. Diseñar un sistema que permita responder automáticamente ante fallas o fluctuaciones significativas en las variables principales de la estación de bombeo, que son la presión de descarga y la fuente de alimentación, de manera que corrija estas en el menor tiempo posible y con un alto grado de confiabilidad.
3. Cumplir satisfactoriamente las tres principales solicitudes hechas por el cliente que son la alternancia en la carga de trabajo para los motores, el monitoreo y control de la presión de salida del agua y finalmente la capacidad de permutar entre alimentación desde la red eléctrica o desde el generador de reserva.

4.6 Procedimientos para la ejecución del proyecto

Paso 1. Primeramente se abordó el tema del control de periodos de funcionamiento de cada uno de los motores y el cómo realizar la permuta entre ellos cuando sea debido. Para ello se realiza primero una búsqueda de información técnica de las máquinas para saber más a fondo la forma en que funcionan.

El principal aspecto a tomar en cuenta en este caso es el método de encendido que se debe implementar para dichos motores. Esto porque, dependiendo de las magnitudes de tensión y corriente eléctrica que circulan por ellos y su capacidad de potencia, la forma de encendido puede variar y para no incurrir en daños a las máquinas se debe realizar el proceso de encendido siguiendo los pasos establecidos.

Paso 2. Una vez determinado esto se continúa con la programación de un control que, luego de cierto periodo de tiempo, proceda a realizar dicho desarrollo de forma que encienda el motor que se encontraba apagado y al estar este completamente en funcionamiento, realice el cambio con otro de forma gradual para no afectar ni la vida de los motores ni la salida del sistema de bombeo.

Paso 3. Luego de esto se incluye un sensor a la entrada de la red de alimentación eléctrica de modo que, con una programación previamente diseñada y con la información proveída por dicho sensor, se pueda hacer, cuando sea necesario, el intercambio entre esta fuente de alimentación y el generador de apoyo. De forma que, en caso de una falla en el fluido eléctrico o de fluctuaciones de gran magnitud que puedan afectar el funcionamiento de la estación, se pueda realizar, automáticamente, el paso a la alimentación secundaria.

Esto se comprobará mediante simulaciones y pruebas de campo para establecer la correcta actividad del sistema.

Paso 4. La actividad siguiente consiste en realizar un monitoreo, de nuevo con la inclusión de sensores, de forma que se tenga una lectura exacta y en tiempo real de los valores de presión de salida del agua en el acueducto. A partir de estas lecturas se procede a sintetizar un controlador que responda ante variaciones en el funcionamiento de las bombas y las corrija manteniendo la salida a presión constante.

Esta parte se hará mediante el modelado matemático de la planta a controlar, que en este caso serán las bombas, y su salida que es la constante de presión. Luego de esto se realiza una serie de pruebas en las que se excita la planta con una determinada señal de entrada y se observa su comportamiento. Teniendo esta información se obtiene un modelo de controlador de forma que se mitiguen las variaciones a la entrada y no se propaguen a la salida que es el resultado deseado, completando así las principales exigencias del cliente.

4.7 Metodología de trabajo.

Tabla 4.1. Método de trabajo
(Fabián Blanco Piña, 2015)

Objetivo	Actividades a realizar	Resultados esperados
Crear una aplicación que maneje las variables de presión y la fuente de alimentación eléctrica, que van a estar involucradas en el funcionamiento de la estación, de forma que responda automáticamente ante variaciones en los factores mencionados.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar mediciones de los parámetros de forma que se tenga una clara idea del comportamiento de estos durante la operación de la estación de bombeo. Determinar cuáles son las causas de esas variaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> Obtener una visión clara de los cambios en los parámetros de alimentación eléctrica y de presión de agua y saber las causas que los provocan.

	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer el modo más factible para mitigar los efectos de estas variaciones. • Aplicar dicho método en una aplicación para un controlador lógico programable de forma que se logre mantener una operación estable de la planta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Escribir un programa que disminuya o anule los efectos negativos de estos cambios en el funcionamiento de la planta. • El programa escrito en el software del PLC.
<p>Diseñar un sistema que permita responder automáticamente ante fallas o fluctuaciones significativas en las variables principales de la estación de bombeo, de manera que corrija estas en el menor tiempo posible y con un alto grado de confiabilidad.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer los componentes necesarios para tener un sistema que monitoree la estación de bombeo. • Verificar que se toman datos veraces de las variables de la planta. • Comprobar que el sistema diseñado logra corregir, automáticamente, los errores o fallos generados en el acueducto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lista de componentes. • Muestras de las mediciones dadas por el sistema diseñado por el estudiante. • Simulaciones en las que se observa el comportamiento y funcionamiento del diseño ante fallos o fluctuaciones.

<p>Cumplir satisfactoriamente las tres principales solicitudes hechas por el cliente que son la alternancia en la carga de trabajo para los motores, el monitoreo y control de la presión de salida del agua y finalmente la capacidad de permutar entre alimentación desde la red eléctrica o desde el generador de reserva.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Presentar evidencia de que se logró mantener la alternancia de las bombas de la estación, la transferencia eléctrica automática y la mantención de una presión de salida constante. • Realizar pruebas, mediante simulaciones, que permita dar cuenta del funcionamiento del sistema diseñado. • Informar al cliente y a la empresa los resultados obtenidos de la automatización. 	<ul style="list-style-type: none"> • Generar un informe en que se vean los cambios que se logran con el sistema propuesto. • Resultados de las simulaciones del sistema.
---	--	--

Capítulo 5. Desarrollo del proyecto.

Una vez que se tiene definido el problema y la forma en que se va a solucionar, así como el método mediante el que se va a implementar, se procede al desarrollo de dicha solución, dividiendo las tareas que se tienen que resolver de forma que se cumpla con los objetivos planteados en este proyecto.

5.1 Diseño del sistema de control de presión.

En la etapa de diseño del sistema, para obtener una presión de salida constante desde la estación de bombeo, se realizó una investigación mediante la cual se obtiene la información necesaria para dicho diseño.

Se debe tener en cuenta cuáles son las entradas y salidas al sistema que se va a diseñar. En este caso, y como se dijo en apartados anteriores, el sistema de presión constante se maneja mediante el monitoreo de la presión de salida y esta es modificada mediante la variación de las velocidades de las diferentes bombas impulsoras de agua que se encuentran en la estación. En particular, se tienen cuatro bombas de 350 caballos de fuerza cada una. Las mismas dividen la carga de trabajo de forma que siempre se tienen tres de ellas en funcionamiento y, mediante un sistema de alternancia que también se diseñará a continuación, se rotan los tiempos de trabajo de manera de tener una operación equilibrada de todas ellas.

En cuanto al sistema de control de velocidad y energización de las bombas, se tienen arrancadores suaves y por autotransformador. Estos, aunque cumplen con su función, no son la mejor solución puesto que no permiten un control delicado de la frecuencia y condiciones eléctricas de los equipos.

5.1.1 Implementación de variador de velocidad.

La solución que generalmente se usa en este tipo de controles son los variadores de velocidad. Estos dispositivos son los encargados de tomar las variables de presión y, mediante una programación lógica se tiene la posibilidad de que realice modificaciones en las velocidades de las bombas.

Debido al conocimiento que se tiene de estos equipos, a la experiencia en el uso de los mismos y la constante aplicación de ellos en soluciones de este tipo, se decide usar un variador de velocidad como modificador de la velocidad de las bombas, para así cambiar la presión de agua, que es la variante de interés.

En la estación de bombeo de bajo Barrantes los que controlan las bombas de agua son arrancadores suaves y arrancadores por autotransformadores y de 3 contactores por etapas. Se busca una solución al uso de estos dispositivos que suponga una mejora en la función de la planta, dando así una mejor regulación de la presión un alargando a vida útil de los equipos de bombeo.

5.1.1.1 Variador de familia Altivar.

En primera instancia se escoge un variador de velocidad de la familia Altivar de la marca Schneider Electric. Estos son variadores de propósito general y con los que se ha trabajado en soluciones anteriores en la empresa para aplicaciones como la que se tiene.

En este caso particular se escoge un variador Altivar 61. El mismo cuenta con características que permiten su implementación para el control de los equipos de la estación de bombeo.

Estos variadores constan de un control para equipos trifásicos, con voltajes desde los 200V hasta los 690V. Las bombas que se tiene son de 480V por lo que se podrían controlar mediante la conexión de este tipo de variador.



Figura 5.1. Familia de variadores Altivar.

(Catálogo de variadores Altivar, Schneider Electric, Enero 2015)

Otras de las dos prestaciones que en un inicio hicieron que se pensara en la escogencia de este variador fueron las comunicaciones del mismo. Este equipo cuenta con comunicación integrada mediante Modbus y CANopen, que son dos protocolos de uso generalizado en la industria. Además tiene la posibilidad de tener tarjetas de comunicaciones industriales como por ejemplo Ethernet, FIPIO, Modbus Plus, DeviceNet, entre otras.

La segunda característica de este equipo, que es altamente positiva para la aplicación en cuestión, es que el mismo cuenta con compatibilidad con tarjeta para el control multibombas que es para lo que específicamente se está pensando instalar.

Una vez que se selecciona este equipo, se consulta sobre alguna recomendación adicional por parte de la jefatura del departamento de ingeniería de la empresa SOATI y se da la posibilidad de escoger un dispositivo de la misma familia de

variadores pero con un enfoque diferente y que tiene una aplicación específica para el manejo de aguas. Es por esto que se hace el cambio de variador y se selecciona el que se explica a continuación.

5.1.1.2 Variador Altivar Process ATV650C

El variador de la familia Altivar Process que se escogió es específicamente el ATV650C16N4F. El mismo tiene una serie de características enfocadas a mejorar el funcionamiento del mismo cuando se utiliza para aplicaciones específicas, entre las que se encuentra el manejo de aguas y el control de bombas para esto.



**Figura 5.2. Variador de frecuencia Altivar Process ATV650C
(Catálogo variadores de velocidad Altivar Process, Enero 2015)**

La elección de este dispositivo se realizó finalmente puesto que el mismo tiene una serie de funciones específicas para el manejo de sistemas de bombeo de agua. Este cuenta con funciones como por ejemplo, el monitoreo integrado de la presión del agua, lo que hace que sea más fácil el uso de un transductor de presión y la

programación del variador de forma que las variaciones en la presión se vean resueltas de la forma más expedita posible.

También, tiene la capacidad de hacer un análisis de la bomba a la que es conectado, con solo ingresar algunos datos de dicho equipo y seleccionar características de operación. El elemento es capaz hasta de obtener la curva de eficiencia y operación de cada una de las bombas, brindando así una nueva herramienta para el monitoreo del funcionamiento de estas. Esto porque generalmente se tienen dichas curvas para estos equipos en la documentación técnica de los mismos, pero estas no se actualizan o no se adecúan al estado en el que se encuentran los equipos tanto de mantenimiento como de operación. Mientras que con el uso del variador, los datos que se obtienen son específicos para el equipo que se tiene conectado.

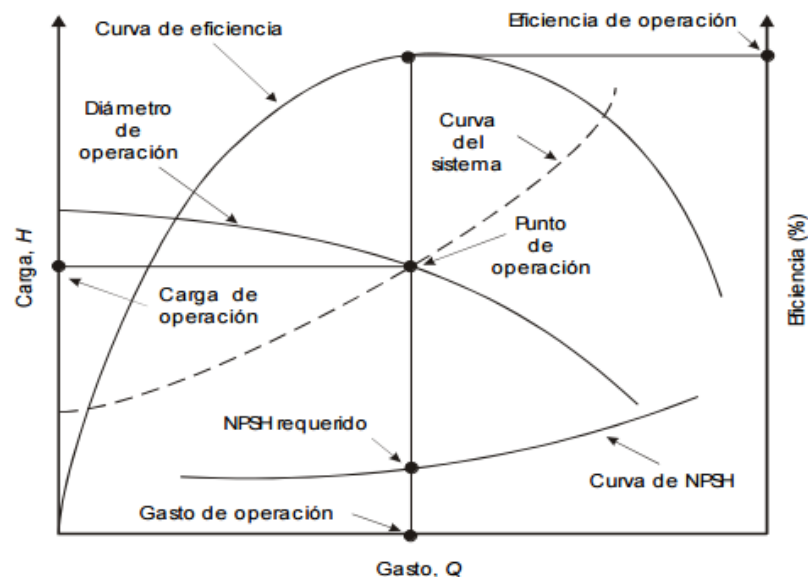


Figura 5.3. Curva característica de operación de bombas.

Esta es una de las principales características que hacen que se incline el diseño por el uso de este tipo de dispositivo. Esto y que el mismo cuenta con las características de la familia más básica de este tipo de dispositivos-

Con esto se logra obtener mejoras en la operación del sistema y es el dispositivo principal para la aplicación de control de presión para la mantención de la misma en un valor constante.

