

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Electrónica



Control de la mezcla concreto-aditivo para la máquina proyectora de concreto
ALIVA III

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

Greivin Morera Sandoval

Cartago, Noviembre del 2008

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

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

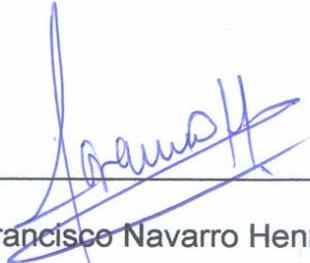
Miembros del Tribunal



Ing. Julio Stradi Granados
Profesor lector



Ing. José David Gómez Támes
Profesor lector



Ing. Francisco Navarro Henríquez
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 Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 25 de noviembre de 2008

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, 25 Noviembre 2008



Greivin Morera Sandoval

Céd: 1-1149-0198

Resumen

Una de las principales fuentes de producción de energía eléctrica de Costa Rica son las plantas hidroeléctricas. Uno de estos proyectos está siendo desarrollado en este momento en la zona de Venecia, Alajuela, por parte del Instituto Costarricense de Electricidad. Este proyecto es llamado Proyecto Hidroeléctrico Toro III. Para el desarrollo de este tipo de proyectos hidroeléctricos se requiere la perforación de extensos túneles en el terreno, la cual es una de las etapas actuales del proyecto. Estos túneles una vez que son excavados deben ser reforzados de manera que se evite un posible colapso, tanto durante la fase de perforación como durante el funcionamiento del túnel.

Una de las partes del proceso de estabilizar dichos túneles es recubrirlos con concreto. Para esto se utiliza una máquina proyectora de concreto, el ICE adquirió una de estas máquinas hace ya varios años y ha sido utilizada en diversos proyectos. La máquina ubicada en el Proyecto Hidroeléctrico Toro III es una máquina de fabricación europea, llamada ALIVA III (empresa SIKA).

Para poder proyectar concreto se requiere mezclar el concreto a lanzar con aditivo acelerante de secado, de manera que al entrar en contacto con la superficie del túnel, el concreto se endurezca lo más rápido posible. Cuando estas máquinas fueron adquiridas existía un sistema encargado de regular la relación en la mezcla concreto-aditivo, pero en la actualidad este sistema no funciona.

Al fallar este sistema los operarios se han visto forzados a regular la cantidad de aditivo a dosificar por m^3 de concreto de una forma empírica que resulta bastante imprecisa. Estos errores en la cantidad de aditivo dosificado comprometen la calidad del concreto y por ende la estabilidad del túnel en las partes donde es reforzado por el método de concreto lanzado.

Ante la situación actual se plantea como solución la implementación de un sistema de control, para que la máquina funcione de manera automática. Donde el operario pueda de una forma simple y amigable, introducir a la máquina la relación de concreto-aditivo deseada. Y tener certeza de que el concreto proyectado tenga la relación deseada, de la forma más precisa posible y que garantice una calidad optima de la mezcla concreto-aditivo.

Palabras clave:

- **Aditivos para concreto**
- **ALIVA III**
- **Concreto lanzado**
- **I.C.E (Instituto Costarricense de Electricidad)**
- **SIKA**
- **Túneles.**

Summary

One of the main sources for electric energy production in Costa Rica is the hydroelectric plants. One of these projects is being developed actually in the zone of Venecia, in the province of Alajuela, by the Instituto Costarricense de Electricidad. This project is named Proyecto Hidroeléctrico Toro III (Toro III hydroelectric project). To develop this kind of projects is necessary to dig tunnels in the earth surface; this is one of the actual steps of the project execution. The tunnels must be reinforced to avoid collapse of the structure.

One of the parts of the stabilization process of the tunnels is to cover the entire surface with concrete. To accomplish this duty it is used a concrete spraying machine, the Instituto Costarricense de Electricidad possesses one of these machines, this machine has been used in other projects in the past. The machine is located in the Proyecto Hidroeléctrico Toro III. This machine is a European factory machine, from the SIKA Company and is named ALIVA III.

To achieve the concrete projecting process is necessary to mix the concrete with a drying accelerating additive, this way when the concrete gets in contact with the tunnel surface, the concrete will dry as soon as possible. When this machine was acquired there used to be a system in charge of regulating the mixture additive-concrete, but actually this system is working no more.

With the failure of this system the operator has been forced to regulate the additive quantity per m^3 of concrete in a manual way, with imprecision as a result. This imprecision in the additive quantity to dose, affects in a negative way the quality of the concrete.

According to the actual situation is proposed as a solution to develop a control system in the search of an automatic operation of the system. So that the operator of the machine introduces the relation additive-concrete to the system and be sure that the concrete obtained will have the desire additive-concrete relation.

Key words

- **Concrete additive**
- **ALIVA III**
- **Spray concrete**
- **I.C.E (Instituto Costarricense de Electricidad)**
- **SIKA**
- **Tunnel**



Dedicatoria

A Dios, mis padres y mis hermanos María y Mao, mi familia, compañeros y amigos...

Agradecimiento

A todos los que de una forma u otra me ayudaron a avanzar cada día, en los momentos difíciles y en los momentos de alegría. A mis compañeros y amigos quienes juntos nos impulsamos adelante cada día.

A mis padres quienes en muchos momentos hicieron esfuerzos muy grandes, incluso privándose ellos mismos, para que este proceso fuera lo más llevadero para mí.

A todas las personas que me ayudaron tanto en el Proyecto Hidroeléctrico Toro III. A los ingenieros Kermith Carvajal Salas y Edwin Abarca Rivera, al encargado del taller eléctrico Técnico Olma Sancho Camacho por su sobresaliente ayuda y a todos los técnicos del taller eléctrico, por su accesoria, colaboración y por todas las facilidades brindadas. Gracias a su cooperación es que el desarrollo de este proyecto fue posible.

Y a mis profesores por las lecciones recibidas y por impulsarnos siempre a dar más.

Índice general

Capítulo 1: Introducción	13
1.1 Problema existente e importancia de su solución	13
1.2 Solución seleccionada.....	16
Capítulo 2: Meta y Objetivos	19
2.1 Meta	19
2.2 Objetivo general	19
2.3 Objetivos específicos	20
Capítulo 3: Marco teórico	21
3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar.....	21
3.2 Antecedentes Bibliográficos	27
3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema	28
3.4 Ajuste Polinomial.....	28
Capítulo 4: Procedimiento metodológico	34
4.1 Reconocimiento y definición del problema	34
4.2 Obtención y análisis de información.....	35
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	36
4.4 Implementación de la solución	37
4.5 Reevaluación y rediseño	40
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución	41
5.1 Análisis de soluciones y selección final.....	41
5.2 Principio de funcionamiento	43
5.3 Unidad dosificadora	45
5.4 Caracterización de la bomba peristáltica dosificadora de aditivo	46
5.5 Descripción del hardware.....	50
5.6 Descripción del software	66
Capítulo 6: Análisis de Resultados	84
6.1 Resultados	84
6.2 Análisis.....	85
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones	87
7.1 Conclusiones.....	87
7.2 Recomendaciones	88
Bibliografía	89
Apéndices	90
A.1 Glosario y abreviaturas.....	90
A.2 Manual de usuario	94
A.3 Relación concreto aditivo para un diseño de concreto específico.	100
A.4 Información sobre la empresa/institución.....	101
Anexos	103
B.1 Carta de entendimiento.....	103
B.2 Aprobación del departamento de control de calidad.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1	Ubicación del proyecto hidroeléctrico	14
Figura 1.2	Ciclo de perforación del túnel	15
Figura 1.3	Esquema generalizado de la solución implementada.	17

Capítulo 3

Figura 3.1	Esquema generalizado de la máquina ALIVA III	22
Figura 3.2	Esquema generalizado de una proyectora de concreto húmedo.	23
Figura 3.3	Principales partes de la bomba peristáltica Delasco.	25
Figura 3.4	Etapas de bombeo de una bomba peristáltica.....	26
Figura 3.5	Conjunto Rotor/Rodillo/Reflector para bomba peristáltica Delasco.....	26

Capítulo 4

Figura 4.1	Balanza utilizada para la medición de líquido.....	40
-------------------	--	----

Capítulo 5

Figura 5.1	Sistema dosificador	45
Figura 5.2	Curva de mejor ajuste para la bomba dosificadora por CurveExpert	48
Figura 5.3	Diagrama de bloques del sistema.....	50
Figura 5.4	Esquema del bloque de control.	51
Figura 5.5	PLC Siemens S7-300, CPU 313C	52
Figura 5.6	Esquema de sensor inductivo.	54
Figura 5.7	Sensor de alta presión.	55
Figura 5.8	Esquema del bloque de potencia.....	57
Figura 5.9	Variador de frecuencia Siemens Micromaster 440.....	58
Figura 5.10	Motor trifásico.....	59
Figura 5.11	Control provisional para el usuario.	60
Figura 5.12	Diagrama eléctrico del sistema de control.....	61
Figura 5.13	Fotografías del circuito implementado.....	65
Figura 5.14	Diagrama de flujo bloque OB1	72
Figura 5.15	Diagrama de flujo para configuración de sistema dosificador	74
Figura 5.16	Diagrama de flujo para selección de función de configuración.	75
Figura 5.17	Diagrama de flujo para configuración de parámetros.....	76
Figura 5.18	Estructura de instanciación de bloques funcionales del programa.	77
Figura 5.19	Diagrama de registro de pulsos para bloque Cantidad dispensada.....	79
Figura 5.20	Escalamiento de la señal de frecuencia.	81

Capítulo 6

Figura 6.1	Sitio de pruebas realizadas al sistema dosificador de aditivo.	84
-------------------	---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 4

Tabla 4.1	Medición para diseño de concreto 500 kg al 3%.....	38
------------------	--	----

Capítulo 5

Tabla 5.1	Datos para la caracterización de la bomba peristáltica.....	46
------------------	---	----

Tabla 5.2	Continuación tabla 5.1	47
------------------	------------------------------	----

Tabla 5.3	Tabla comparativa de ventajas y desventajas de PLC vs Microcontrolador.....	42
------------------	---	----

Tabla 5.4	Características para PLC Siemens S7-300.....	53
------------------	--	----

Tabla 5.5	Fases de la ejecución cíclica del programa en un Controlador Lógico Programable. .	68
------------------	--	----