En cuanto al modelo de control de las bombas, el dispositivo permite, mediante un ingreso de datos integrado en él y con la definición de los parámetros de funcionamiento deseados, mediante una serie de cálculos internos y pruebas, se obtiene de forma automática y de igual manera se da la opción de modificar las constantes de control en caso de que sea necesario.

Por otra parte se tienen una serie de solicitudes por parte del cliente, de forma que se hace necesario adecuar la escogencia del equipo a estas. Entre ellas se encuentra la tensión de alimentación que en este caso es de 480V \pm 10% trifásico. Además, en cuanto a su principal función, que es el control de velocidad de las bombas, se hace necesario que la variación de frecuencia esté entre 0 y 500Hz. Y por último se cumplen con las características físicas que se pidieron contando con un gabinete tipo RAL 7035, con dimensiones de 2350x600x805 mm (HxWxD) y con un grado de protección IP54. En el mismo gabinete se cuenta con un sistema de enfriamiento diseñado para mantener a operación en las condiciones óptimas. El mismo se verá más a fondo en apartados siguientes de este informe.

5.1.2 Sensor de presión.

En el caso del transductor de presión, este va a llevar a cabo la función de monitorear los valores de esta variable que se tienen a la salida del sistema de bombeo. Este es el encargado de enviar una señal con dichas magnitudes al controlador principal que, mediante su programación, realizará una serie de operaciones para determinar la variación en la velocidad de funcionamiento de cada

una de las bombas, de forma que se mantenga un valor constante, y predefinido, de presión de agua.

Se tienen varias alternativas y se toma la decisión de utilizar un sensor de la marca SIEMENS de la familia SITRANS P. El mismo cuenta con una serie de funcionalidades que hacen que sea apto para la aplicación en cuestión. Tiene la capacidad de medición de la variable principal, que es la presión, pero también puede medir flujo e inclusive, en cierta configuración de instalación, es posible medir nivel con este dispositivo.

Particularmente se escoge el sensor SITRANS P DS III que cuenta con un transmisor de señales por medio de 2 cables y tiene la capacidad de medición directa de presión tanto absoluta, como manométrica, flujo y nivel de líquido.



Figura 5.4. Sitrans P DS III.
(Catálogo Familia Sitrans P, Siemens Automation)

Su uso se escoge además porque cuenta con una alta confiabilidad en sus mediciones, de hasta 0.065%. En cuanto a comunicaciones, cuenta con los protocolos HART, PROFIBUS PA y Foundation FIELDBUS, lo que permite la compatibilidad en la transferencia de datos hacia el controlador principal.

Además, otra de las características por las que se escogió este, es porque cuenta con una parametrización y configuración mediante botoneras integradas. Esto permite que el dispositivo sea adaptado a las condiciones específicas del proceso, si existe alguna modificación de estas, de una forma fácil y sin la necesidad de conectar el aparato a algún ordenador para programarlo.

De esta forma se cubre con el equipo que transforma la variable física de presión a una variable eléctrica entendible por los equipos de control. Además de cumplir con esto, se satisfacen las demandas del cliente y de la instalación en aspectos como alimentación eléctrica y compatibilidad entre equipos.

Con la implementación del sistema de control integrando el transductor de presión y el variador de velocidad, se logra obtener una presión de descarga constante hacia el sistema de distribución.

5.2 Diseño del sistema de transferencia eléctrica.

Como paso inicial para el diseño de la transferencia eléctrica, se tiene que especificar las características de la alimentación que ingresa desde las líneas principales y el generador de respaldo que se ubica en la estación de bombeo. Además se debe tomar en cuenta los voltajes y corrientes que ingresan a los gabinetes y hacia los dispositivos de control, puesto que se deben tener protecciones para que las variaciones en los parámetros eléctricos de la fuente, que en nuestro país son bastante comunes, no dañen los equipos y hagan que la planta se detenga. Esto tomando en cuenta la criticidad del funcionamiento de la misma del que se habló en apartados anteriores por su función de abastecedor principal de agua del acueducto.

Un aspecto importante es que todos los trabajos relativos a las instalaciones eléctricas y dispositivos de seguridad se sujetarán a los requisitos mínimos y recomendaciones de la norma eléctrica nacional Código Eléctrico de Costa Rica para la Seguridad de la Vida y la Propiedad. Esto se realiza por política de la empresa en la que se realiza el proyecto y además por solicitud del cliente que, por norma debe cumplir con estos reglamentos.

5.2.1 Alimentación eléctrica.

La estación de Bajo Barrantes tiene una fuente de alimentación principal proveniente de la red eléctrica pública de media tensión. La misma tiene un voltaje de 480V en una configuración trifásica con una variabilidad tolerable de 10%. Además, la red tiene una frecuencia nominal de 50/60 Hz con un rango aceptable de 5% de variación.

Todos estos parámetros son responsabilidad de la institución encargada de brindar el servicio eléctrico a nivel nacional que en este caso es el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), pero es sabido que aunque se trata de que no existan variaciones que puedan afectar equipos, se dan comúnmente. Por esta razón se incluye también un sistema de protección contra picos de voltaje que se definirá seguidamente.

La fuente de alimentación secundaria para la estación es desde un generador que, en caso de que se dé una falla crítica en el funcionamiento de la red principal, entra en funcionamiento para mantener la operación del sistema. El mismo no es proveído puesto que ya se encuentra en la estación y es propiedad del cliente pero se toma en cuenta para el diseño de la transferencia eléctrica que se implementaría. El mismo está dimensionado de forma que supla por completo las necesidades eléctricas de los equipos que están conectados al sistema.

5.2.2 Protección contra transientes.

Por causa de las variaciones que se mencionaron anteriormente que se dan en la red eléctrica pública, se considera necesario incluir en el diseño del sistema eléctrico un sistema de protección contra transientes, que son las principales razones de daño a los equipos, tanto de control como de potencia. Para dicha protección se toma en cuenta las magnitudes de alimentación que se tendrá en la estación y también los porcentajes de variación que se determina que pueden tener una consecuencia negativa sobre el funcionamiento de los dispositivos. Estos niveles de variación crítica son determinados mediante el estudio de las hojas de especificaciones técnicas de los aparatos en las que se incluyen este tipo de datos.

En este caso se decide usar una protección contra transientes de voltaje a la entrada de la alimentación eléctrica principal. El mismo sería similar al supresor de la familia SES200 de la marca ERICO. Este se especifica dado que el cliente, para quien se realiza el diseño, hizo una serie de solicitudes específicas en cuanto a normas que se deben cumplir en la selección del equipo, aunado a que, como se dijo antes, debe poder proteger en los valores de alimentación que son específicos de la planta.



Figura 5.5. ERICO SES200.
(Catálogo ERITECH SES200)

Entre sus principales características se encuentra que la protección principal es de hasta 200kA transitorios y además cuenta con una protección secundaria mediante una serie de fusibles de alta capacidad para tener una mayor confiabilidad en su funcionamiento, dado que es crítico la protección del sistema. Además de esto el elemento cuenta con una construcción basada en la norma NEMA 4X que especifica equipos diseñados para condiciones ambientales difíciles. Esto porque los equipos, aunque estarán en sus respectivos gabinetes, podrían verse afectados por la invasión de polvo y el mantenimiento en sitio no es muy seguido lo que también podría acelerar el deterioro de estos.

Su elección para este sistema se da también por su diseño modular, lo que permite que en caso de que haya algún fallo en alguno de los componentes, se tenga la facilidad de simplemente retirarlo y reemplazarlo con otro y no tener que cambiar por completo el aparato. Además para el diagnóstico rápido y general se cuenta con indicadores lumínicos mediante leds en cada uno de los módulos para determinar su estado de operación y también se tienen contactos de alarma para el monitoreo remoto del dispositivo.

Finalmente se pueden agregar alarmas sonoras pero por la ubicación de la estación y dado que generalmente no se encuentra personal en el sitio se decide no optar por estas y se prefiere el monitoreo remoto del mismo.

5.2.3 Medidor de energía.

Al igual que en el caso del sistema de presión constante se debe tener un dispositivo de monitoreo de la variable de importancia. En este caso la variable en cuestión sería la energía eléctrica y el estado de los parámetros más importantes que influyen el funcionamiento de la estación.

Para esto existen aparatos dedicados a este tipo de inspección y que señalan a los controladores principales del sistema cuando se tienen deficiencias críticas en las magnitudes de las características eléctricas de la fuente a la que está conectado el conjunto de gabinetes.

Los parámetros principales que son monitoreados por este tipo de medidores son el voltaje, la corriente, la potencia y el factor de potencia. Además existen algunos que dan la posibilidad de medir algunas otras variables como la frecuencia, fasores y armónicos que también es necesario monitorear en sistemas críticos.

La opción que se incluyó en el diseño de este proyecto es un medidor de la serie PowerLogic de la marca Schneider Electric. El mismo con del catálogo PM8000 que es considerado como uno de los medidores de gama alta que pone a disposición este proveedor.



PowerLogic PM8000 series meter.

**Figura 5.6. Medidor de energía PM8000
(Catálogo PowerLogic, Schneider Electric)**

El mismo es escogido puesto que cuenta con una medición de alta confiabilidad y respaldado por normas internacionales como la IEC 62053-22 Class 0.2S, que es uno de los rangos más altos en cuanto a precisión, y la EC 61557-12 PDM-S que

certifican el grado de exactitud del dispositivo. Dicho nivel de calidad en las mediciones es necesario por la reiterada referencia a la criticidad que supone la operación de esta estación en la red de distribución del acueducto. Dada esta necesidad se debe tener mediciones confiables para que, por culpa de una deficiente, no se den paros inesperados en el funcionamiento del sistema de bombeo.

Este medidor combina la medición de energía de sistemas trifásicos con una función de registro de datos, capacidad de configuración de alarmas y entradas y salidas para casos en que sean necesarias para el control de proceso. Estas características permiten la adecuación de este elemento al sistema de una manera que no se puede realizar con otros que tienen funciones limitadas.

El mismo tiene la capacidad de ser conectado a módulos secundarios, como los de entradas y salidas que se mencionaron antes, además de tener la posibilidad de una pantalla específica para él que puede ser conectada directamente sobre el cuerpo del elemento o de forma remota mediante un cable de comunicación.



Figura 5.7. (a) Medidor PM8000 con módulos de entradas y salidas. (b) Medidor PM8000 con display en configuración remota.

(Catálogo PowerLogic, Schneider Electric)

Para la interconexión de este dispositivo con los demás del sistema de control se tiene que incluye protocolos como Modbus y DNP3 y cuenta con puertos para comunicación mediante RS-485, puerto Ethernet y también mediante un gateway Ethernet-a-Serial que dan una variedad de medios para la interacción y transferencia de datos.

Y en cuanto a montaje se ajusta perfectamente a lo que se establece en el diseño de gabinetes por parte de la empresa que es la colocación de los dispositivos en un riel DIN, cosa que este medidor tiene incluido.



PowerLogic PM8000 DIN rail mounted meter.

**Figura 5.8. Medidor PM8000 en su montaje para riel DIN.
(Catálogo PowerLogic, Schneider Electric)**

Finalmente dos funciones importantes por las que se optó por seleccionar este medidor fueron: primero la capacidad de generar reportes de forma nativa y permitir su acceso desde páginas web dedicadas al registro de datos y presentación de estos reportes. Por otro lado la capacidad de visualizar los datos obtenidos en las mediciones en el software StruxureWare Power Monitoring Expert, especializado para la plataforma de medidores, y también en sistemas de SCADA como el PowerSCADA Expert Software, lo que hace que la integración del medidor y los datos que éste envía sea mucho más fácil.

De esta forma y como se especificó antes, al igual que en el caso del sistema de control de presión, se logra tomar datos de las variables, en este caso eléctricas, e ingresarlas al sistema para ser manejados y a partir de estas realizar el control de los motores de la estación de bombeo.

5.2.4 Distribución de energía.

Para la distribución de energía entre los diferentes cuerpos que componen el centro de control y los dispositivos conectados en ellos, se tiene que realizar un diseño particular por las magnitudes de voltajes y corrientes que se utilizan en el circuito de potencia.

En este caso se utilizará un medio de transmisión de energía mediante barras flexibles. Las mismas presentan la capacidad de transferir grandes valores de corriente de forma segura, cosa que no es posible mediante cables, a menos de que estos sean de un muy grueso calibre.

Se diseña el sistema con el uso de 3 barras de CA en la parte posterior del cuerpo principal. Las mismas con la capacidad de trasegar hasta 1500A y así manejar la alimentación del circuito de potencia que ingresa desde la fuente eléctrica principal.

Las barras escogidas para este proyecto son las ERICO Flexibar, que es una pletina flexible aislada con capacidades de 420A (modelo 552520), 480A (modelo 552630) y 640A (modelo 552650).

ERICO® FLEXIBAR®
Pletina flexible aislada



**Figura 5.9. Barras flexibles de alimentación.
(Catálogo de conductores flexibles, ERICO)**

Las mismas están constituidas por una serie de láminas de cobre electrolítico como conductor y con un recubrimiento mediante un compuesto vinílico de alta resistencia en PVC o silicona. Las mismas tienen una alta conductividad gracias a que la calidad del cobre es muy alta (99,9% de pureza), lo que las hace especiales para aplicaciones industriales como la que se encuentra en este diseño.

Para este proyecto serán usadas para las conexiones entre el embarrado principal y la aparamenta de los gabinetes. Y se escogen barras puesto que presentan varias ventajas, al menos para esta parte de las conexiones eléctricas con respecto a los cables. Entre estas ventajas se puede destacar, como anteriormente se indicó, la alta capacidad, en cuanto a corriente nominal, que poseen, además de que requiere menor espacio de instalación, reduce el número de conductores necesarios para las conexiones y también ahorra costos en el montaje, longitud y la dispensabilidad de los terminales usados en el caso de los cables.



**Figura 5.10. Ejemplo de conexión mediante barras flexibles.
(Catálogo de conductores flexibles, ERICO)**

Pasando al resto del sistema de distribución eléctrica, en el caso de las conexiones del circuito de control y auxiliares, los cuales tienen valores de voltaje y corrientes mucho menores que el de potencia, se utilizan cables flexibles de cobre los que son un estándar en el armado de gabinetes de control. Estos con un área transversal de 4mm^2 y 6mm^2 y con un código de colores para facilitar la identificación de los mismos. Por último se incluye etiquetado de alambres y cables utilizando marcadores amarillos en cada contacto tanto de terminales, relés, interruptores y otros equipos. Para este etiquetado se tiene una codificación que incluye la identificación o símbolo del equipo y la designación del pin, de forma que sea fácil el darse cuenta de desde donde proviene dicho conductor y hacia dónde se dirige.

5.2.5 Interruptores termomagnéticos.

A la entrada principal de la fuente de alimentación al circuito de potencia se tienen interruptores termomagnéticos que son los encargados de, a la hora que se da un fallo o una variación crítica en los parámetros eléctricos, determinada por el medidor PM8000, desconectar la fuente deficiente y, mediante la transferencia eléctrica,

iniciar la fuente secundaria, que en este caso es un generador de respaldo, y permitir la operación ininterrumpida de la planta.

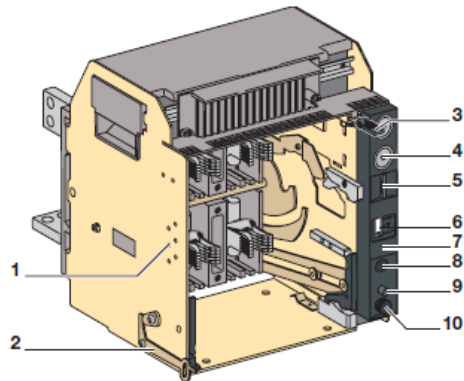
Para este diseño se incluyen interruptores modelo NW16H1 de la marca Schneider Electric. Los mismos son al aire y de tres polos con intensidad asignada de 1600A y tensión de aislamiento de hasta 1250V, con señalización mecánica de disparo y botón de apertura para el control manual del mismo. Lo anterior con la finalidad de, en caso de que por una eventualidad sea necesario, se pueda accionar el dispositivo con solo presionar el botón.



NW08 a NW40

**Figura 5.11. Interruptor termomagnético serie NW.
(Catálogo Sistema Masterpact, Capítulo 3, Schneider Electric)**

Su montaje se realizó mediante una carcasa que permite la instalación del breaker y tiene una construcción adecuada para el ingreso de los diferentes cables y conectores que ingresan al aparato.

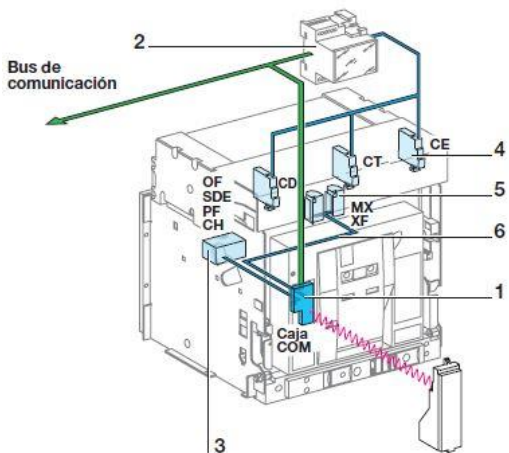


- | | | | |
|---|---|----|--|
| 1 | Dispositivo antierror | 6 | Indicador de posición |
| 2 | Enclavamiento de puerta aparato "enchufado" | 7 | Tapa del chasis accesible puerta tablero cerrado |
| 3 | Enclavamiento de enchufado puerta abierta | 8 | Acoplamiento de la manivela |
| 4 | Enclavamiento por cerraduras | 9 | Botón de accionamiento |
| 5 | Enclavamiento por candados | 10 | Ubicación de la manivela |

**Figura 5.12. Chasis de montaje para Masterpact
(Catálogo Sistema Masterpact, Schneider Electric)**

Para poder ejercer el control de estos dispositivos y también el monitoreo de los mismos es necesario que cuenten con un medio de comunicación con el controlador principal del sistema y la transferencia, que será la encargada de accionarlos. Para este modelo en concreto se tiene una configuración predeterminada mediante señales digitales de voltaje que son ingresadas a las entradas de este tipo en el controlador mencionado. Mediante estas es que se puede determinar el estado en que se encuentra el breaker ya sea abierto, cerrado, disparado o en estado de falla y de acuerdo a esto se pueden tomar decisiones sobre la calidad del funcionamiento del sistema y también mediante señales que le ingresan a él es que se realiza el control de forma remota de su estado, principalmente con comandos de cierre y apertura.

El módulo mediante el que realiza la comunicación es el COM y en esta arquitectura se hace con protocolo Modbus.



**Figura 5.13. Diagrama de conexiones de comunicación.
(Catálogo de sistema Masterpact, Schneider Electric)**

Teniendo escogidos estos elementos, se puede proceder a la escogencia de la transferencia eléctrica. Hasta ahora lo que se escogió fueron componentes necesarios para que la transferencia pueda realizar su función pero que no son la transferencia en sí, esto se hizo a continuación cuando se determina la configuración en la que estarán los dispositivos antes escogidos. Son importantes dado que, como el accionamiento va a ser según variables brindadas por ellos y también sobre su operación, la transferencia escogida se debe adecuar a estos.

5.2.6 Transferencia eléctrica.

La definición y escogencia de los dispositivos anteriores, como se dijo previamente, ha sido para llegar finalmente al momento de diseñar la transferencia eléctrica.

Para la escogencia de la transferencia adecuada se seguirá la guía que incluye los pasos a seguir para dicha función, determinados o recomendados por la empresa proveedora principal de equipos para la compañía, que es Schneider Electric.

El paso inicial es la escogencia de los interruptores con los que se estará trabajando, y a los que accionará la transferencia. En este caso ya fueron seleccionados en el apartado anterior y son del tipo Masterpact NW.

Avanzando en el proceso, se debe elegir el interenclavamiento mecánico, que es el medio físico por el cual están interconectados los interruptores termomagnéticos. En este caso se decide tener una conexión mediante cables. Esto por la facilidad de dirigir el conductor a través de los compartimentos en que se ubican los breakers, que pueden ser bastante estrechos, además de que permite una ubicación libre entre sí de los aparatos, tanto uno sobre otro, lado a lado o en muchas otras configuraciones que no se podrían lograr si se tiene un conector rígido como por ejemplo los de varilla o los de platina.

A continuación se determina el interenclavamiento eléctrico (IVE) que será usado en la instalación de la transferencia. Esto se refiere a un bloque terminal el cual se encarga de la conexión eléctrica de las distintas fuentes de alimentación que se van a tener controladas mediante la transferencia. Este es escogido de acuerdo a la intensidad de corriente a la que va a trabajarse y debe ser compatible con la motorización seleccionada, que es el medio por el cual se accionan los interruptores.



Figura 5.14. Ejemplo de interenclavamiento eléctrico (IVE).
(Catálogo transferencia de redes, Capítulo 4, Schneider Electric)

Finalmente se escoge el automatismo, que es el encargado de regular el paso desde y hacia las distintas fuentes de alimentación en función del estado de las redes de emergencia y normal. El mismo cuenta con una platina denominada ACP que protege y alimenta el módulo de automatismo. Se debe tener en cuenta que la tensión del automatismo, la de la platina ACP, los mandos motorizados de los breakers y el IVE.

De esta forma se tiene determinados los elementos que componen el sistema de transferencia automática. Las señales que la accionan son provenientes de la programación que se realiza en el controlador central para que, de acuerdo a los parámetros y valores obtenidos del medidor de energía que se instaló, se puedan abrir y cerrar los breakers que sea necesario de manera que se deje de lado la fuente de alimentación que presentó un fallo y se continúe el funcionamiento de la planta con el generador auxiliar.

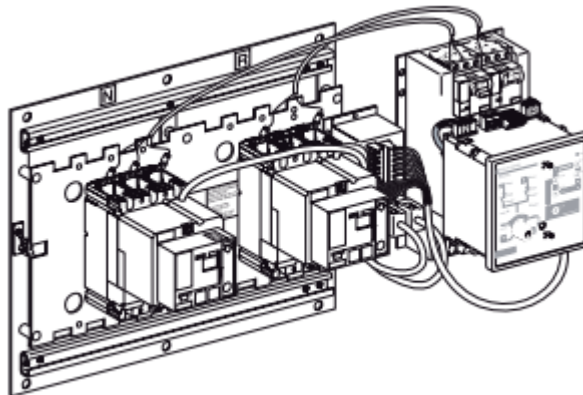
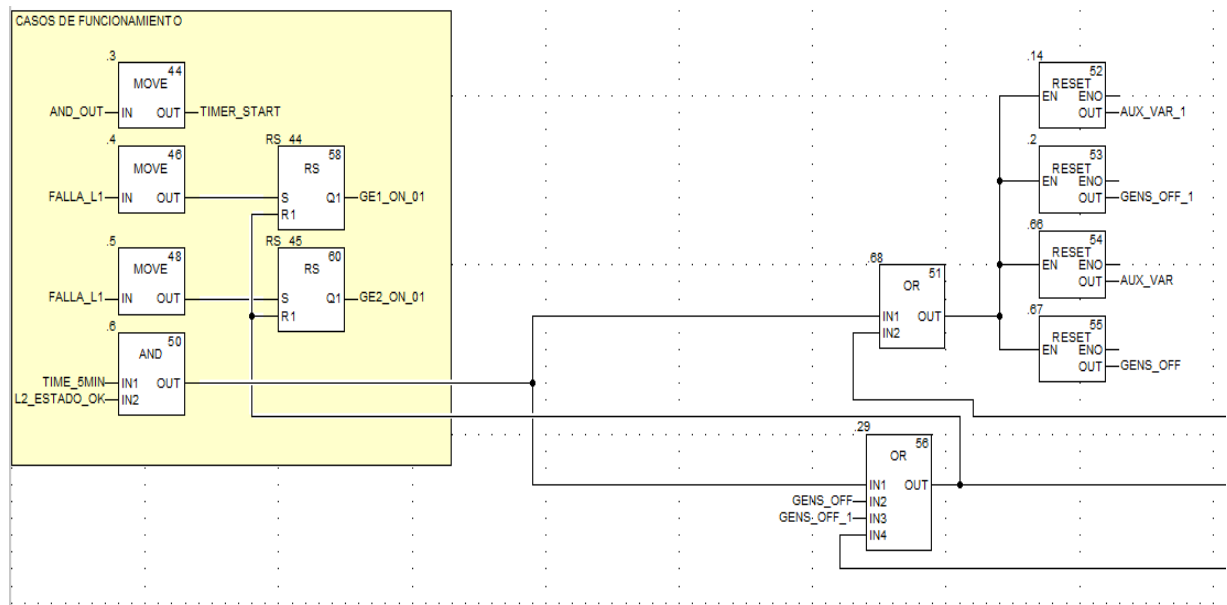


Figura 5.15. Diagrama de conexión de transferencia.
(Catálogo de transferencia de redes, Schneider Electric)

Como último elemento del sistema eléctrico que cabe resaltar que se incluye en el diseño, es un disyuntor para el suministro eléctrico al material auxiliar y de control. El mismo se dimensiona de acuerdo a la corriente máxima que pueda pasar sin dañar los materiales mencionados y se escoge uno de 100A.

En el apartado al que concierne la programación que controla los dispositivos anteriores, esta se implementa en la RTU y se rige mediante una secuencia establecida de pasos a seguir para así obtener el funcionamiento deseado. Como una guía de esta secuencia y para ejemplificar el procedimiento que se lleva a cabo por el sistema, se realiza el diagrama de flujo que se presenta en la figura 5.17.