Capítulo 6

Tabla 6.1	Datos de la medición final realizada al sistema dosificador.	85
------------------	---	----

Capítulo 1: Introducción

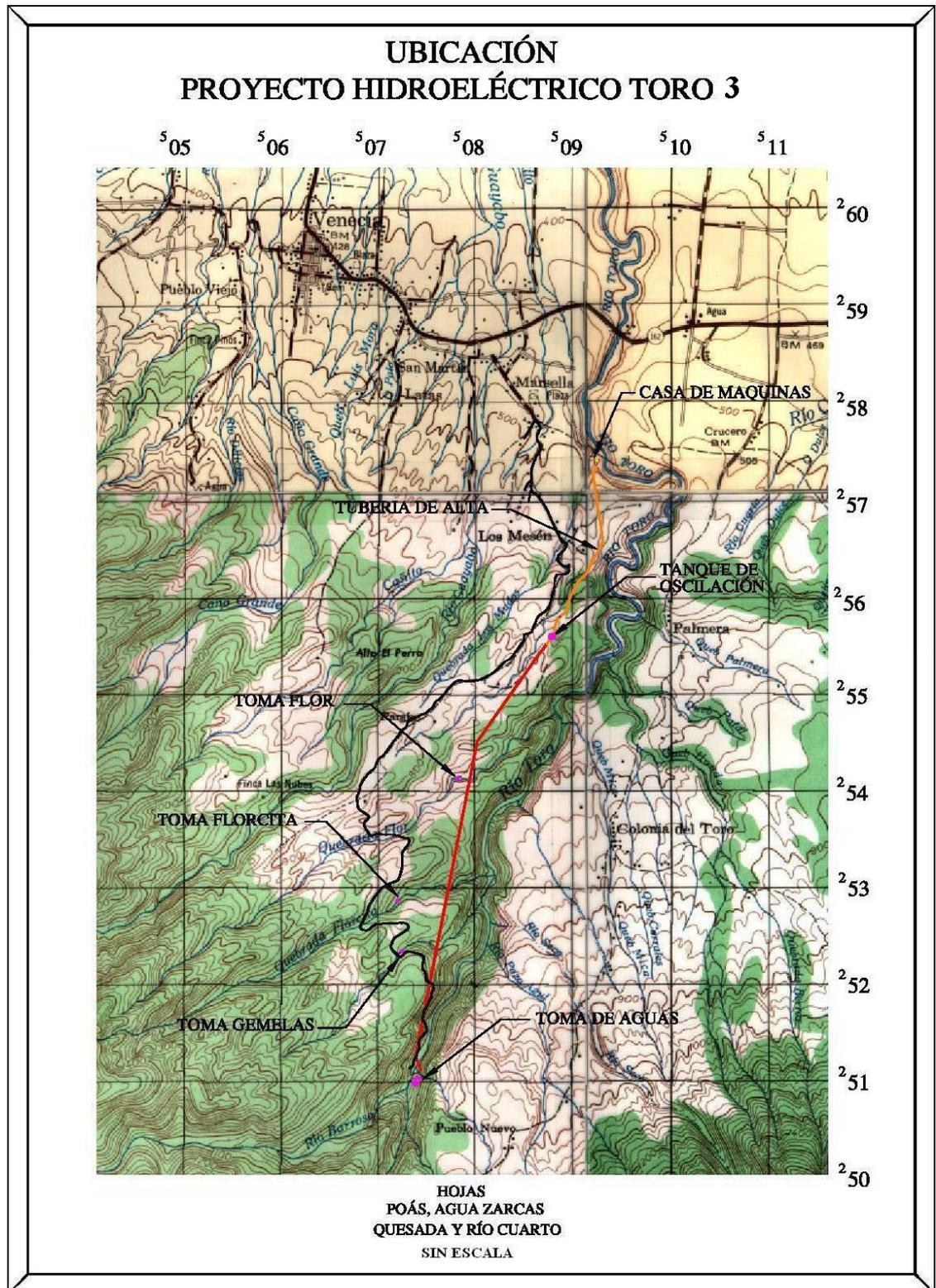
En el siguiente capítulo se presenta una descripción del problema existente y la importancia de su solución mostrando los beneficios que obtendrá la empresa al solucionar este problema. Además se hace una descripción general del tipo de solución que se decidió implementar.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

El Proyecto Hidroeléctrico Toro III (de ahora en adelante llamado PH Toro III) se ubica en la provincia de Alajuela en el distrito Venecia del cantón de San Carlos. Este proyecto se construyó con el fin de aprovechar las aguas que salen de la casa de máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Toro II. En este momento los dos principales frentes de trabajo del proyecto son: el Pozo Túnel (PT) y el Final de Túnel (FT).

El Pozo Túnel como su nombre lo dice es un pozo encargado de recoger las aguas de la casa de máquinas de Toro II y conducir las a través de un túnel que está siendo perforado en el fondo del pozo hasta la casa de máquinas. El Final de Túnel es el punto donde se ubicará la casa de máquinas del proyecto. Este túnel de 4700 metros de longitud que conectará el Pozo Túnel con la casa de máquinas de Toro III, es perforado en dos direcciones por dos equipos de perforadores.

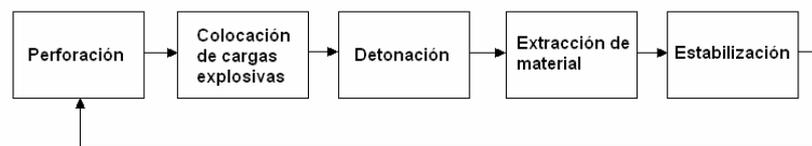
En la siguiente imagen se muestra un mapa de la ubicación del proyecto hidroeléctrico sobre un mapa de la zona de los distritos de Venecia y Río Cuarto.



Autocad

Figura 1.1 Ubicación del proyecto hidroeléctrico

Durante la perforación en los dos frentes de trabajo el equipo de perforación encuentra en su camino diversos tipos de materiales en el subsuelo. Algunos materiales como la roca sólida son favorables para la perforación segura dentro del túnel. Pero no siempre el material encontrado es estable por lo que se aplican diversos métodos para reforzar y estabilizar el túnel durante la perforación. De estos métodos utilizados para reforzar el túnel el de interés para este proyecto es el método de concreto lanzado. El proceso de perforación descrito a grandes rasgos cumple un ciclo como el mostrado en el diagrama de la figura 1.2.



Paint

Figura 1.2 Ciclo de perforación del túnel.

Es en la etapa de estabilización donde se utiliza el proceso de concreto lanzado. Para el proceso de proyección o lanzado de concreto en el PH Toro III se utiliza una máquina de fabricación Europea llamada Aliva III. Esta máquina es capaz de bombear hasta 20 m³ por hora de concreto. El concreto antes de ser lanzado contra los techos y muros del túnel, debe ser mezclado con un aditivo acelerante para hacer más rápido el proceso de secado y evitar que este se desprenda por la acción de la gravedad. Desde su fabricación la máquina contaba con un sistema que dosificaba cierta cantidad de aditivo por m³ de concreto, pero en la actualidad este sistema está fuera de funcionamiento.

Así mediante este proyecto se pretende solucionar el problema en cuestión de la incapacidad actual de regular la relación en la mezcla concreto-aditivo en la máquina Proyectora de Concreto **ALIVA III**.

Este problema se pretende solucionar con la implementación de un sistema de control que regule la dosificación de aditivo, y así la mezcla concreto-aditivo en la máquina Aliva III de una forma precisa.

La solución de este problema es de gran importancia ya que en el estado actual de funcionamiento de la ALIVA III, los resultados en la proyección de concreto no son los deseados generando pérdidas económicas y de calidad.

Al solucionarse este problema la empresa obtendrá una serie de beneficios como:

- Mayor control en las dosis de aditivo aplicadas al concreto.
- Concreto lanzado de calidad.
- Menores gastos económicos al no tener que remover concreto por fallos en su calidad.
- Agilización del proceso de perforación del túnel al no existir retrasos causados por la necesidad de remover concreto que no aprobó las pruebas de calidad.

1.2 Solución seleccionada

La solución seleccionada consistió en la implementación de un nuevo sistema de dosificación de aditivo en la máquina ALIVA III. Como requerimientos para la solución implementada la empresa solicitó:

1. Un sistema que permita introducir los parámetros deseados desde un panel.
2. Precisión en la dosificación de aditivo.
3. Un sistema robusto, capaz de trabajar en las duras condiciones de un túnel.

El nuevo sistema de control de la máquina, funciona de manera automática. El operario introduce a la máquina los datos para la relación de concreto-aditivo deseada y el sistema se encarga de determinar la cantidad de aditivo a agregar al concreto en litros por minuto para mantener la relación que le fue programada.

El sistema de control se implementó con un dispositivo Controlador Lógico Programable (PLC). Además el sistema cuenta con un panel de control que es la interfaz entre el operario y el sistema de control. De esta forma el usuario define al sistema los parámetros dentro de los cuales desee que regule la mezcla concreto-aditivo. El sistema se muestra en el siguiente esquema de la figura 1.3.

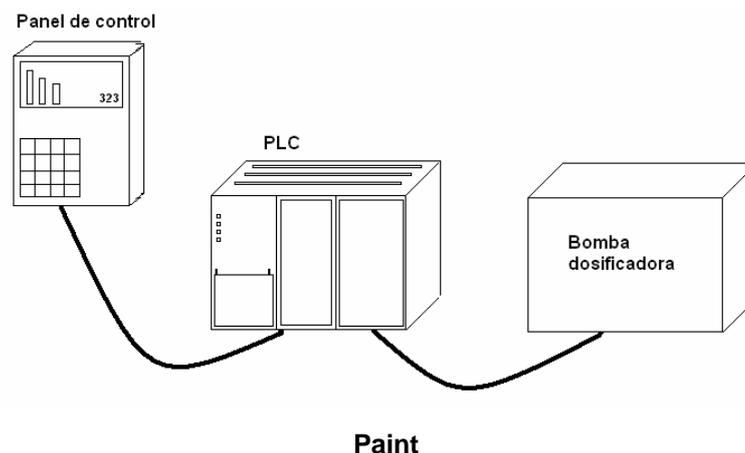


Figura 1.3 Esquema generalizado de la solución implementada.