**Figura 5.16. Segmento de programación para transferencia eléctrica
(Fabián Blanco Piña, 2015)**

Con el gráfico de la figura 5.17 se tiene una ayuda para el desarrollo de la aplicación de transferencia eléctrica automatizada que se implementó con una programación en un diagrama de bloques en el software propietario del proveedor de los equipos.

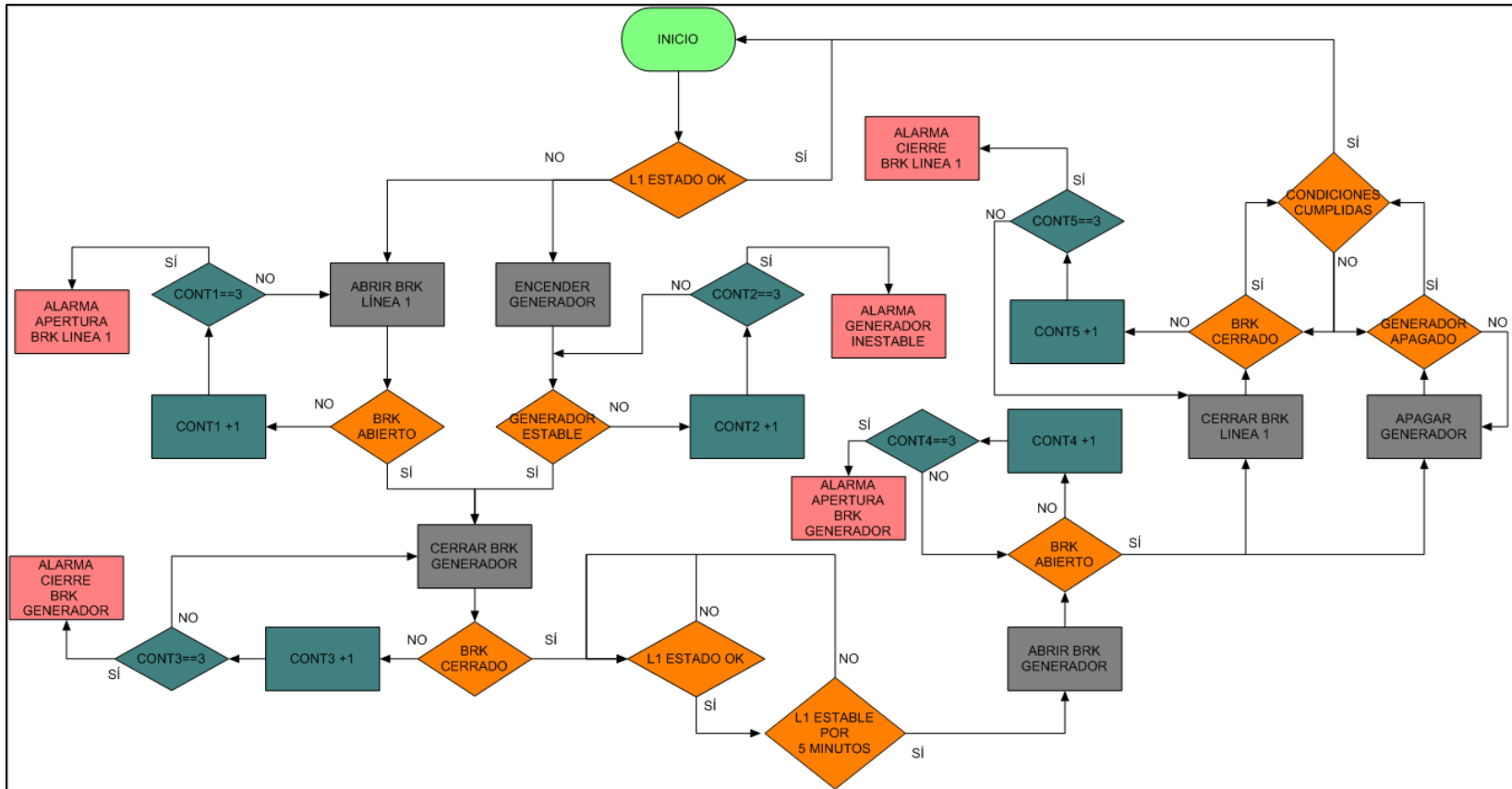


Figura 5.17. Diagrama de flujo de transferencia eléctrica
(Fabián Blanco Piña, 2015)

5.3. Diseño de un sistema de alternancia de bombas.

La tercera parte del diseño general del proyecto consiste en crear una aplicación de forma que, con el controlador seleccionado, se pueda realizar el manejo de los tiempos de operación de cada una de las cuatro bombas que se encuentran en la estación. Esto porque la alternancia de los equipos que se utilizan permite que se dé un uso igualado entre ellos y previniendo un desgaste desfasado entre los equipos.

Por otro lado, lograr que los dispositivos se encuentren en estados de funcionamiento lo más parecidos posibles, es una ventaja a la hora de definir planes de mantenimiento. No es lo mismo establecer medidas preventivas y correctivas a un equipo que no se ha usado en mucho tiempo comparado con otro que ha permanecido en servicio de forma continua. Esto en el futuro vendría a significar un ahorro en tiempos de paradas por reparaciones, así como en dinero por los fallos imprevistos que se pueden prevenir con un conocimiento claro del estado de todos los equipos.

Como se dijo en un capítulo anterior, la estación de Bajo Barrantes cuenta con cuatro bombas, de 350 caballos de fuerza cada una, que son las que impulsan el agua desde el pozo de captación y hacia el sistema de distribución. La forma en que se determina cuáles están en servicio se realiza de acuerdo a los tiempos acumulados de funcionamiento de cada una.

En estado normal, se espera que haya tres de las cuatro bombas funcionando mientras que la restante se encuentra en espera, ya sea de que suceda alguna eventualidad que saque de operación alguna de las que están encendidas, o de que se cumpla con el tiempo establecido para que reemplace a una de las que están operando.

El sistema debe ser capaz de determinar cuánto tiempo lleva encendida cada una de las bombas y, de acuerdo a un porcentaje de desfase en dichos tiempos, posibilitar la transición entre un equipo operativo y uno que estaba en stand-by, de forma que dicha conmutación de aparatos no interfiera o modifique el servicio de abastecimiento de agua que se brinda a los consumidores.

5.3.1. Controlador RTU.

Para la programación de la aplicación que se diseña se escoge un controlador adecuado tanto a la configuración de los equipos, como al sitio y condiciones bajo las que se estará operando.

Entre las condiciones críticas que se toman en cuenta para escoger un controlador está el hecho de que la planta se encuentra en un sitio alejado y que es necesario monitorear los datos de la estación desde un sistema externo a la misma, que está concretamente situado en las instalaciones de la Universidad de Costa Rica en San Ramón. Es por esto que sobresalen las necesidades de transmisión de datos de forma remota.

A partir de esto se opta por implementar una RTU (Unidad de Transmisión Remota) que supone una solución ante algunos inconvenientes que pueden surgir si se diseñaba sobre el uso de un PLC.

Las diferencias están en que la RTU tiene una capacidad de transmisión de datos de forma remota, es decir, no es necesario que esté físicamente conectada al sistema de monitoreo externo, sino que, mediante un protocolo de comunicaciones especializado, logra enviar los datos a través de medios inalámbricos, generalmente por radio.

El protocolo DNP3 es el que hace esto posible. Su principal ventaja es que a diferencia de otros, como Modbus, que realiza consultas constantes a los dispositivos de campo y luego manda todas las respuestas, sin importar si el dato ha cambiado respecto al anterior, el DNP3 no realiza esta repetitiva solicitud de datos, sino que espera a que el dato desde el dispositivo esclavo cambie para hacer un nuevo envío de información. En el caso de que el dato no haya cambiado, entonces no se considera necesario hacer un envío del mismo, sino que se sabe que el dato permanece sin cambio. Esto lo que hace es que permite el manejo de información a través de medios de comunicación que tienen un bajo ancho de banda, por lo que los paquetes de datos que se transportan no pueden ser tan grandes como con un medio físico.

En este caso es especialmente importante puesto que se propone usar el medio de transmisión mediante radiofrecuencias. Estas tienen un limitado ancho de banda, por lo que es necesario optimizar el uso del mismo.

Otra de las ventajas que presenta el uso de una RTU es que estas tienen una mayor capacidad de memoria respecto a los PLC. Esto es esencial puesto que, en caso de que exista un fallo de comunicación con el sistema central, el equipo es capaz de guardar un registro histórico de los datos de proceso, en su memoria interna, para luego, al restablecer la conexión y comunicación, realizar el envío de todos los datos que, si fuese algún otro tipo de controlador, se hubiesen perdido por la falta de comunicación.

De igual manera, en el campo de capacidad de procesamiento, se consideran como equipos de gama media-alta puesto que no se encuentran muy lejos de lo que llega a hacer un PLC y además cuenta con terminales de entradas y salidas para realizar el control de los dispositivos que se conecten.

Particularmente se opta por la RTU 334E de la serie SCADAPack de Schneider Electric. La misma cuenta con un procesador de 32bits, ARM7 de 32MHz de reloj y un microcontrolador co-procesador con reloj de 20MHz. En cuanto a memoria, tiene una RAM no volátil que con batería de litio conserva su contenido por 2 años sin alimentación eléctrica. Además cuenta con 16MB ROM FLASH, 4MB RAM CMOS y 4kB EEPROM.



Figura 5.18. RTU SCADAPack 334E.
(Catálogo SCADAPack 330-334E – Smart RTU, Schneider Electric)

Una de las ventajas es que tiene un registro de hasta 20000 eventos y un manejo de base de datos de hasta 1000 puntos fijos. Esto es la capacidad de entradas y salidas que pueden tenerse integradas en el controlador. Estos se tienen de los bornes de entradas y salidas tanto analógicas como digitales y entradas de contador con las que cuenta el aparato en su diseño de fábrica.

Finalmente, y como se dijo antes, la principal característica por la que se escogió una RTU fue por su capacidad de comunicaciones y protocolos integrados. En el caso de esta, maneja puertos seriales (RS-232 y RS-485) para el uso de protocolos como DNP3, IEC60870 y Modbus RTU. Además cuenta con puertos Ethernet (RJ45) para la comunicación mediante DNP3 TCP, Modbus TCP, BOOTP y FTP Server, entre otros. Por último cuenta con un puerto para periféricos en USB y lo principal es la capacidad de comunicación inalámbrica.

Este último tipo de comunicación se logra mediante radiofrecuencias, que es lo que se utilizará por razones de distancias de transferencias de datos como se explicó con anterioridad, que se ubican entre los 900MHz y los 2.4GHz. De esta manera y mediante el protocolo DNP3 que es el que se implementará, por razones expuestas en párrafos anteriores, es que se logra una transferencia confiable, efectiva y eficiente de los datos recopilados en forma local en la estación, al servidor remoto donde se almacenan y posteriormente serán visualizados mediante un sistema de SCADA.

5.4. Comunicación.

En el diseño del sistema automatizado de control de la estación de bombeo, se debe también incluir el tipo de comunicación que se usará entre los distintos dispositivos. Para ello se tiene que tomar en cuenta cuáles son los protocolos aceptados por cada equipo y la forma que se tiene para poder interconectarlos entre sí.

5.4.1 Red local

Primeramente se tiene la conexión y comunicación a nivel local. Esta se encarga de tomar los datos de los dispositivos de campo, cuya función es tomar mediciones, como el sensor de presión, el medidor de energía y el variador de velocidad, y transmitirlos hacia el controlador principal, en este caso el SCADAPack RTU y viceversa. De modo que la transmisión de datos es a distancias relativamente cortas y con un manejo de paquetes de datos de gran tamaño.

En esta es que se dan las señales del sistema para la modificación de algún parámetro o variable de funcionamiento y en la que se envían as instrucciones por

parte del controlador hacia los dispositivos de campo para que actúen sobre el proceso.

Para este primer sistema de comunicación se escoge el protocolo Modbus TCP/IP que tiene la facilidad de poder conectar nodos de la red en modalidad maestro y esclavo. Esto quiere decir que se tiene un punto principal, encargado del procesamiento de los datos y envío de comandos a los demás instrumentos que serán denotados como esclavos puesto que se encargan de realizar las funciones que el controlador determina deben hacer.

Denominación	Modbus RTU/ASCII, Modbus Plus, Modbus TCP/IP
Soporte	Modbus-IDA.
Cuentas	
Topología	Bus, estrella, árbol.
Medio	Par trenzado, RS-232, RS-485.
Elementos	Modbus Plus: 32 nodos por segmento y 64 segmentos. RTU/ASCII: 250 nodos por segmento.
Distancia	Modbus Plus: 500 m. por segmento. RTU/ASCII: 350 m. TCP/IP: 100 m entre switches.
Comunicación	Maestro/Esclavo o Cliente/Servidor
Velocidad	Modbus Plus: 1 Mb/s. RTU/ASCII: 300 b/s-38.4 kb/s. TCP/IP: 100 Mb/s.
Datos/paquete	Modbus Plus: variable. RTU/ASCII : 0-254 bytes. TCP/IP: 1.500 bytes.
Tiempo de ciclo	

Figura 5.19. Características del protocolo Modbus.
(Rodríguez, A. 2007)

El protocolo Modbus se rige por la encuesta para realizar su función de manejo de datos. Esto consiste en que constantemente hace consultas a los dispositivos y estos responden con los datos que le son solicitados. Es por esto que la comunicación es periódica y se está recibiendo datos cada vez que se hace la encuesta o "poll".

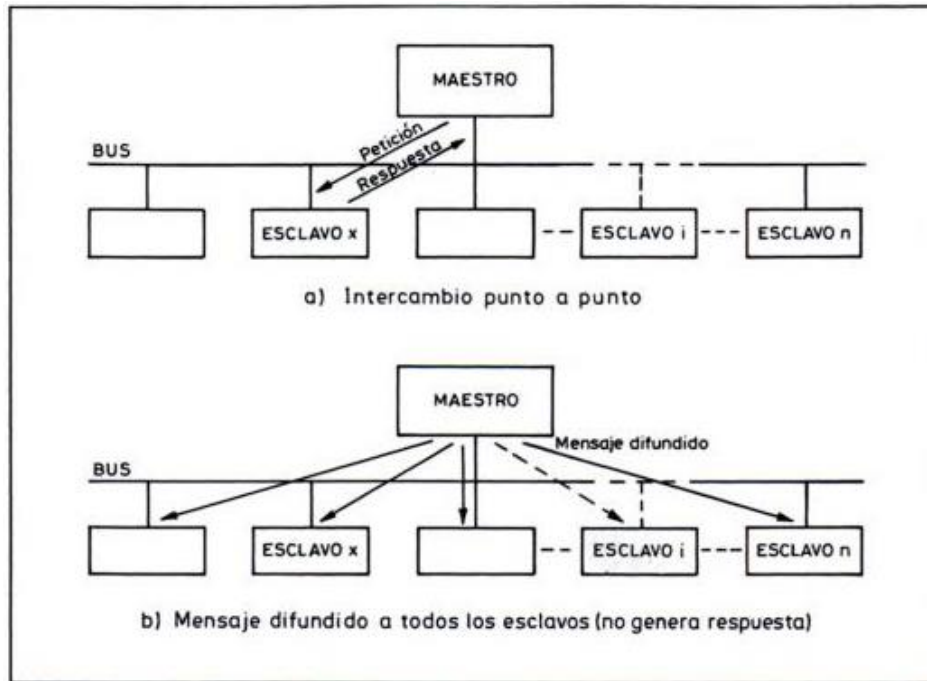


Figura 5.20. Intercambio de datos maestro-esclavo.
 (Balcells, J, Romeral, J. 1997)

De igual manera se tiene la posibilidad de que sea configurado en una conexión *semi-duplex* en la que el canal de transmisión solo puede ser usado, o para enviar o para recibir pero no ambas al mismo tiempo, o en *full-dúplex* que si permite la simultaneidad de envío y recepción de datos.

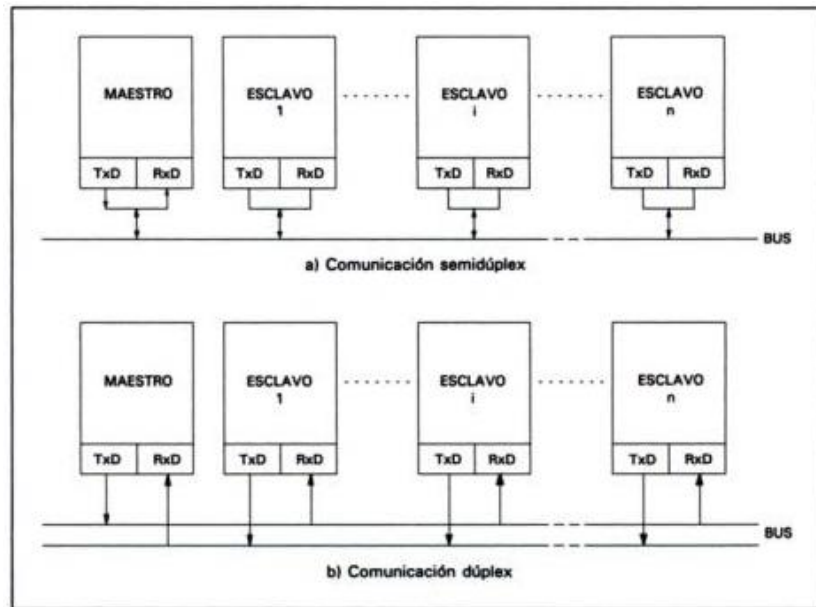


Figura 5.21. Configuraciones Modbus
(Balcells J, Romeral J. 1997)

El caso de medio físico que se utilizará para este enlace será mediante cableado de par trenzado Ethernet, esto porque representa la suficiente capacidad de transmisión de datos requerida y porque no tiene ningún problema cuando se trata de comunicaciones a cortas distancias. Además de que es un medio muy extendido y utilizado por todos los dispositivos implicados en el sistema.

Haciendo una breve reseña del surgimiento de Ethernet, este nació en 1970 para su uso en las primeras configuraciones de redes locales y ha sido altamente difundida en la industria e informática. Ha evolucionado hasta convertirse en un estándar mundial bajo la norma IEEE 802.3. Actualmente es la arquitectura de red más difundida en computadoras que usan Windows y Novell como sus sistemas operativos. Cuenta con velocidades de hasta 1Gbps en el llamado Gigabit Ethernet.

En esta estación se usará cable de par trenzado con conectores RJ-45 que son los que vienen integrados tanto en los dispositivos de campo como en el controlador.

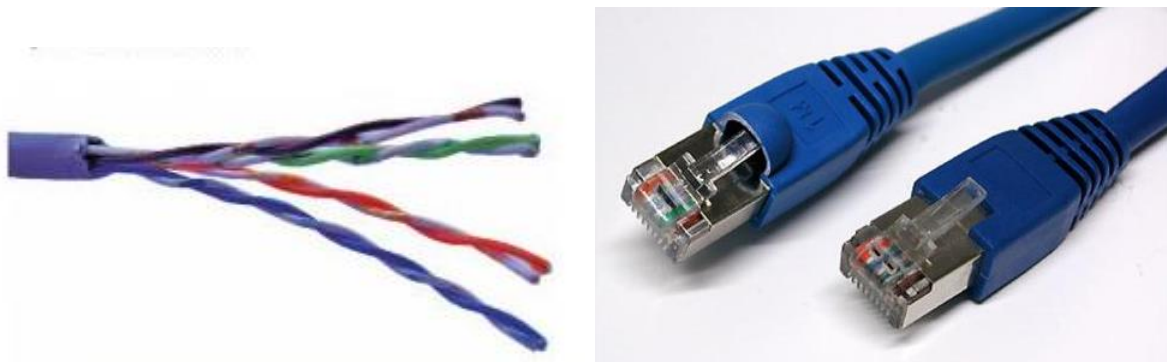


Figura 5.22. Cable de par trenzado y conectores RJ-45
(Gallardo, S. 2015)

5.4.2. Red remota.

Para la comunicación y transmisión de los datos obtenidos de la estación hacia el sistema de monitoreo, que se encuentra en las instalaciones de la Universidad de Costa Rica en su sede de Occidente, es necesario utilizar sistemas inalámbricos. El porqué de esto es principalmente la distancia entre ambos lugares.

Entre cada uno de los dos sitios hay una separación de aproximadamente 15km, lo que hace imposible utilizar el mismo método que se usó en la red local que, por sus características de transmisión, está limitado a aproximadamente 500m entre segmentos, los cuales son también limitados.

Otra opción que se tenía para el diseño era el uso de cables de fibra óptica, los cuales tienen un mayor alcance en cuanto a distancias de transmisión. La desventaja que hizo que se descartara esta opción es que es un medio cableado. Esto hace necesario extender un cable a través de toda la separación que existe entre las dos localizaciones, cosa que es casi imposible puesto que es una zona altamente urbanizada. En otros casos, en los que se hicieron instalaciones en zonas montañosas no ha sido tan difícil esto, pero como se dijo antes, en una zona urbana se hace casi imposible.

Medio de Transmisión	Razón de datos total	Ancho de Banda	Separación entre repetidores
Par Trenzado	4 Mbps	3 Mhz	2 a 10 km
Cable Coaxial	500 Mbps	350MHz	1 a 10 km
Fibra Óptica	2Gbps	2GHz	10 a 100 km

Figura 5.23. Cuadro comparativo entre medios de transmisión cableados.

(Rodríguez, A. 2007)

Agotadas estas opciones mediante transmisores cableados, se recurre al uso de transmisiones inalámbricas de los datos. Esto porque no es necesario la extensión de cables ni mayor accesorios y elementos físicos para realizar el manejo de la información.

Para el diseño de la estación de bombeo se selecciona una transferencia de datos mediante radiofrecuencias. Estas permiten el envío de la información a largas distancias y sin la necesidad de extender cables o más equipos que un emisor y un receptor en cada punto respectivamente.

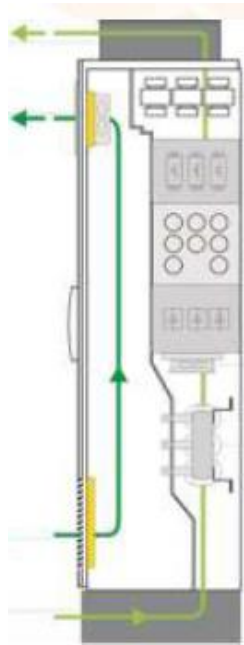
Para usar este tipo de medio es necesario que los equipos del cuerpo de control sean compatibles con el mismo. Como se habló anteriormente, durante el diseño del sistema y la escogencia del controlador, esta fue una de las principales razones por las que se decantó por elegir una RTU por sobre un PLC. El equipo escogido tiene la capacidad de hablar mediante DNP3, protocolo que realiza una selección de la información por transmitir, para adecuarla al ancho de banda disponible en este medio, y con la inclusión de un radiotransmisor se logra el envío de la información para ser monitoreado de forma remota.

5.5 Sistema de refrigeración.

Entre las solicitudes que dio el cliente se debe realizar el diseño de un sistema de refrigeración, mediante ventilación, para los gabinetes en los que se encontrarán los dispositivos electrónicos.

Se pide un sistema de ventilación diferenciado para el circuito de potencia y para el de control. En cuanto al de potencia es necesario que la ingesta del aire de refrigeración se lleve a cabo a través del suelo o un zócalo, mientras que la salida del aire tiene lugar a través del techo del cubículo. En el caso del sistema de control, este es enfriado mediante ventiladores de filtro instalados en las puertas de los gabinetes. Los mismos se regulan mediante un termostato instalado en el interior del cubículo que es el que les da la señal de encendido y apagado según la temperatura de operación predeterminada.

Finalmente se incluyen rejillas con almohadillas de filtro en las rejillas tanto de entrada como de salida de aire a los gabinetes. Esto para prevenir la entrada de polvo y algún otro tipo de partículas que puedan interferir en el funcionamiento correcto de los dispositivos o que perjudiquen la vida útil de estos.



**Figura 5.24. Diagrama del sistema de ventilación de gabinetes
(Cotización SOATI, 2015)**

En general el sistema de ventiladores en las puertas de los gabinetes es generalmente usado como norma para los sistemas implementados por SOATI. De igual manera la inclusión de zócalos en los cubículos es ampliamente usado en los equipos de Schneider Electric, quien es empresa proveedora principal para la empresa.

5.6. Sistema HMI-SCADA.

Una de las cosas más importantes con el uso de sistemas automatizados, es la capacidad de monitorear los datos obtenidos y funciones realizados por estos. Para esto es que, en la mayoría de aplicación de automatización se incluyen sistemas de supervisión, monitoreo y control del sistema implementado.

En este caso se decide que es necesario hacer el diseño de uno de estos, principalmente por lo crítico que es el garantizar la correcta operación de la estación

de bombeo y, en caso de que haya alguna falla, poder determinar rápidamente la causa y corregirla lo antes posible.

Se diseña un sistema SCADA, que significa Supervisión, Control y Adquisición de Datos, que será instalado en las facilidades de la Universidad de Costa Rica, en su sede de Occidente. Esto porque es ahí donde se encuentra la central de monitoreo de este acueducto.

Dicho sistema está integrado por pantallas en las que se tienen gráficos en 3D que muestran las instalaciones del acueducto, los equipos en funcionamiento y los parámetros de operación principales y de mayor importancia de cada uno de estos dispositivos. Además tiene la gran ventaja de que desde estas pantallas se puede hacer un control remoto sobre los aparatos de la estación.