En función de estos parámetros el sistema se encarga de monitorear las señales provenientes de los sensores y relacionar estos datos con las ecuaciones matemáticas programadas. Para generar las señales para controlar los “músculos” del sistema de control, la bomba de dosificación.

La elección del PLC como “cerebro” del proyecto, está en función de sus capacidades. Por su construcción los PLC funcionan de forma robusta y autónoma, no requiere de elementos adicionales para su funcionamiento. Son diseñados para funcionar en ambientes hostiles, donde las condiciones ambientales serían dañinas para otro tipo de

dispositivos. Se tomó en cuenta su capacidad para realizar operaciones matemáticas complejas y su lenguaje de programación de alto nivel, que facilita su programación. Además estos sistemas son flexibles y permiten incluir futuras mejoras.

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1 Meta

Lograr que la bomba dosificadora de aditivo de la máquina proyectora de concreto ALIVA III, gobernada por el sistema de control de mezcla concreto-aditivo, dosifique la cantidad de litros por minuto necesarios para cumplir con un determinado diseño de concreto, con un porcentaje de error menor al 2%.

Indicador: Documento extendido por el departamento de Control de Calidad del Proyecto Hidroeléctrico Toro III, que indica que el sistema opera dentro de los rangos deseados.

2.2 Objetivo general

Desarrollar un sistema de control que permita regular de forma precisa el funcionamiento de la bomba dosificadora de aditivo, para la máquina proyectora de concreto ALIVA III.

Indicador: Dosificación de aditivo con un error menor 2% por litro de aditivo acelerante de secado dispensado por la bomba dosificadora.

2.3 Objetivos específicos

1. Caracterizar la máquina ALIVA III a través de un análisis físico-matemático.

Indicador: Conjunto de datos que representan el comportamiento real de la planta.

2. Diseñar un controlador cuyos parámetros se puedan ajustar para que permitan obtener una respuesta deseada en el sistema.

Indicador: Conjunto de ecuaciones que representan el controlador buscado.

3. Implementar el sistema de control de mezcla concreto-aditivo, en un panel de control colocado en la máquina ALIVA III.

Indicador: Conjunto de elementos eléctricos y electrónicos, instalados para regular el funcionamiento del sistema mecánico de dosificación de la máquina ALIVA III.

Capítulo 3: Marco teórico

En el siguiente capítulo se presenta una descripción detallada de la solución implementada. Haciendo uso de diagramas, ilustraciones, fotografías y tablas para facilitar el entendimiento del sistema implementado.

3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar

Como se describió anteriormente una parte importante del proceso de perforación de túneles en el proyecto hidroeléctrico es la estabilización por medio de concreto lanzado. Esto se realiza mediante una máquina llamada ALIVA III, la cual es una proyectora de concreto.

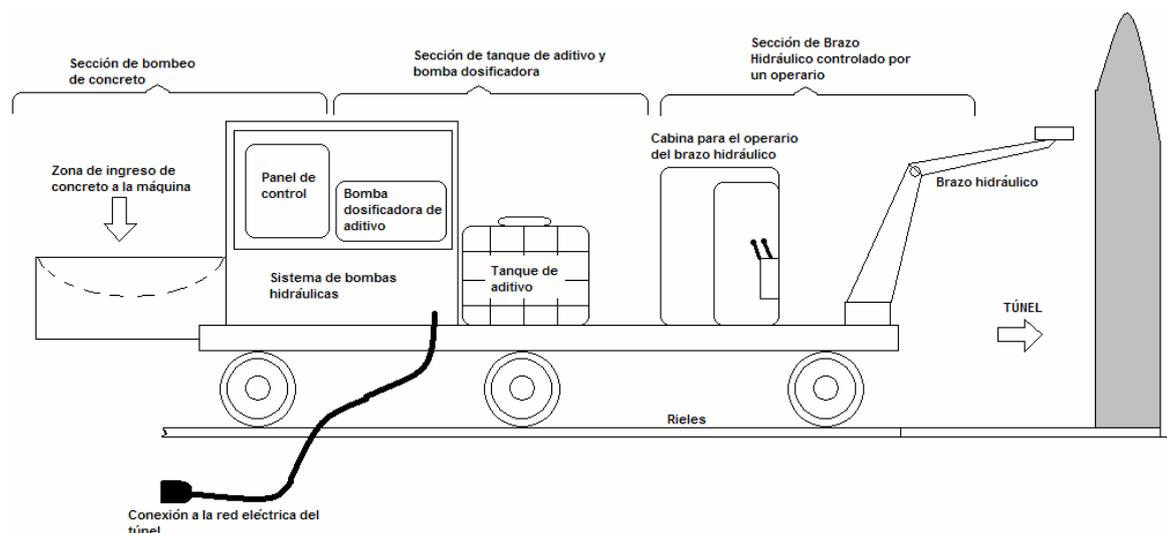
En la actualidad esta máquina se encuentra en un proceso de reparación. En este momento muchas de sus funciones no están operando de la forma que lo hacían en su configuración de fábrica. En la actualidad la Aliva III perdió la capacidad de regular la mezcla de concreto con aditivo en forma automática. El costo monetario de esta máquina es significativo, alrededor de los 275 mil dólares. Debido a esto y a la gran utilidad de la máquina el ICE se ha dado a la tarea de hacer reparaciones para mantenerla operando.

En el estado actual de la máquina, se puede controlar la cantidad de aditivo agregado de una forma manual, con la ayuda de un potenciómetro montado en el tablero de control. Utilizar la máquina de esta forma resulta poco práctico, ya que los operarios deben realizar constantes ajustes al potenciómetro. Con la complicación de tener que usar tablas de conversión, ya que la información que se muestra en el tablero de control no es un dato directo de litros o cm^3 de aditivo. Sino que es un dato de la frecuencia a la que está funcionando el motor trifásico encargado de mover la bomba de dosificación de aditivo. Esto además de ser complicado favorece la aparición de errores en lograr la relación adecuada para obtener un concreto de calidad.

3.1.1 Descripción de la máquina proyectora de concreto.

La ALIVA III es una máquina proyectora de concreto modelo AL-278. Esta máquina está compuesta por un brazo robot controlado manualmente por un operario, una sección de bomba y tanques de aditivos, y la sección de bombeo de concreto. Todas estas partes están montadas sobre un chasis con ruedas metálicas que se desplazan a través de un sistema de rieles, a semejanza de un tren, a lo largo del túnel perforado. Durante la operación normal de la máquina el concreto es introducido desde el exterior, luego una bomba de pistón lo impulsa por un conducto, para que por último el concreto ya preparado salga disparado por un extremo del brazo robot, gracias a la acción de un flujo de aire a alta presión. La mayoría de los sistemas de la máquina son de tipo hidráulico (aceite), la presión hidráulica es proporcionada por bombas hidráulicas, que a su vez son movidas por motores eléctricos. Para su funcionamiento, la máquina cuenta con una conexión a la red eléctrica dentro del túnel para su alimentación.

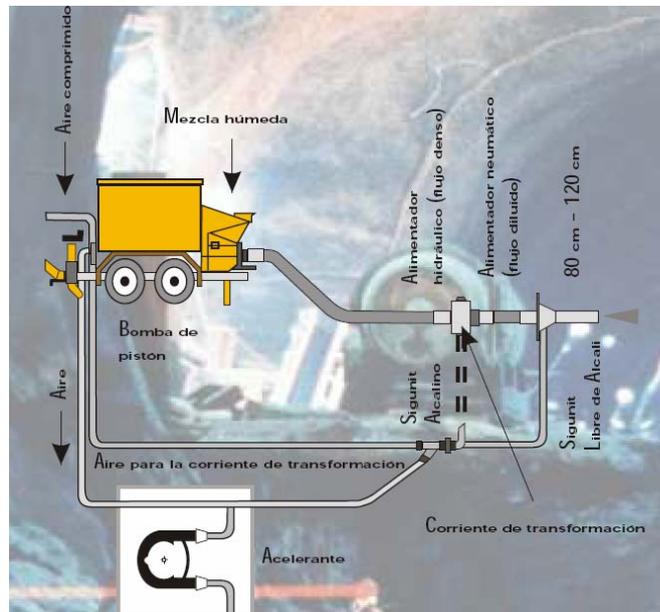
El siguiente es un esquema de la máquina ALIVA III:



Paint

Figura 3. 1 Esquema generalizado de la máquina ALIVA III
(Basado en la observación visual en el campo).

En la siguiente figura se muestra el esquema generalizado de una proyectora de concreto húmedo, mismo tipo que la ALIVA III. Proporcionado por el fabricante.



Editada con Paint

Figura 3. 2 Esquema generalizado de una proyectora de concreto húmedo.¹

Observando el esquema de la figura 3.2 se puede distinguir las principales partes de un sistema de proyección de concreto. Primero está la bomba de pistón que se encarga de impulsar el concreto a través de una tubería hasta la boquilla. Luego un grupo de tuberías de aire comprimido que se encuentran con la tubería que proviene de la bomba de aditivo acelerante y se encargan de transportar el aditivo hasta la boquilla. Para finalmente emitir la mezcla concreto-aditivo a gran presión sobre la superficie a recubrir.

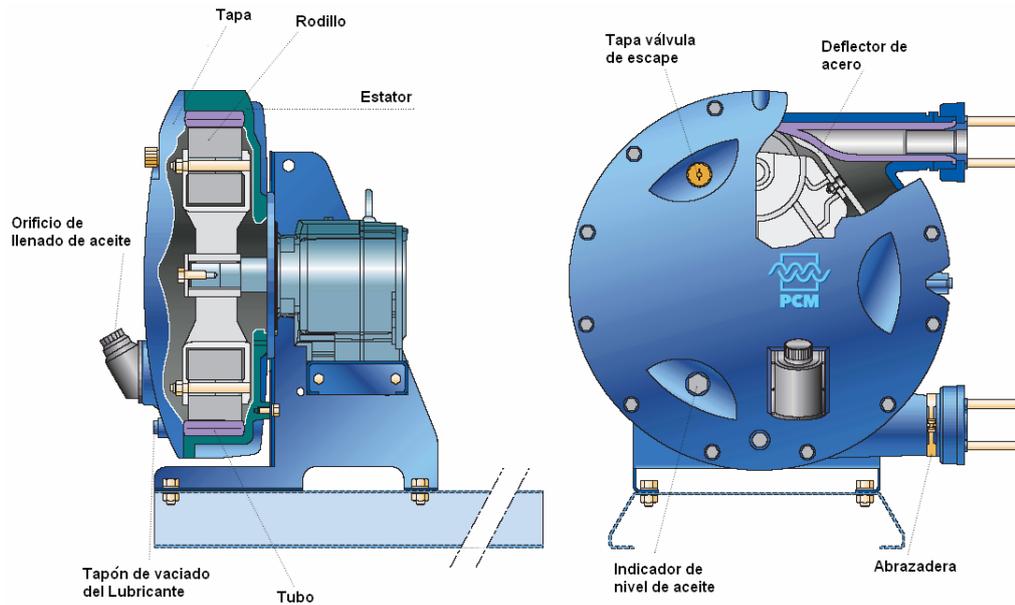
¹ Imagen tomada y editada de www.sika.com

3.1.2 Sistema de dosificación de aditivo.

El aditivo es un producto químico, en este caso silicato de metilo, que es un acelerante el proceso de secado del concreto. Es añadido con el objetivo de que el concreto proyectado se adhiera rápidamente a la superficie contra la que es lanzado.