Además de esta parte remota, se tiene la integración de una interfaz hombre-máquina (HMI por sus siglas en inglés), la cual suministrará información de una manera estática y dinámica en cualquier cuadro de la pantalla. En esta también se indicará el estado de los objetos mediante señalizadores y animaciones para ejemplificar por ejemplo encendido, apagado, paro o falla de algún elemento.

También se incluye una pantalla de alarmas, que son altamente importantes a la hora de monitorear y diagnosticar eventualidades y fallas. Estas se verán inmediatamente que son generadas y surgen en cualquier pantalla, por su prioridad de visualización, mediante ventanas emergentes en la aplicación.

Para este sistema se contempla incluir una pantalla de la familia Magelis de la marca Schneider Electric. La misma sería de 10.4 pulgadas y se instalaría en la puerta del gabinete de control.

El equipo cuenta con las siguientes características:

**Tabla 5.1. Características de HMI
(Catálogo Magelis, Schneider Electric)**

Color	65.536 colores
Tamaño	10.4 pulgadas
Alimentación	Externa a 24VDC
Tipo de pantalla	TFT LCD retroiluminada
Resolución	640x480 píxeles
Panel táctil	Sí
Ajuste de brillo	16 niveles
Protocolos de comunicación	Modbus TCP, Siemens Simatic, Rockwell Automation AB, Omron Sysmac, Mitsubishi Melsec, FIPWAY, Modbus + y Uni-Telway
Conexiones integradas	Ethernet RJ45, USB 2.0 mini-B y tipo A, RJ-45 interfaz RS485 compatible con Siemens MPI y SUB-D 9 interfaz RS232
Normas	EN 61131-2, IEC 61000-6-2 y UL508
Grado de protección	Panel frontal IP66K conforme a DIN40050-9 y IEC 60529 Panel trasero IP20 conforme a IEC 60529

Con este es que se realizará el monitoreo a nivel local de la estación de bombeo.

Capítulo 6. Resultados.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del diseño de cada una de las etapas del proyecto (entiéndase por etapas: el sistema de control de presión, alternancia de bombas y transferencia eléctrica) y de la interconexión y construcción de los mismos.

En un principio se realizó el diseño del sistema de control de presión para la descarga de agua de las bombas. En este caso la descarga desde la estación de Bajo Barrantes es hacia el tanque Tremedal y de ahí a la red de distribución.

Se hace la escogencia de cada uno de los componentes electrónicos que conforman el sistema y se logra obtener un circuito completo con el cual se da una regulación automática de la presión mediante la medición de un sensor especializado para este tipo de aplicaciones y con la acción de un variador de frecuencias como medio de modificación de los parámetros de funcionamiento de las bombas, que son las encargadas de incluir la presión en el acueducto. Este último también se escoge debido a que es pensado para aplicaciones concretas de manejo de bombas de agua y tiene una cantidad de herramientas que hacen mucho más fácil la parametrización de estos equipos y el control de los mismos.

Con esto se espera que en una eventual puesta en marcha del diseño, se logre obtener una confiabilidad de aproximadamente 95% en cuanto a la corrección de las variaciones presentadas en la presión de agua de la estación. Es decir, se espera que en 95 de cada 100 ocasiones que se dé un cambio considerable en la presión, el sistema sea capaz de detectarla y corregirla, manteniendo la presión final en un valor constante y predeterminado por quienes manejan el acueducto.

La confiabilidad de 95% es determinada según las características del variador de frecuencias y el sensor de presión que son de gama media-alta y cumplen con

estándares de calidad, además de que en sus hojas técnicas se especifican clasificaciones que permiten decir el nivel de confiabilidad que se puede obtener con el uso de estos dispositivos. Además se justifica esta afirmación mediante una investigación de los datos históricos de operación de los equipos así como con ayuda del criterio profesional de los ingenieros más experimentados de la empresa.

La caracterización final del dispositivo incluido en el diseño es la siguiente:

**Tabla 6.1. Características del variador de velocidad.
(Fabián Blanco Piña, 2015)**

Tensión de entrada	480V +10%, trifásica
Frecuencia de entrada	60Hz +5%
Eficiencia	>96% en carga nominal
Tensión de salida	0 – Un, trifásica
Rango de frecuencia de salida	0 a 500Hz mayor a 50hp
Tiempo de aceleración y desaceleración	0.01 a 6000 s, ajustable
Capacidad de sobrecarga	150% de corriente nominal por 60s 165% de corriente nominal por 2s
Protecciones principales	Sobrecorriente, corto entre fases y entre fase y tierra, pérdida de fase de entrada y fase de salida, sobrecarga del motor, sobretensión y subtensión, sobretemperatura y otras fallas internas
Fuente de control	Interno proveniente de la tarjeta de control del variador. Externo proporcionado por una fuente de 24VCD

En el caso del sistema de transferencia eléctrica se tiene la posibilidad de detectar anomalías en la fuente principal de alimentación, que viene desde el proveedor de la red pública, y realizar la conmutación hacia un generador de respaldo, de forma que se mantenga intacta la operación de la planta.

Este sistema es altamente crítico pues, como se explicó en capítulos anteriores, la estación de Bajo Barrantes es la principal abastecedora de agua para el acueducto. Tan crítico es su funcionamiento ininterrumpido que si falla, en tan solo una hora y

media se estará teniendo desabastecimiento a los beneficiarios de este servicio. En comparación, otras estaciones principales en otras regiones del país pueden salir de operación en hasta tres horas sin ver afectado el servicio de forma tajante.

Para la simulación del funcionamiento de la transferencia eléctrica se hizo una pantalla de operador en la que se permite el accionamiento de las variables, de forma que se obtiene la visión de cómo funcionaría el sistema en la vida real.

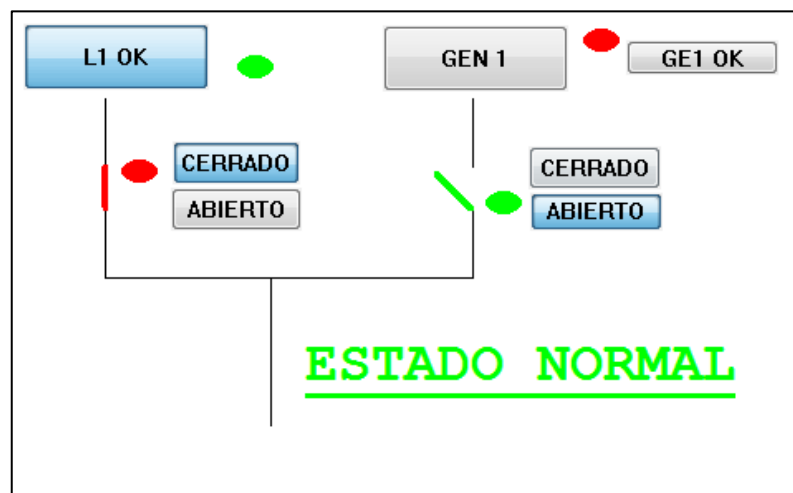


Figura 6.1. Pantalla de operador para simulación.
(Fabián Blanco Piña, 2015)

En la imagen anterior se observa el estado normal de operación de la planata que es con la línea principal de alimentación en estado correcto, el breaker de esta cerrado para permitir el paso de la electricidad y el generador de respaldo apagado con su interruptor abierto.

En el momento en que se detecta una anomalía en la alimentación principal, que salga del rango aceptable, o sea que amerite una transferencia, el sistema procede a enviar una serie de comandos de forma que se abre el interruptor de la línea, se enciende el generador y se cierra su breaker para que la alimentación ahora

provenza de dicha planta secundaria. Esto, en la pantalla de operador se ve como en la siguiente imagen.

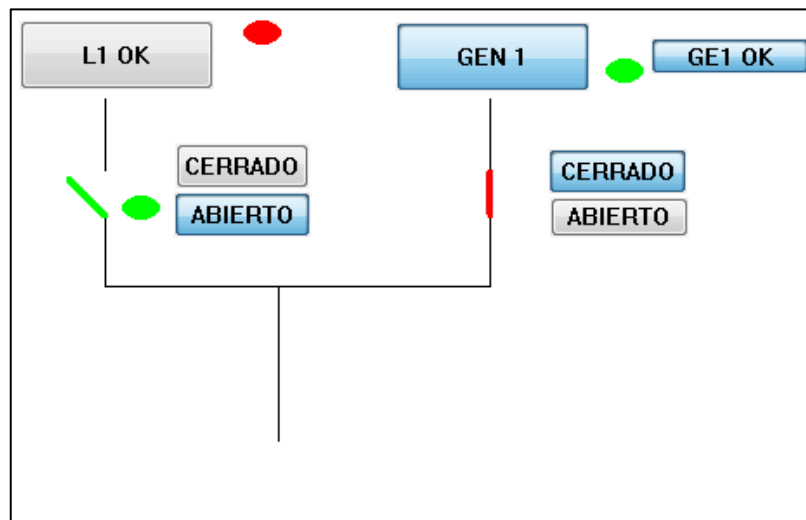


Figura 6.2. Pantalla de operador para simulación.
(Fabián Blanco Piña, 2015)

El sistema eléctrico se caracteriza finalmente de la siguiente forma:

Tabla 6.2. Características del sistema eléctrico
(Fabián Blanco Piña, 2015)

Tipo de conexión	Estrella, 3 fases, 4 hilos
Tensión de diseño	Max 600V
Tensión de operación	480V
Tipo de interruptores principales	Termomagnético, al aire
Clase de Centro de Control y Alambrado	Clase I, Tipo B
Gabinete	NEMA 4x o IP55
Llegada y salida de cables	Inferior
Corriente nominal de alimentación en barras horizontales	1500A
Corriente nominal de alimentación en barras verticales	600A

Se espera que con la implementación de este sistema se minimicen tanto los efectos de las variaciones en la alimentación eléctrica sobre el funcionamiento de la planta, así como sobre la vida útil y eficiencia de los equipos de la estación.

Se muestra a continuación imágenes que permiten ver el montaje de los elementos de la transferencia que se utilizan en un proyecto similar a este y que fue implementado por la empresa SOATI.



**Figura 6.3. Montaje de los interruptores termomagnéticos en gabinetes.
(Fabián Blanco Piña, 2015)**



**Figura 6.4. Detalle de un interruptor de transferencia eléctrica
(Fabián Blanco Piña, 2015)**

Otro de los elementos que se toman en cuenta, pero que no son parte del diseño de este proyecto, son las barras de acometida. Estas ingresan la alimentación eléctrica desde las líneas de mediana tensión y hacia el transformador principal. A continuación se muestra un ejemplo de la instalación de estas en un proyecto similar desarrollado por la empresa SOATI.



**Figura 6.5. Barras de acometida eléctrica
(Fabián Blanco Piña, 2015)**

De igual manera se logra realizar el control de los dispositivos mediante la programación incluida en la RTU y se obtienen las siguientes tablas de variables de entrada y salida que son las que permiten el monitoreo y accionamiento de los equipos, según las señales e instrucciones enviadas por el CPU.

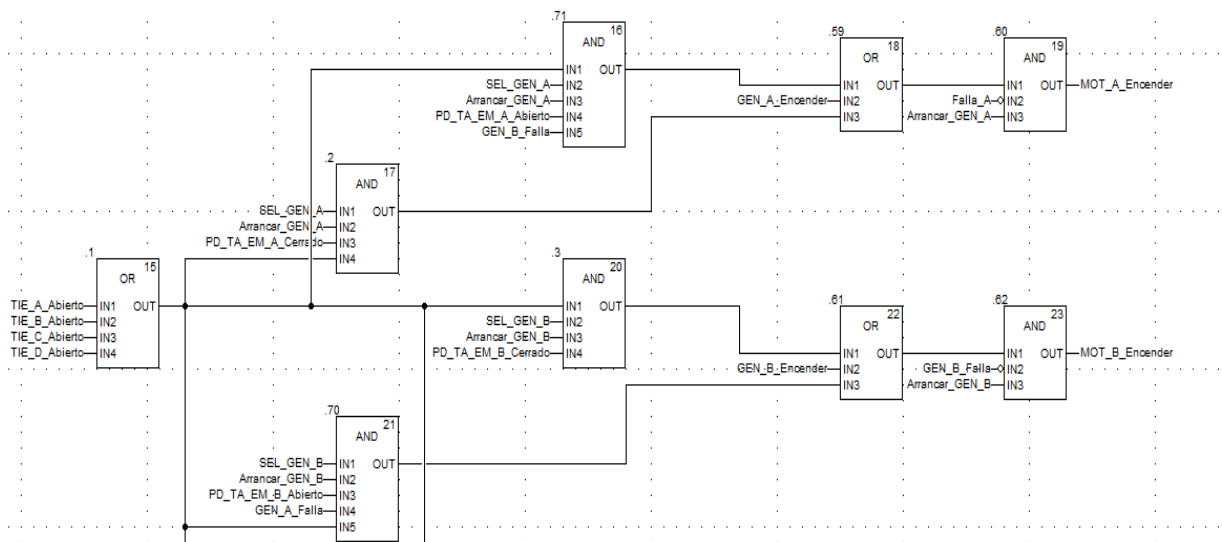
**Tabla 6.3. Variables a manejar por el controlador
(Fabián Blanco Piña, 2015)**

Variables a manejar	
Referencia de frecuencia	Velocidad del motor
Frecuencia de entrada	Tensión del motor
Tensión de salida	Corriente del motor
Tensión principal	Poder del motor
Torque del motor	Estado térmico del motor
Valores actuales del PID	Estado térmico de la unidad

Para la última parte del diseño se logra realizar una programación para configurar y llevar a cabo la alternancia de los equipos de bombeo de la estación. Esto se logra con la incorporación de dicha programación al controlador principal.