Para la dosificación de aditivo la máquina cuenta en su diseño original con una bomba dosificadora peristáltica del fabricante PCM Delasco, la cual dentro de sus especificaciones técnicas provee una relación directa entre el caudal en litros/hora que es capaz de bombear y las revoluciones a las que está girando. Esta bomba es impulsada por un motor trifásico de 440V/2 Hp conectado a una caja reductora de velocidad, que cuenta en la actualidad con un sistema variador de frecuencia para controlar su velocidad de giro. La bomba extrae el aditivo de un tanque de almacenamiento, montado en el chasis de la máquina.

Una bomba peristáltica es un tipo de bomba cuyo funcionamiento se basa en un sistema de rodillos giratorios que presionan una manguera de caucho. Este proceso de presionar la manguera produce un caudal de salida. La siguiente figura muestra la estructura de una bomba de este tipo.



Editada con Paint

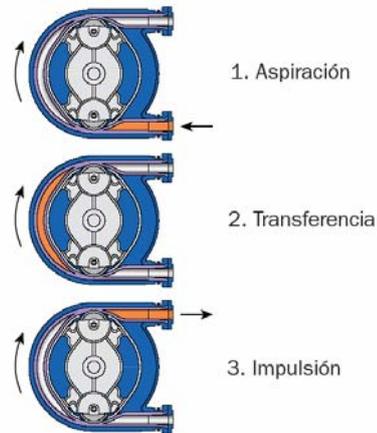
Figura 3. 3 Principales partes de la bomba peristáltica Delasco.²

Para el funcionamiento de esta bomba se dan 3 etapas:

1. Aspiración: donde el líquido es succionado del tanque de reserva.
2. Transferencia: donde por la acción de los rodillos el líquido es impulsado a través de la manguera de caucho.
3. Impulsión: donde el líquido alcanza la salida de la bomba.

² Imagen editada de figuras obtenidas en la hoja técnica del Fabricante PCM.
www.pcm.eu

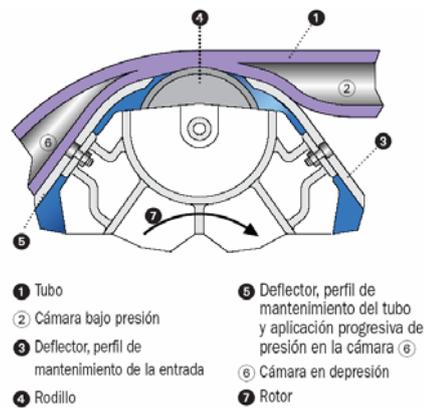
Estas etapas se muestran en la figura 3.4.



Editada con Paint

Figura 3. 4 Etapas de bombeo de una bomba peristáltica.³

En la figura 3.5 la parte del diagrama color púrpura representa la manguera. Se observa la acción de los rodillos y los deflectores sobre la manguera de caucho, permitiendo impulsar el líquido con el giro del rotor de la bomba.



Editado con Paint

Figura 3. 5 Conjunto Rotor/Rodillo/Reflector para bomba peristáltica Delasco.⁴

³ Imagen editada de figuras obtenidas en la hoja técnica del Fabricante PCM.
www.pcm.eu

⁴ Imagen editada de figuras obtenidas en la hoja técnica del Fabricante PCM.
www.pcm.eu

3.1.3 Sistema de bombeo de concreto.

En lo referente a la cantidad de metros cúbicos de concreto que son lanzados por la máquina, el sistema físico que permite esto, está formado por un conjunto de mecanismos hidráulicos y es llamado bomba de pistón. Estos mecanismos hidráulicos son accionados por un dispositivo llamado válvula proporcional de un solo solenoide, la cual es controlada mediante una señal de PWM proveniente de un dispositivo generador de PWM, controlado por un PLC Mitsubishi instalado en el panel de control de bombeo de concreto.

3.2 Antecedentes Bibliográficos

Dentro de la investigación realizada para la implementación del proyecto, la búsqueda se orientó hacia el sistema ya existente, es decir la Aliva III y sus componentes. En la página oficial del fabricante SIKA (www.sikaconstruction.com) se obtuvo información importante sobre el proceso de concreto lanzado. Además se tiene el conocimiento de la existencia con anterioridad de un sistema similar al implementado, ya que la máquina en su configuración de fábrica lo poseía.

Además se investigó en las páginas oficiales de los fabricantes de PLCs, específicamente SIEMENS (www.siemensautomation.com), debido a que el PLC proporcionado por la empresa es de esta casa fabricante. De esta manera se pudo comprobar en la documentación técnica y ejemplos presentes en esta página que el dispositivo PLC podía ser utilizado en una aplicación de este tipo. Conociendo estos antecedentes se procedió a la implementación del sistema.

3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema

Dentro de los principales fenómenos físicos relacionados con la implementación de la solución están los relacionados con sistemas rotacionales. Puesto que el sistema de la bomba dosificadora es un sistema en esencia rotacional. Además se requieren principios relacionados con conversiones de unidades, para determinar las relaciones de volumen de líquido y densidades.

En cuanto a los principios electrónicos relacionados con la solución están el manejo de señales analógicas, conexiones eléctricas básicas, conexión de dispositivos de potencia, interpretación de hojas de datos de fabricante. He implementación mediante software de sistemas de control de hardware.

3.4 Ajuste Polinomial

Un punto en el plano está determinado por una par ordenado de la forma (x, y) donde x pertenece al eje de las abscisas y y pertenece al eje de las ordenadas. Si se tiene una colección de n puntos en el plano xy expresados como

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$$

Se necesita construir una función polinómica

$$P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{n-1}x^{n-1} \text{ (Ecuación 3.1)}$$

que contenga todos los n puntos o que se ajuste de la mejor manera a ellos, se debe encontrar el valor **único** de los coeficientes $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}$ de $P(x)$.

Para ello sustituye los n puntos en el polinomio de grado $n - 1$, obteniendo n ecuaciones lineales cuyas incógnitas son precisamente $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}$.

Así: al reemplazar (x_1, y_1) en $P(x)$ se obtiene la primera ecuación que es de la forma:

$$a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + \dots + a_{n-1}x_1^{n-1} = y_1 \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Al reemplazar (x_2, y_2) en $P(x)$ se obtiene la segunda ecuación:

$$a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + \dots + a_{n-1}x_2^{n-1} = y_2 \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Y así sucesivamente se reemplazan todos los puntos en la función polinómica $P(x)$ hasta obtener la $n - \text{ésima}$ ecuación:

$$a_0 + a_1x_n + a_2x_n^2 + \dots + a_{n-1}x_n^{n-1} = y_n \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Este método es llamado Ajuste polinomial de curvas.

Ahora, el sistema de n ecuaciones lineales con n incógnitas encontrado debe solucionarse, para esto existen diversos métodos para encontrar el valor de las incógnitas⁵.

⁵ Tomado del documento "Taller ajuste polinomial de curvas" Autor: Ing Francisco Orjuela. Cita bibliográfica numero 7.

Por ejemplo para encontrar el polinomio que se ajuste a los puntos (1,2),(2,4),(3,7)

Como se tienen tres puntos se elige un polinomio de segundo grado.

$$P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Sustituyendo en $P(x)$ los puntos dados se tiene:

Para el punto (1,2) la ecuación es:

$$\begin{aligned} P(x) &= a_0 + a_1 \cdot 1 + a_2(1)^2 \\ a_0 + a_1 + a_2 &= 2 \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

Para el punto (2,4) la ecuación es:

$$\begin{aligned} P(x) &= a_0 + a_1 \cdot 2 + a_2(2)^2 \\ a_0 + a_1 \cdot 2 + a_2 \cdot 4 &= 4 \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

Para el punto (3,7) la ecuación es:

$$\begin{aligned} P(x) &= a_0 + a_1 \cdot 3 + a_2(3)^2 \\ a_0 + a_1 \cdot 3 + a_2 \cdot 9 &= 7 \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

Para obtener el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 + a_2 = 2 \\ a_0 + a_1 2 + a_2 4 = 4 \\ a_0 + a_1 3 + a_2 9 = 7 \end{cases} \quad (\text{Ecuación 3.9})$$

La matriz aumentada del sistema es una matriz obtenida a partir de los coeficientes de las variables y los términos constantes del sistema, así:

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 4 & 4 \\ 1 & 3 & 9 & 7 \end{array} \right) \quad (\text{Matriz 1})$$

Se busca tener una matriz del siguiente tipo:

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & a & b & d \\ 0 & 1 & c & e \\ 0 & 0 & 1 & f \end{array} \right) \quad (\text{Matriz 2})$$

Esta matriz se denomina matriz escalonada, donde las letras a, b, c, d, e, f son constantes.

Con un proceso de las operaciones elementales en los renglones

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 3 & 2 \\ 1 & 3 & 9 & 7 \end{array} \right) - f1 + f2 \quad (\text{Matriz 3})$$

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 3 & 2 \\ 0 & 2 & 8 & 5 \end{array} \right) - f_1 + f_3 \quad (\text{Matriz 4})$$

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 3 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \end{array} \right) - 2f_2 + f_3 \quad (\text{Matriz 5})$$

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 3 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{2} \end{array} \right) \frac{1}{2} f_3 \quad (\text{Matriz 6})$$

De la matriz se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} a_0 + a_1 + a_2 &= 2 \\ a_1 + a_2 \cdot 3 &= 2 \quad (\text{Ecuación 3.10}) \\ a_2 &= \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Despejando del sistema se tiene:

$$\begin{aligned} a_0 &= 1 \\ a_1 &= \frac{1}{2} \\ a_2 &= \frac{1}{2} \end{aligned}$$

La ecuación producto de resolver el sistema es el siguiente:

$$P(x) = 1 + \frac{1}{2}x + \frac{1}{2}x^2 \quad (\text{Ecuación 3.11})$$

La ecuación 3.11 es una ecuación que incluye a los tres puntos del ejemplo.

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

En el siguiente capítulo se describen las etapas seguidas para llegar a la solución del problema. De acuerdo al método de diseño en ingeniería.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Para identificar el problema se partió de la información que se obtuvo en la entrevista con el Ing. Kermith Carvajal en la primera visita realizada al proyecto. Donde el mismo describió el malfuncionamiento de la máquina proyectora, y proporciono datos para realizar búsquedas posteriores de datos suministrados por el fabricante.

Además se utilizo la información proporcionada por el departamento de control de calidad, quienes son los más enterados del malfuncionamiento de la máquina y los usuarios finales del sistema. Sumado a esto se realizó varias visitas al campo de trabajo para observar el funcionamiento de la máquina y anotar el posible origen del problema.

Analizando estos datos en conjunto con los datos del fabricante se llegó a la siguiente definición del problema, el problema en si es la incapacidad actual de la máquina ALIVA para regular la mezcla concreto aditivo. Esto debido a que no se tiene un control sobre la cantidad de aditivo que es aplicado a la mezcla por metro cúbico de concreto, lo cual produce mezclas con exceso o poca cantidad de aditivo las cuales presentan una baja resistencia en el concreto.

Conociendo esto se determino que la solución debía permitir la introducción de los parámetros deseados, dando como resultado precisión en la dosificación de aditivo. Todo esto en un sistema robusto, capaz de trabajar en las duras condiciones de un túnel.

4.2 Obtención y análisis de información

La información necesaria para conocer el problema y determinar la solución se obtuvo de fuentes como el personal del taller eléctrico de mantenimiento, del personal del departamento de control de calidad y del manual del fabricante para la proyectora de concreto Aliva III. Además se hizo uso de la herramienta internet para investigar datos técnicos de los distintos componentes presentes en la máquina proyectora de concreto y datos técnicos de los nuevos componentes requeridos en la implementación de la solución.

Para el análisis de esta información se procedió a la lectura de los documentos a fin de extraer los datos más relevantes de cada documento. Además se tomo en cuenta mucho el criterio de los expertos y sus sugerencias técnicas respecto a su conocimiento previo en el funcionamiento de la Aliva III y el uso de varios de los elementos utilizados en la solución como PLC y otros. Buscando siempre obtener la solución más eficiente y de más bajo costo.

La búsqueda de información se dirigió hacia el funcionamiento de los distintos componentes del sistema dosificador de la Aliva III. Además de información acerca del proceso de concreto lanzado y preparación de diseños de concreto. La búsqueda se vio influenciada por el hecho de que la mayoría de los componentes ya habían sido adquiridos por la empresa por lo que era importante conocer sus características y modo de operación, para aplicar estos componentes a la solución.

Es decir la búsqueda de información se dirigió hacia los componentes ya existentes con el fin de reducir los gastos de la implementación de la solución. Sin dejar de lado el hecho de que los componentes debían poseer la capacidad necesaria para la implementación de la solución.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Para la solución de este problema se determino que lo que se requería era un sistema de control. Luego se requería determinar con qué tipo de dispositivo se iba a implementar dicho control. Las dos alternativas más fuertes fueron un micro controlador o un PLC. En base a la investigación de las características de ambos sistemas en las hojas técnicas de los fabricantes. Se determino que el PLC era mejor opción debido a que está diseñado para soportar las condiciones adversas que se presenta en el interior de un túnel en proceso de perforación. Condiciones para las que no está preparado el micro controlador dando como resultado su posible daño y mal funcionamiento.

Para validar la solución con el PLC se partió de las características y habilidades del PLC. Lo que este es capaz y no es capaz de hacer. De manera que se determino usar un PLC con características matemáticas y de conjunto de entradas salidas, que permitieran implementar el controlador requerido.

Además la utilización del PLC ofrecía ventajas en cuanto a rapidez de implementación por ser autosuficiente, es decir no requiere elementos externos para funcionar. Otro factor determinante es el hecho de que en la empresa se encontrara uno de estos dispositivos y su software de programación a disposición. Este conjunto de factores inclinaron la balanza a la elección de este dispositivo para la implementación de la solución.

4.4 Implementación de la solución

La primera parte del proceso para la implementación de la solución fue la elección de los componentes a usar, para el caso de los que no se tenían aun en la empresa. En la segunda parte se dio un proceso de familiarización con los componentes a utilizar. Como es el caso del proceso de aprendizaje del lenguaje de programación para el PLC utilizado, su forma de conexión y operación. Además de la familiarización con las hojas técnicas de los demás dispositivo como por ejemplo el variador de frecuencia y la bomba peristáltica. Para conocer sus características y formas de conexión.

En una tercera parte se llevo a cabo un conjunto de mediciones sobre la bomba peristáltica con el objetivo de caracterizar su comportamiento, y poder describirlo matemáticamente. Estos datos fueron analizados mediante herramientas de software. Una vez que se tuvo este comportamiento se procedió a la implementación de un programa en el PLC que ejecutara estas ecuaciones para controlar la bomba dosificadora.

Como cuarta parte se necesito cablear en un nuevo panel⁶, el nuevo circuito de control para ser instalado en la Aliva III. Dentro de este panel se encuentra el PLC junto con los demás dispositivos necesarios para el control de la bomba dosificadora.

Para llegar a la solución final se requirió de una serie de modificaciones en el camino debido a que sobre la marcha aparecen un conjunto de situaciones que quizá no se consideraron al principio. Situaciones de tipo técnica, administrativas o de presupuesto que afectaron el proceso de diseño e implementación del sistema controlador.

⁶ Gabinete de plástico con grado de protección IP 65.

Para evaluar la propuesta de la solución se partió de las mediciones realizadas a la bomba dosificadora para caracterizarla. De ahí se observó un comportamiento lineal por parte del sistema. Y realizando pruebas con el PLC y una serie de programas de prueba se observó que con la solución propuesta para el sistema es factible.

Para evaluar la validez de la solución implementada se utilizó un simple mecanismo, el margen de error. Este margen de error en la cantidad dosificada no podía superar el 2% esto según los requerimientos del laboratorio de control de calidad del proyecto hidroeléctrico. Como parte del proceso de implementación de nuevos sistemas dentro del proyecto hidroeléctrico, esta la certificación por parte del departamento de control de calidad. Este es un documento; donde tras realizar pruebas al equipo, certifica que el equipo se comporta de la manera deseada. Estas pruebas son realizadas por personal del departamento de control de calidad. Este documento se adjunta en los anexos.

La tabla 4.1 muestra un ejemplo de las mediciones realizadas al sistema ya implementado. Para un diseño de concreto de 500 kg al 3%.

Tabla 4.1 Medición para diseño de concreto 500 kg al 3%

m3/hora	litros/min teóricos	litros/min medidos	% Error
1.66	0.41	0.38	7.31707317
2.46	0.61	0.6	1.63934426
3.11	0.77	0.77	0
3.8	0.95	0.96	1.05263158
6.45	1.61	1.62	0.62111801
9.02	2.25	2.25	0
10.81	2.7	2.7	0
13.62	3.4	3.41	0.29411765
15.37	3.84	3.82	0.52083333
19.97	4.99	4.98	0.2004008

Los datos de esta tabla 4.1 se obtuvieron de las mediciones realizadas al sistema dosificador en el taller. El método de medición consistía simular la señal de metros cúbicos de concreto por hora, y anotar en la tabla el valor teórico de litros por minuto a dosificar calculado por el sistema. Además el valor medido de litros por minuto se anoto en la tabla. La variable litros por minutos es determinante en el proceso de dosificación como se describirá más adelante en el documento. El porcentaje de error se calcula como:

$$\%Error = \frac{Valorteorico - Valorexperimental}{Valorteorico} \times 100 \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Observando los datos de la tabla 4.1 el porcentaje de error es mayor a menor velocidad de proyección de concreto. Esto no afecta la operación de la ALIVA III ya que las velocidades menores a 5 m³/hora no son utilizadas en la práctica. Por ende la precisión del sistema está dentro de los valores permitidos de porcentaje de error, para un rango de 5m³/hora hasta 20m³/hora. El cual es un rango suficiente para la aplicación del sistema implementado.

Los litros por minuto se midieron con la ayuda de un cronometro, una balanza y un balde. De forma que el balde se introducía por un periodo de tiempo de un minuto en el flujo de liquido. El líquido acumulado fue pesado para estimar el volumen de una forma más precisa. Las pruebas se realizaron con agua en lugar de aditivo, por ser el agua una sustancia de menor riesgo en su manejo⁷. Sabiendo que la densidad del agua es uno, un litro de agua pesa un kilo. La figura 4.1 es una fotografía de la balanza digital utilizada para las mediciones.

⁷ El aditivo es un producto químico irritante ocular, de la piel y las mucosas nasales.



Figura 4.1 Balanza utilizada para la medición de líquido.

Como parte de la documentación del proyecto se incluye un manual de usuario para poder describir a los operarios la forma correcta de configurar el sistema de dosificación de aditivo. Además se realizaron varias reuniones con los operarios a fin de instruirles en el uso del nuevo sistema.

4.5 Reevaluación y rediseño

Como importante sugerencia para la mejora de solución es la utilización de un PLC con las capacidades mínimas, para implementar la solución. Ya que el PLC utilizado, debido a su disponibilidad en la empresa, está sobre capacitado para la solución y se desperdicia gran parte de su capacidad. Es decir es importante utilizar equipo que satisfaga a cabalidad los requerimientos sin excederse ni quedarse corto en sus capacidades.