Esta programación se basó en un proyecto previo realizado por SOATI para otro cliente que, al igual que en el presente, solicitó realizar la alternancia de equipos, pero en ese caso de generadores eléctricos. De igual manera, el principio de funcionamiento y de programación son prácticamente los mismos.

Dicha programación fue realizada en el software de Schneider Electric que corresponde para uso con los dispositivos escogidos. En las próximas imágenes se pueden observar extractos dicha aplicación.



**Figura 6.6. Sección de programación para alternancia de bombas
(Fabián Blanco Piña, 2015)**

Al final esta aplicación permite el control automático de cuáles son los equipos que se encuentran en funcionamiento y, cuando sea necesario, es capaz de apagar el que lleve más tiempo de operación y encender el que se encontraba en estado de descanso. Todo esto de una forma gradual para lograr la conmutación de forma que no sea percibida por los valores de presión de descarga de agua hacia la red de distribución.

Como última parte de resultados, y con ayuda del departamento de diseño gráfico de SOATI, se presentan muestras de las pantallas que se diseñaron para el acueducto. Las mismas son ejemplos de la aplicación final y muestran las diferentes vistas, elementos, equipos y parámetros que se podrían observar en el SCADA final.



Figura 6.7. Pantalla de planta potabilizadora.
(Gabriel Ross, SOATI, 2015)

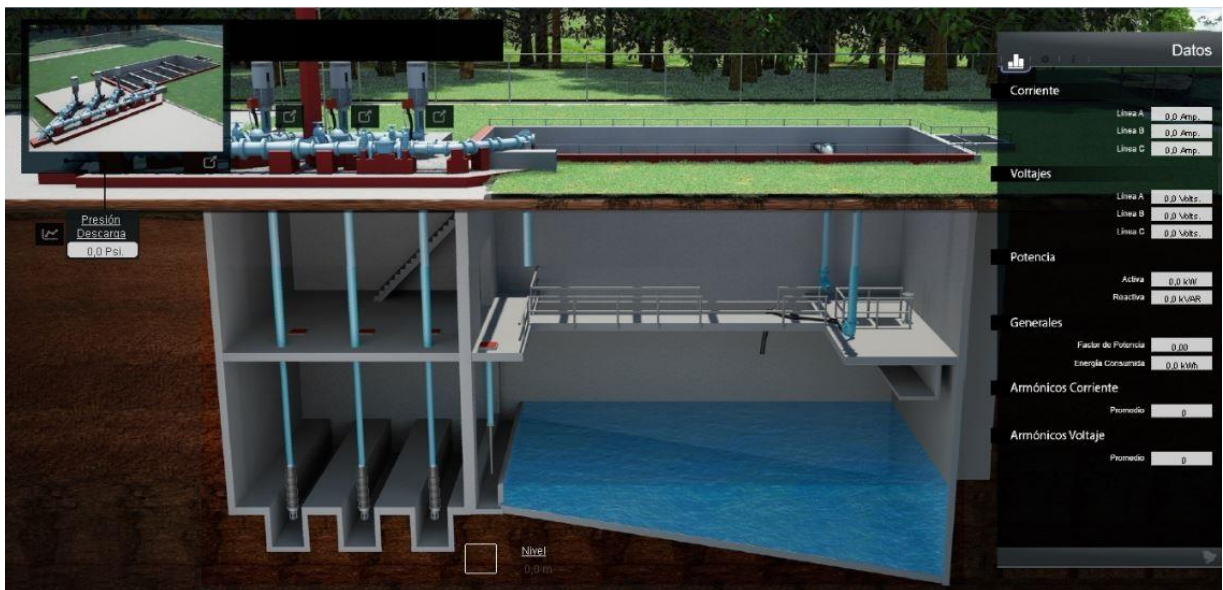


Figura 6.8. Pantalla 1 de estación de bombeo
(Gabriel Ross, SOATI, 2015)



Figura 6.9. Pantalla 2 de estación de bombeo
(Gabriel Ross, SOATI, 2015)

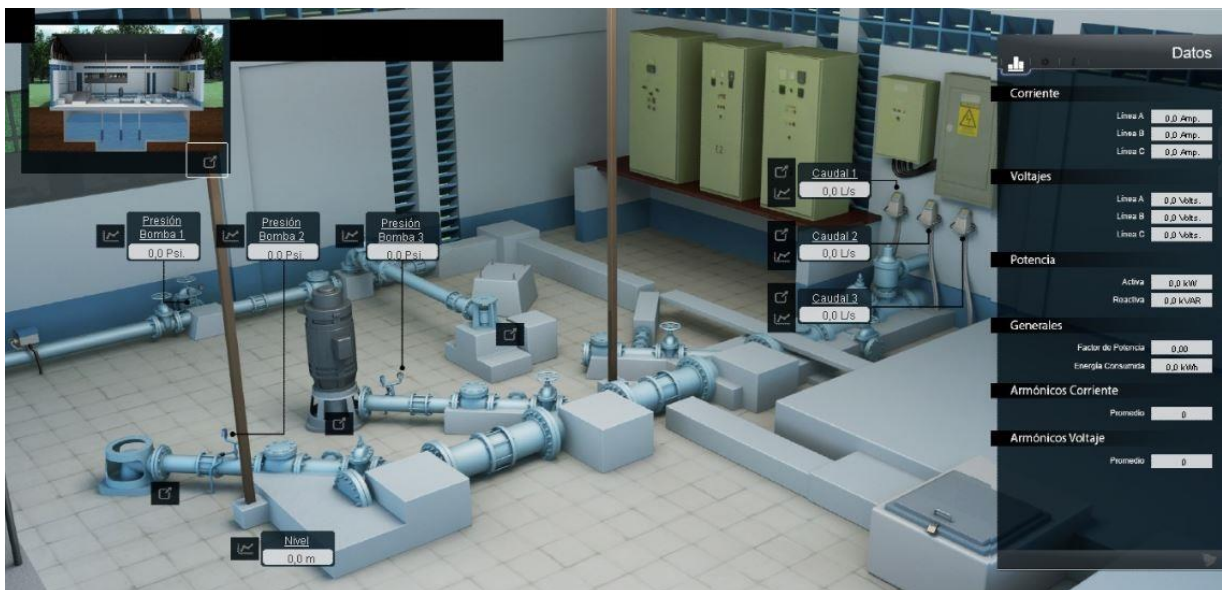
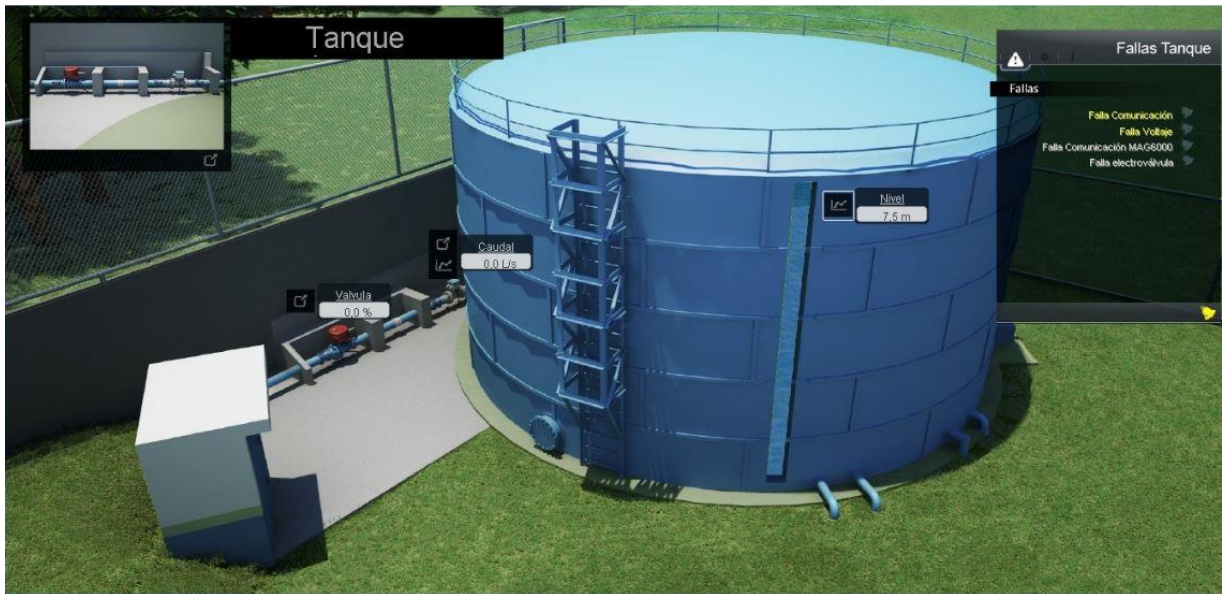


Figura 6.10. Pantalla 3 de estación de bombeo
(Gabriel Ross, SOATI, 2015)