Además sería recomendable la utilización de una interconexión de tipo bus de datos entre el PLC y el dispositivo variador de frecuencia que controla al motor trifásico de la bomba. A fin de mejorar la precisión que se obtuvo con la conexión por señal analógica. Esto refiriéndose a la utilización de tecnologías más precisas y que generen menores dificultades de implementación.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

En el siguiente capítulo se describe la solución de una forma detallada. Además se incluye la descripción de los elementos de hardware y software del sistema que son de gran importancia para el entendimiento de la solución. Para esto se hace uso de figuras, diagramas eléctricos, diagramas de flujo y fotografías.

5.1 Análisis de soluciones y selección final

Como requerimiento para la implementación de la solución el sistema debe ser capaz de realizar una serie de operaciones matemáticas, para poder realizar estos cálculos del controlador. Es decir se requería un sistema con capacidad de procesamiento matemático. Además este sistema debería ser capaz de procesar información proveniente de sensores y enviar señales de control a una serie de actuadores.

De acuerdo a estos requisitos se consideraron dos sistemas un micro controlador o un Controlador Lógico Programable (PLC). Analizando un dispositivo contra el otro de una forma general es decir sin entrar en detalles de fabricantes específicos se obtuvo una tabla comparativa, la tabla 5.1.

Tabla 5. 1 Tabla comparativa de ventajas y desventajas de PLC vs Microcontrolador.

	Ventajas	Desventajas
PLC	Resistente a condiciones ambientales adversas	Costo elevado
	Rápida puesta en funcionamiento	
	Protección contra ruido eléctrico	
	Diseñados de acuerdo a normas industriales	
Micro controlador	Bajo costo	Frágil ante condiciones ambientales adversas
	Experiencia previa en su programación	Susceptible al ruido eléctrico
	Su aplicación no es precisamente de tipo industrial	

Considerando un factor de gran peso como son las duras condiciones ambientales dentro del túnel y la gran cantidad de ruido eléctrico en el ambiente debido a la cercanía con maquinaria industrial eléctrica. Se eligió utilizar el dispositivo PLC en la implementación del controlador a pesar de su mayor precio monetario. De esta forma el sistema al ser implementado con PLC es un sistema más robusto y que se adapta de una forma más adecuada a las condiciones de trabajo dentro de un túnel.

Además se tomo en cuenta otro factor de gran peso, la disponibilidad de un PLC en la empresa.

5.2 Principio de funcionamiento

Para solucionar el problema se buscaba que la unidad dosificadora fuera capaz de dispensar cierta cantidad de aditivo por metro cúbico de concreto según las relaciones establecidas en el diseño de concreto. Un diseño de concreto es un conjunto de cálculos que lleva a la estimación de las cantidades de cemento, agua y agregados necesarios para obtener un concreto, con ciertas características específicas.

Los cálculos referentes al diseño de concreto son de competencia del departamento de control de calidad y no se mencionan en este documento. La información requerida es proporcionada por este departamento.

Para lograr la dosificación adecuada se estimo que los datos necesarios serian:

1. El total de metros cúbicos de concreto a proyectar
2. La cantidad de aditivo por metro cúbico de concreto
3. Velocidad de proyección de concreto en m^3 por hora

Los dos primeros datos se obtiene del diseño de concreto y el tercer dato es una señal eléctrica proveniente del sistema de control de la bomba de concreto. Esta es una señal indica los metros cúbicos de concreto que son lanzados por hora. Es una señal de 0 a 10 V que indica de 0 a 20 m^3/h .

De forma que al tener estos tres datos el sistema podrá estimar la velocidad de operación de la bomba dosificador. Los cálculos realizados con estos tres datos son los siguientes:

Para el cálculo del total de aditivo necesario por tanda de concreto:

$$total_{aditivo} = m^3_{totales} \times litros_{m^3} \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

Donde el total de aditivo es igual a los metros totales de concreto multiplicado por los litros de aditivo acelerante de secado que se le debe agregar a cada metro cúbico de concreto.

Además se requiere estimar la velocidad de bombeo de aditivo para lograr distribuir el total de aditivo en los metros cúbicos de concreto a lanzar. Esto se logra tomando en cuenta la velocidad de proyección de concreto:

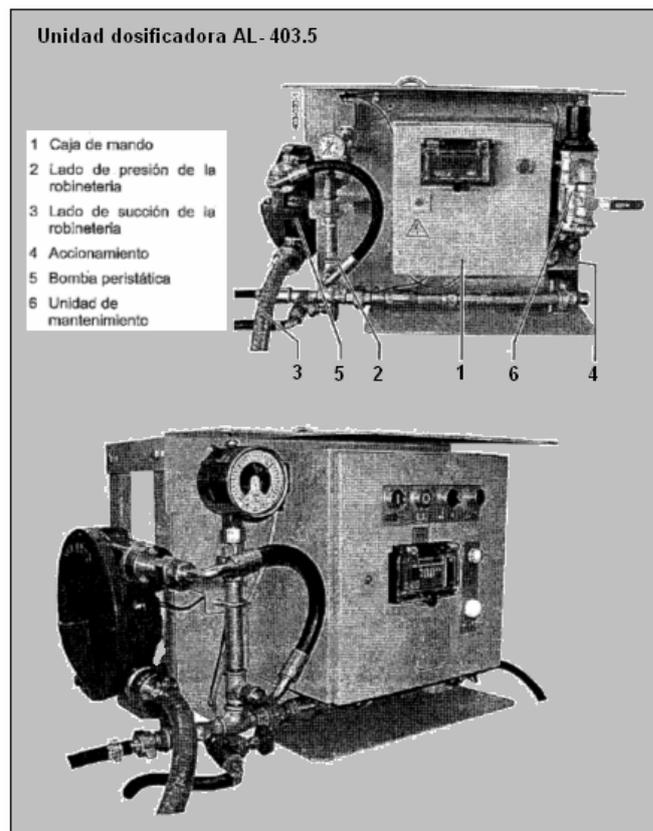
$$litros_{aditivo} / \text{min} = velocidad_{m^3} \times litros_{m^3} \times factortiempo \quad (\text{Ecuación 5.2})$$

$$\frac{litros_{aditivo}}{\text{min}} = \frac{m^3}{hora} \times \frac{litros_{aditivo}}{m^3} \times \frac{1hora}{60 \text{ min}}$$

Estas ecuaciones son implementadas mediante el programa cargado en el PLC pero es importante describirlas en este apartado para la comprensión del diseño de hardware que se describe a continuación.

5.3 Unidad dosificadora

De todos los elementos que componen a la máquina proyectora de concreto Aliva III, sobre el componente que se trabajo específicamente es la unidad dosificadora de aditivo, a continuación se muestra una imagen ilustrativa de dicha unidad.



Editado con Paint

Figura 5.1 Sistema dosificador⁸

La unidad dosificadora está compuesta por:

- a) La bomba dosificadora la cual es una bomba de tipo peristáltica.
- b) El motor trifásico que mueve la bomba (incluida la caja reductora que interconecta la bomba con el motor trifásico).
- c) Gabinete contenedor de circuitos de control.

⁸ Imagen tomada y modificada de manual del fabricante SIKA.

5.4 Caracterización de la bomba peristáltica dosificadora de aditivo.

Para la caracterización de la bomba de aditivo se busca determinar la relación entre su velocidad de giro y su salida en litros por minuto. Se considero la bomba, el motor y el variador de frecuencia como un solo conjunto. Y se realizaron una serie de mediciones para obtener la relación frecuencia del variador contra litros por minuto a la salida de la bomba peristáltica. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

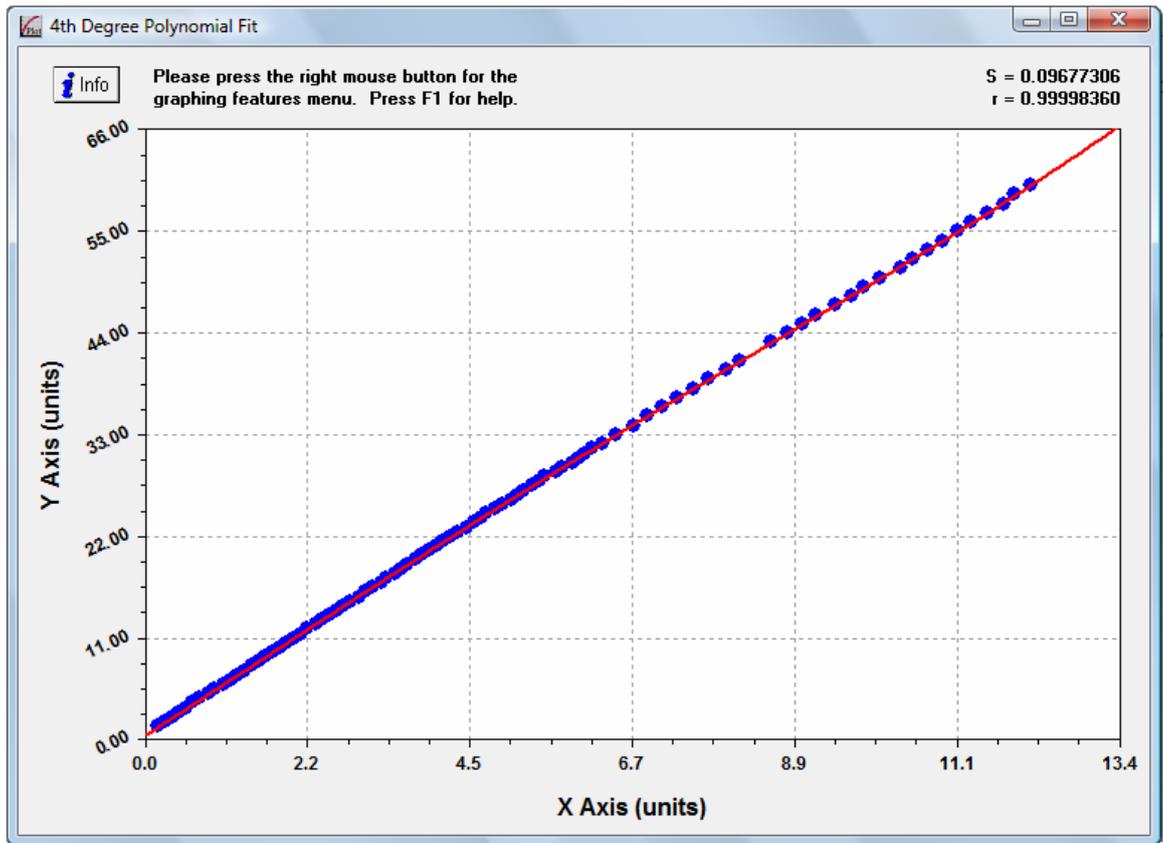
Tabla 5.2 Datos para la caracterización de la bomba peristáltica.

	Litros/min	Frecuencia		Litros/min	Frecuencia		Litros/min	Frecuencia
1	0	0	20	1.94	10.5	39	3.79	20
2	0.18	1.5	21	2.04	11	40	3.90	20.5
3	0.28	2	22	2.14	11.5	41	4	21
4	0.38	2.5	23	2.22	12	42	4.09	21.5
5	0.46	3	24	2.34	12.5	43	4.19	22
6	0.56	3.5	25	2.42	13	44	4.29	22.5
7	0.65	4	26	2.52	13.5	45	4.40	23
8	0.75	4.5	27	2.63	14	46	4.50	23.5
9	0.86	5	28	2.71	14.5	47	4.61	24
10	0.96	5.5	29	2.82	15	48	4.68	24.5
11	1.08	6	30	2.93	15.5	49	4.79	25
12	1.17	6.5	31	3.02	16	50	4.90	25.5
13	1.26	7	32	3.12	16.5	51	5.03	26
14	1.37	7.5	33	3.24	17	52	5.10	26.5
15	1.46	8	34	3.31	17.5	53	5.19	27
16	1.57	8.5	35	3.42	18	54	5.31	27.5
17	1.65	9	36	3.50	18.5	55	5.40	28
18	1.74	9.5	37	3.58	19	56	5.48	28.5
19	1.86	10	38	3.71	19.5	57	5.63	29

Tabla 5.3 Continuación tabla 5.2

	Litros/min	Frecuencia		Litros/min	Frecuencia
58	5.72	29.5	75	9.01	45
59	5.85	30	76	9.20	46
60	5.95	30.5	77	9.46	47
61	6.03	31	78	9.68	48
62	6.12	31.5	79	9.84	49
63	6.26	32	80	10.08	50
64	6.46	33	81	10.35	51
65	6.70	34	82	10.53	52
66	6.88	35	83	10.73	53
67	7.09	36	84	10.93	54
68	7.29	37	85	11.13	55
69	7.52	38	86	11.32	56
70	7.72	39	87	11.54	57
71	7.96	40	88	11.76	58
72	8.15	41	89	11.92	59
73	8.57	43	90	12.14	60
74	8.80	44	91		

Partiendo de estos datos se obtuvo la curva que describe el comportamiento de la bomba dosificadora de aditivo. Utilizando la herramienta de software CurveExpert para el análisis de la curva se obtuvo la ecuación que describe el comportamiento del sistema.



CurveExpert

Figura 5.2 Curva de mejor ajuste para la bomba dosificadora por CurveExpert

Este software realiza un análisis de los datos a través de varios ajustes y muestra una lista de posibles curvas a utilizar, indicando cual aproximación tiene el menor porcentaje de error. En la figura 5.2 se muestra la curva de mejor ajuste donde los puntos azules representan los datos medidos presentes en la tabla 5.1 y tabla 5.2. La línea roja es la curva de mejor ajuste. La ecuación que describe esta curva de mejor ajuste es la siguiente:

$$Frecuencia = 0.50416886 + (5.1011143 \times lm) + (0.05052238 \times lm^2) + (-0.013843942 \times lm^3) + (0.0006860805 \times lm^4) \quad (\text{Ecuación 5.3})$$

Esta ecuación es una aproximación polinomial de grado cuatro con un error estándar de 0.0967, donde ***lm*** representa el valor de litros por minuto que el sistema debe dispensar.

Partiendo de los datos que ingresa el operario, el sistema calcula el valor de litros por minuto necesarios y estos se aplican a la ecuación 5.3 para así obtener el valor de frecuencia necesario para obtener a la salida de la bomba dosificadora, la cantidad de litros por minuto deseados.

Esta ecuación es implementada y ejecutada mediante el programa implementado y cargado en el PLC.

Como se observa en el punto 3.4 del marco teórico, el ajuste polinomial es un proceso largo y su extensión dependerá del número de puntos que conforman los datos. En el caso de la caracterización de la bomba de aditivo en la tabla 5.1 y 5.2 hay un total de 90 mediciones, el equivalente a 90 pares ordenados. Realizar el ajuste polinomial de los datos de forma manual resultaría extenso, por lo que se hizo uso de la herramienta CurveExpert⁹ anteriormente mencionada.

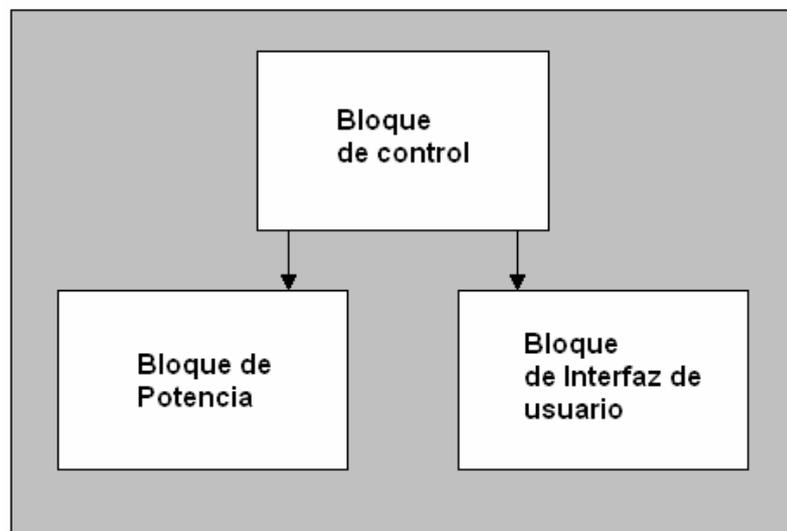
⁹ Se utilizó una copia de evaluación de este software.

5.5 Descripción del hardware

La unidad dosificadora se mantuvo intacta y se trabajó solo sobre el panel de control, dentro del cual se implanto el circuito del sistema de control diseñado como solución propuesta. El hardware del sistema se describirá partiendo de un solo módulo (la unidad dosificadora) dividido en tres bloques principales. Estos tres bloques son:

1. Bloque de control
2. Bloque de potencia
3. Bloque de interfaz de usuario

En el diagrama de la figura 5.3 se muestran los bloques del sistema dosificador de aditivo.

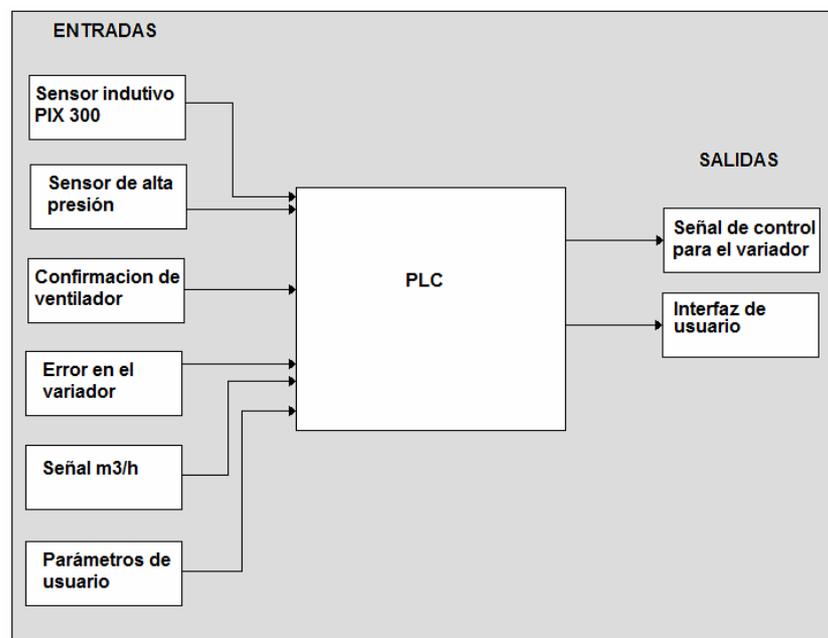


Paint

Figura 5.3 Diagrama de bloques del sistema

5.5.1 Bloque de control

El bloque de control está compuesto principalmente del PLC además incluye los sensores, y señales de salida para los actuadores. El PLC en sus entradas recibe un conjunto de señales provenientes de los sensores. Y en sus salidas genera las señales para el control de los actuadores y la interfaz de comunicación entre el PLC y el usuario.



Paint

Figura 5.4 Esquema del bloque de control.

Ahora se describirá cada una de las partes del bloque de control por separado.

5.5.1.1 Controlador lógico programable PLC

El PLC utilizado es el S7-300 del fabricante Siemens. El modelo es el CPU-313C, este es un PLC con capacidad para cálculos de punto flotante.



Editada con Paint

Figura 5.5 PLC Siemens S7-300, CPU 313C

En la tabla 5.4 se muestran las características de este PLC en comparación con otros modelos del S7-300.

Tabla 5.4 Características para PLC Siemens S7-300¹⁰

Elemento	CPU 312C	CPU 313C	CPU 313C-2 DP	CPU 313C-2 PtP	CPU 314C-2 DP	CPU 314C-2 PtP
9 polos Interfaz DP (X2)	-	-	X	-	X	-
15 polos Interfaz PtP (X2)	-	-	-	X	-	X
Entradas digitales integradas	10	24	16	16	24	24
Salidas digitales	6	16	16	16	16	16
Entradas analógicas	-	4 + 1	-	-	4 + 1	4 + 1
Salidas analógicas	-	2	-	-	2	2
Funciones tecnológicas	2 contadores	3 contadores	3 contadores	3 contadores	4 contadores 1 canal Posicionamiento	4 contadores 1 canal Posicionamiento

Además de la gran versatilidad de este PLC y el gran número de instrucciones que es capaz de realizar, ofrece una serie más de ventajas como el amplio número de entradas y salidas, tanto digitales como análogas. Lo cual es una característica necesaria para poder implementar el proyecto. El software de programación utilizado para configurar este PLC fue el Step 7 Lite.