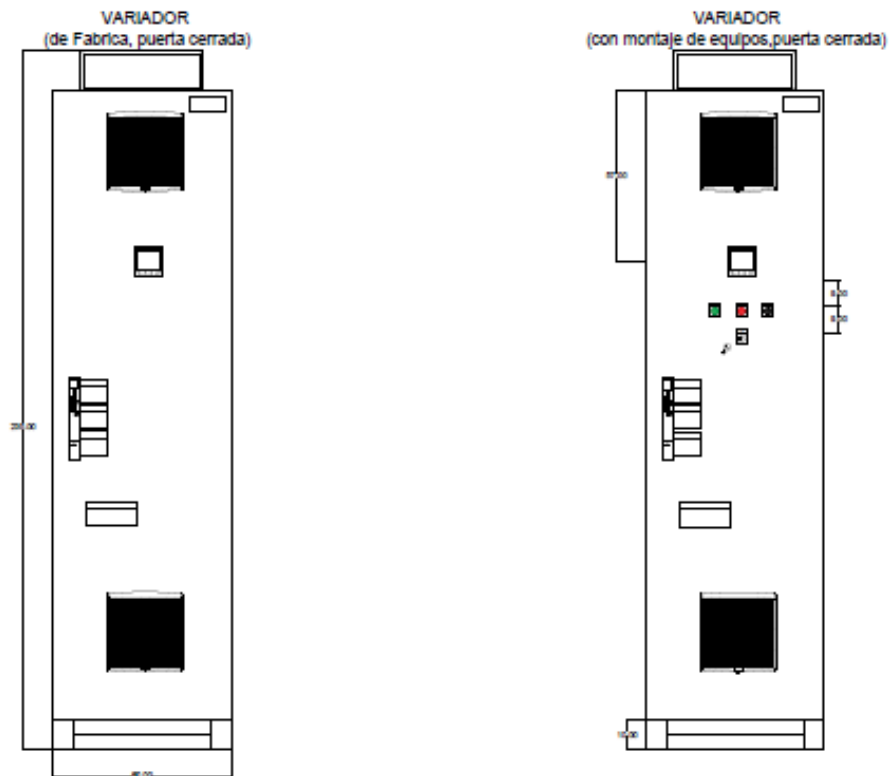


**Figura 6.11. Pantalla de tanque de almacenamiento
(Gabriel Ross, SOATI, 2015)**

6.1. Construcción y configuración de gabinetes.

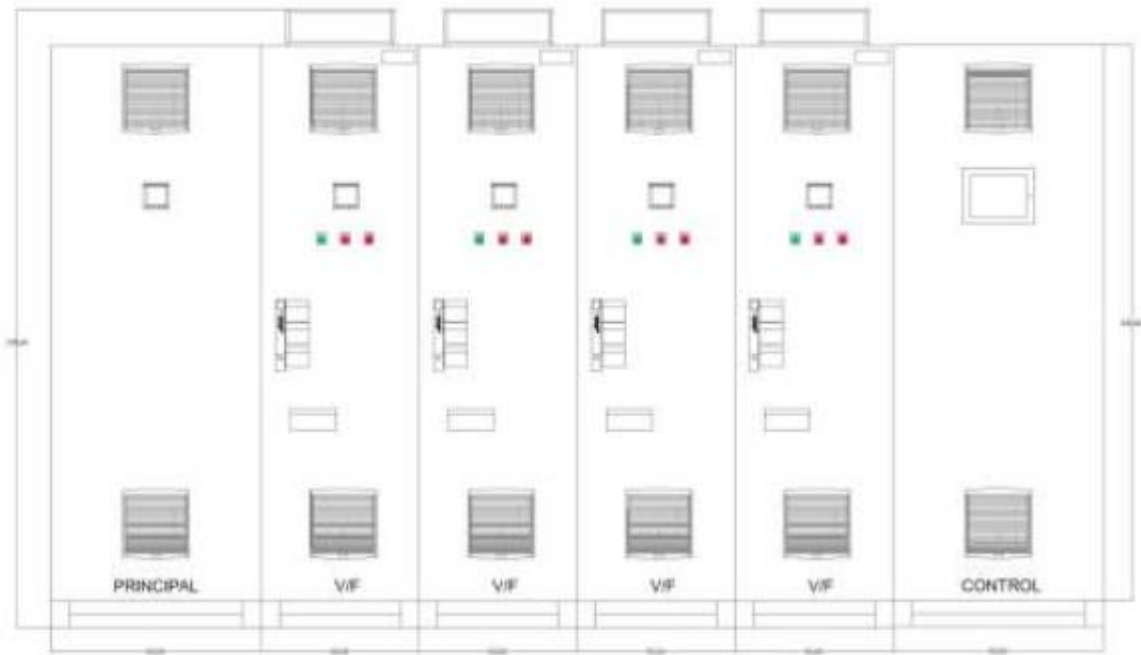
Finalmente se presentan los resultados de la escogencia de los gabinetes que se usarían cuando se ponga en marcha el proyecto. El sistema se compone de seis cuerpos en donde se incluyen los cuatro variadores de velocidad, que ya vienen en presentación de gabinetes verticales y a los que solamente se incluyen equipos secundarios en su interior así como indicadores en la parte frontal de la puerta, uno más para el sistema y equipos de control y el último para la transferencia eléctrica.

A continuación se presenta un diagrama que muestra como son los gabinetes en los que se incorporan cada uno de los variadores de velocidad. Se tiene una vista en la que está el gabinete como es comprado del fabricante, mientras que la otra tiene el montaje de los elementos de indicación ya instalados en su puerta.



**Figura 6.12. Diagrama de los gabinetes de variadores
(María Rojas, SOATI, 2015)**

Seguidamente se muestra el diagrama con la construcción final de los gabinetes incluyendo los seis que forman el cuerpo completo del sistema de control.



**Figura 6.13. Diagrama del cuerpo de gabinetes
(María Rojas, SOATI, 2015)**

De esta forma se muestran los resultados del proceso de diseño del sistema automatizado en sus tres principales partes: la transferencia eléctrica, el control de alternancia de bombas y la obtención de una presión constante de descarga desde la estación hacia la red de distribución. Además de esto se muestra la posible construcción y configuración de los gabinetes en los que se instalarán los equipos.

Capítulo 7. Resumen financiero.

En el campo económico se tienen datos escuetos sobre los montos manejados tanto por la institución encargada de la administración de acueducto, y por ende de la estación en cuestión, así como de la empresa SOATI que desarrolla el proyecto.

Se obtiene información de este ámbito pero no se puede revelar en su totalidad puesto que incluye datos sensibles sobre la administración de la planta y del manejo interno del proyecto.

A continuación se presenta un cuadro con los costos aproximados de equipos y demás aspectos que se verán involucrados para la posible implementación del proyecto diseñado.

Tabla 7.1. Costos aproximados del proyecto
(Fabián Blanco Piña, 2015)

Descripción	Precios
Equipos	\$150.000
Accesorios de armado	\$4.000
Mano de obra	\$10.000
Sub-Total	\$164.000
Impuestos	\$20.000
Total	\$184.000

Como se observa de la información anterior, el costo total del proyecto sería relativamente elevado pero, se considera que los beneficios que se obtendrían de la implementación del sistema, vendrían a sobrepasar la inversión en un tiempo corto.

Uno de los principales aspectos en los que se mejoraría el funcionamiento y en que se daría ahorro monetario, es en la facturación eléctrica de la planta. Esto porque con el sistema de manejo de bombas se obtendrá una mayor eficiencia de los equipos. Lo anterior quiere decir que se obtendrá el bombeo del agua, con una

presión constante, haciendo un uso más efectivo de la electricidad que consumen los equipos.

En comparación con un sistema convencional como el actual de la estación de Bajo Barrantes, que utiliza arrancadores suaves y contactores en etapa para el manejo de las bombas, se considera una disminución aproximada de 15% en los costos de funcionamiento en cuanto a electricidad, cuando los equipos están operando.

Además de esto y aunado al uso del sistema de monitoreo y alternancia de los motores se estima un ahorro en cuanto al mantenimiento de los mismos. Esto porque permite realizar estas acciones de forma preventiva, evitando así paros imprevistos que desembocarían en pérdidas monetarias y extendiendo la vida útil de los equipos de forma que la actualización de estos se demore más.

En cuanto a la tasa de retorno de la inversión se tiene que es bastante alta y que, en plazos, se espera una recuperación total de los gastos en aproximadamente dos años. Esto porque, aunque la inversión es relativamente alta, los beneficios obtenidos de la implementación se darían de forma inmediata a la instalación de los equipos y del sistema de control.

Entre estos beneficios se encuentran una mejora en la eficiencia de la estación lo que daría como consecuencia ahorro en los pagos por electricidad, disminución de reparaciones en los equipos así como planeamiento del mantenimiento, de forma que se pase de correctivo a preventivo y predictivo, para así lograr un retorno rápido de la inversión.

Capítulo 8. Conclusiones.

- Se logra crear una aplicación que, mediante mediciones obtenidas de dispositivos electrónicos, determine cuándo se dan fluctuaciones fuera de los rangos permitidos en los valores de parámetros eléctricos de alimentación de la estación y de presión de salida de agua, y pueda reaccionar ante estas de forma automática, enviando instrucciones desde el controlador principal a los aparatos de regulación, mitigando así el efecto negativo de dichas variaciones tanto sobre el proceso como sobre los equipos.
- Durante el desarrollo del proyecto se da la escogencia de equipos y dispositivos aptos para las características de funcionamiento deseadas del sistema. De forma que se pone en práctica el conocimiento adquirido en cuanto a discernimiento de las mejores opciones de elementos de acuerdo a la función que deben desempeñar.
- Se corrobora el funcionamiento y efectividad del sistema diseñado mediante una serie de simulaciones de la programación que se realizó como posible a implementar, obteniendo una alta confiabilidad y seguridad en la operación de la misma.
- Al finalizar la programación se obtiene un sistema que monitorea los tiempos de operación de cada una de las bombas que funcionan en la estación de Bajo Barrantes, comparando los de cada una para que, cuando exista determinada diferencia entre estos valores, es capaz de apagar y encender los respectivos equipos para mantenerlos con un desgaste por operación en niveles similares.
- Finalmente se satisfacen las solicitudes realizadas por el cliente, de forma que quedan complacidas ambas partes, tanto la empresa SOATI, como empresa en la que se desarrolla el proyecto, así como el cliente final que es quien verá

solventada la necesidad a la que le buscaba una solución previo al diseño presentado en este documento.

8.1 Recomendaciones

En cuanto a recomendaciones se puede pensar en utilizar un diseño que incluya un historiador de datos. Esto porque una herramienta que permita mantener la información almacenada en una base de datos va a permitir que se tenga acceso a esta en el futuro. Lo anterior con el fin de disponer de un registro para funciones como determinar los períodos de mantenimiento de cada uno de los equipos instalados, establecer la eficiencia de los mismos y cuándo esta decae para poder así saber el momento adecuado de realizar una renovación de los dispositivos, entre otras funciones que serían posibles con el uso de los registros históricos de los datos de monitoreo y control.

Bibliografía.

Acedo, S. (2007) "*Instrumentación y control básico de procesos*". Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España.

Álvarez, Ml. (2000) "*Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SSR*". Editorial Marcombo. Barcelona, España.

Balcells, J; Romeral J. (1997) "*Autómatas programables*". Editorial Marcombo. Barcelona, España.

Bolton, W. (2009) "*Programmable logic controllers*". Elsevier. Estados Unidos

Castro, M. (2007) "*Comunicaciones industriales: Principios básicos*". UNED, Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, España.

Creus, A. (2011) "*Instrumentación industrial*". Undécima Edición. Editorial Marcombo. Barcelona, España.

Creus, A. (2007) "*Nemática e Hidráulica*". Editorial Marcombo. Barcelona, España.

Cummins Power Generation. "*Application Manual – Transfer Switches. Chapter 4: Transfer equipment control.*" Cummins Publishing.

Daneri, P. (2008) "*PLC Automatización y control industrial*". Editorial Hispano Americana S.A. Buenos Aires, Argentina.

Dembowski, K. (2003) "*Gran libro de Hardware*", Segunda Edición. Editorial Marcombo. Barcelona, España.

ERITECH. "*SES200 Transient discriminating service entrance supressor*". Documentación técnica ERICO.

Estudios Generales UdV. "*Sistemas industriales distribuidos. Tema 2: Redes de comunicación: topología y enlaces*". Universidad de Valencia.

Estudios Generales UdV. "*Sistemas industriales distribuidos. Tema 3: Redes de comunicación industriales*". Universidad de Valencia.

García, L. (2014) "*Instrumentación básica de medida y control*". AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid, España.

Gallardo, S. (2015) "*Elementos de sistemas de telecomunicaciones*". Primera Edición. Ediciones Paraninfo. Madrid, España.

Grupo de investigación en energías. "*Ahorro de energía en sistemas de bombas centrífugas*". Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente. Colombia.

Harper, E. (2005) "*Elementos de diseño de subestaciones eléctricas*". Editorial Limusa. Noruega

Luszczewski, A. (1999) "*Bombas para agua, ventiladores y compresores*". Reverté Ediciones. Ciudad de México, México.

Martínez, Y. (2011) "*Metodología para el diseño hidráulico de las estaciones de bombeo para acueducto*". Editorial Universitaria. La Habana, Cuba.

Méndez, M. (2007) "*Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*". Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela.

Municipalidad de San Ramón. (2015) "*Atlas cantonal de Costa Rica*". Sistema de información municipal territorial. Tomado de: https://drive.google.com/folderview?id=0Bz7aWmQ3CzMkfmgtRDQxRzR3RTVlamE5X2xBajlNd2hoZkZpTHBUTHVZMWZuU0IUc3J4bm8&usp=drive_web&tid=0Bz7aWmQ3CzMkfkNQdHdidUkyTkRVREhfRm9iWnp0Skh6WI9YQjR1UkhLMWxwOTITak1YTFk

Naranjo, A. (2006). "*Proyecto del sistema de distribución eléctrico*". Equinoccio Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.

Ogata, K. (2003) "*Ingeniería de Control moderno*". Pearson - Prentice Hall. Madrid, España.

Oliva, N (coord.). (2013) "*Redes de comunicaciones industriales*". Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, España.

Ortiz, J. D. (2006) "*Mecánica de fluidos e hidráulica*". Universidad Del Valle. Bogotá, Colombia.

Peña, J. (2003) "*Comunicaciones en el entorno industrial*". Editorial UOC. Aragón, España.

Rodríguez, A. (2007) "*Sistemas SCADA*". Segunda Edición. Editorial Marcombo. Barcelona, España.

Rodríguez P, A. (2008) "*Comunicaciones industriales*". Ediciones técnicas Marcombo. Barcelona, España.

Rodríguez P, A. (2008) "*Sistemas SCADA*". Segunda Edición. Editorial Marcombo. Barcelona, España.

Saucedo, S; Rodríguez, J. (1985) "*Apuntes de control automático de procesos*". Editorial Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México.

Schneider Electric. "*Electrical network management. PowerLogic Catalogue*". Documentación técnica Schneider Electric.

Schneider Electric. "*Motion Drives. Tarjeta multibombas*". Documentación técnica Schneider Electric.

Schneider Electric. "*Redes industriales. Capítulo 9*". Documentación técnica Schneider Electric.

Schneider Electric. "*Sistemas de transferencia de redes*". Documentación técnica Schneider Electric.

Schneider Electric. "*Soluciones y ahorro de energía con variadores de velocidad*". Jornadas técnicas Schneider Electric.

Schneider Electric. (2015) "*Source changeover systems*". Documentación técnica Schneider Electric

Users Profesional. (2005) "*Redes avanzadas*". Revista y manual.

Valencia, F. (2011) "*Manual básico de configuración de redes CISCO*". Edición 2011. CISCO.

Villalobos, G; Rico, R; Ortíz, F; Montúfar, M. (2006) ".Editorial Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México.

Zubicalay, M. (2004) "*Bombas teoría, diseño y aplicaciones*". Editorial Limusa S.A. Noruega.