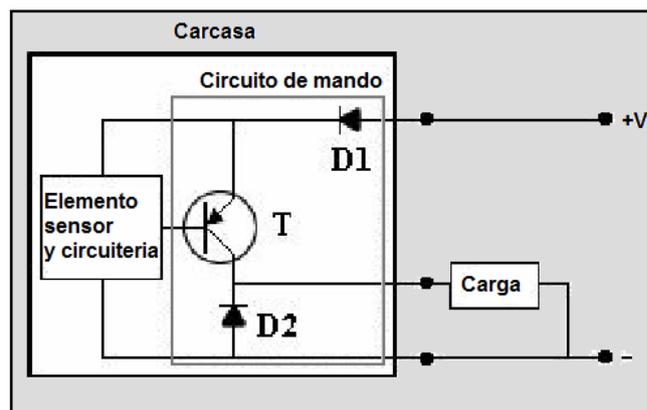
¹⁰ Tabla tomada de la hoja de datos del fabricante. Siemens.

5.5.1.2 Entradas del bloque de control

Las entradas del bloque de control están compuestas por una serie de señales que proviene del exterior e interior del panel de control y que son necesarias para el funcionamiento adecuado del sistema. Estas señales son:

- a) Señal del sensor inductivo
- b) Sensor de alta presión
- c) Confirmación de ventilador
- d) Error del variador
- e) Señal de tensión para m³/hora
- f) Parámetros de configuración de usuario

La señal que proviene del sensor inductivo de la marca Siemens llamado PIX 300, se utiliza para poder medir el número de revoluciones que da la bomba peristáltica en determinado tiempo y así poder determinar la cantidad de aditivo que ha sido dosificado.



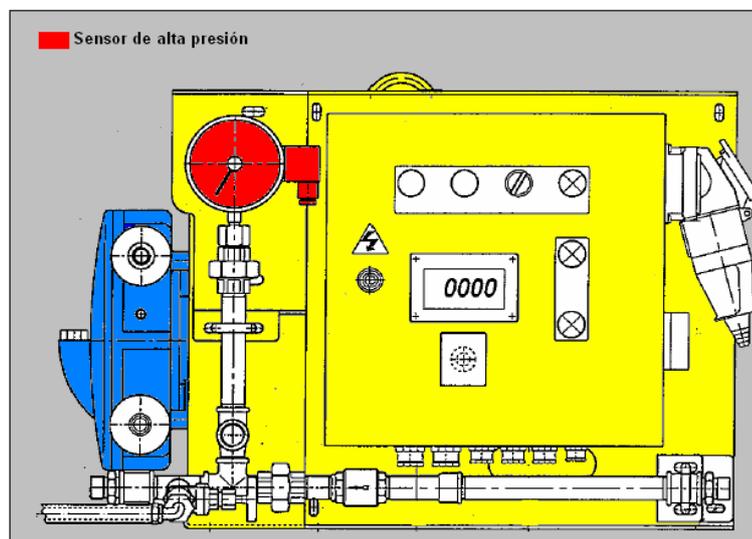
Editado con Paint

Figura 5.6 Esquema de sensor inductivo.

En la figura 5.6 se muestra un esquema de la composición general de los sensores inductivos. El PIX 300 fue conectado de acuerdo a este esquema a una de las entradas digitales del PLC.

Las señales del sensor de alta presión, confirmación de ventilador y error del variador son tres señales que se procesan en conjunto, para determinar la existencia de un posible error en el sistema de dosificación. Esto para determinar errores que harían imposible la dosificación o que comprometen la integridad física del sistema de dosificación en sí.

El sensor de alta presión es un sensor conectado a la salida de la bomba y cuya forma física se aprecia en la figura 5.7 boceto del sistema dosificador. Este sensor pasa de estado alto a bajo la señal que entra a la entrada digital correspondiente en PLC cuando se presenta una presión mayor a 10 bar a la salida de la bomba. Ya que este es el límite de presión que puede soportar físicamente la bomba peristáltica.



Editado con Paint

Figura 5.7 Sensor de alta presión¹¹.

¹¹ Imagen editada de la hoja de datos del fabricante SIKA

La señal de confirmación de ventilador proviene un relé conectado a una de las entradas del digitales PLC. Este relé a la vez es el encargado de encender el ventilador que enfría el motor trifásico. Así mientras el ventilador este encendido existirá una señal de confirmación de ventilador encendido. Esto puesto que el motor que mueve la bomba peristáltica es un motor controlado por variador. Los motores controlados por variador requieren de un motor independiente que mueva un ventilador para enfriarlos. Si este ventilador no enciente el motor se podría dañar por sobre calentamiento.

La señal de error del variador es una señal que proviene del variador de frecuencia que controla al motor trifásico de la bomba. Mientras no exista error en el variador esta señal permanecerá activa. Si se da un error la señal deja de llegar a la entrada digital del PLC y por ende el error se registrara y el programa tomara las acciones del caso.

La señal m³/h, es una señal que indica los metros cúbicos por hora a los que la proyectora de concreto está lanzando el concreto. Esta señal es el pilar de la sincronización entre el concreto lanzado y la cantidad de aditivo en litros por minuto que se debe dosificar para obtener la relación deseada de concreto-aditivo. Esta señal proviene del panel principal de control de la máquina ALIVA III. Es una señal de voltaje de 0 a 10 V, proporcional a una velocidad de proyección de 0 a 20m³/hora respectivamente.

Los parámetros configuración de usuario son los datos de total de concreto y litros de aditivo por metro de concreto. Estos datos son ingresados mediante la interfaz de usuario.

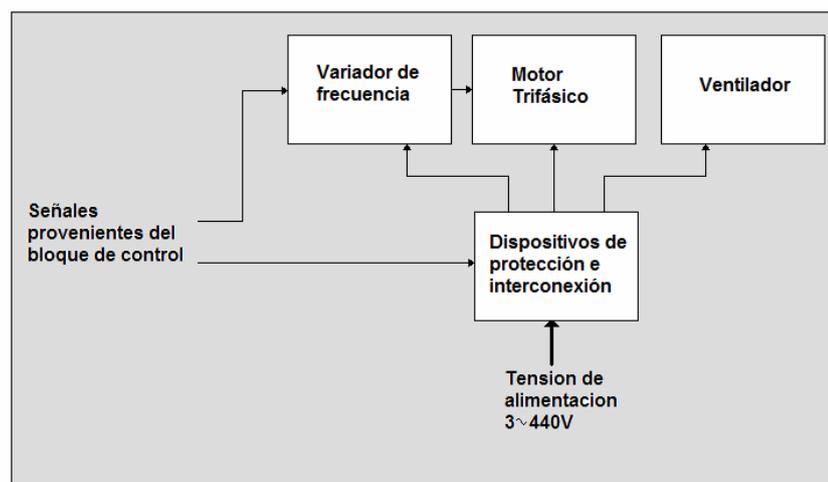
5.5.1.3 Salidas del bloque de control

La señal de control para el variador es una señal que sale del PLC, esta es una tensión analógica de control que va de 0 a 10V, que llega a la entrada analógica del variador y permite indicar la velocidad a la que se desea que el variador de frecuencia haga girar el motor, en un rango de 0 a 60 Hz respectivamente.

La señal de interfaz de usuario permite que el usuario visualice datos que son relevantes durante el ingreso de los parámetros de usuario. Esta es una señal analógica de 0 a 20 mA que es conectada al display de 7 segmentos, donde se muestran los datos.

5.5.2 Bloque de potencia

El bloque de potencia está compuesto por el variador de frecuencia, el motor trifásico, el ventilador y los demás dispositivos de protección e interconexión de la línea de alimentación de el sistema dosificador.



Paint

Figura 5.8 Esquema del bloque de potencia.

El variador de frecuencia utilizado es del fabricante SIEMENS, modelo Micromaster 440. Este es un variador de frecuencia que opera a 440VAC, posee cuatro entradas digitales programables para su control. Además posee dos entradas analógicas. De las cuales una entrada analógica es usada para ajustar la frecuencia de salida del variador hacia motor. El variador se encarga de suministrar la alimentación al motor trifásico para que este funcione a velocidades determinadas por las señales de control provenientes del PLC hacia el variador. En la figura 5.9 se muestra una fotografía del variador utilizado.



Figura 5.9 Variador de frecuencia Siemens Micromaster 440.

El motor trifásico está conectado a la bomba peristáltica a través de una caja reductora, este es un motor de 3440 revoluciones por minuto a 440 VAC, este se puede observar en la figura 5.9.

El ventilador es un pequeño motor monofásico de 3000 rpm a 230VAC cuya función es enfriar al motor trifásico. Ya que los motores que son controlados por variador en ocasiones operan a velocidades muy lentas, por lo que conectar un ventilador en su rotor no permitiría que este se enfriara adecuadamente.



Figura 5.10 Motor trifásico.

Los dispositivos de protección e interconexión son todos aquellos elementos que permiten que la tensión de alimentación llegue a los elementos del sistema dosificador. Son todos los interruptores, protecciones, relés, bornes y transformadores presentes en el circuito.

5.5.3 Bloque de interfaz de usuario

Para la interfaz entre el usuario y el sistema, se implemento un método de comunicación provisional. Esto debido a que hubo un retraso en la entrega de los componentes de interfaz de usuario. Originalmente se esperaba la llegada de una pantalla OP77B del fabricante SIEMENS pero ante el retraso se implemento un método alternativo que se describe a continuación.

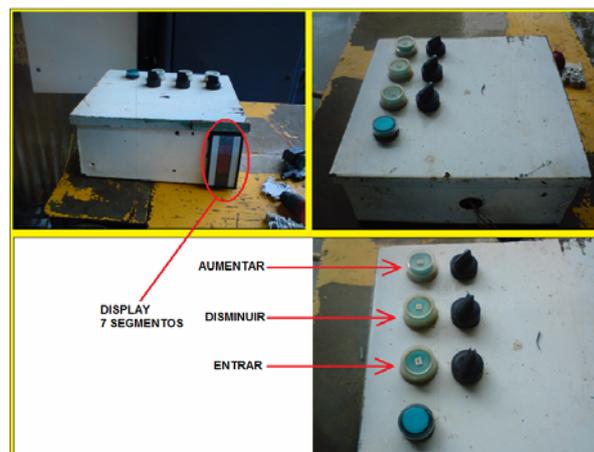


Figura 5.11 Control provisional para el usuario.

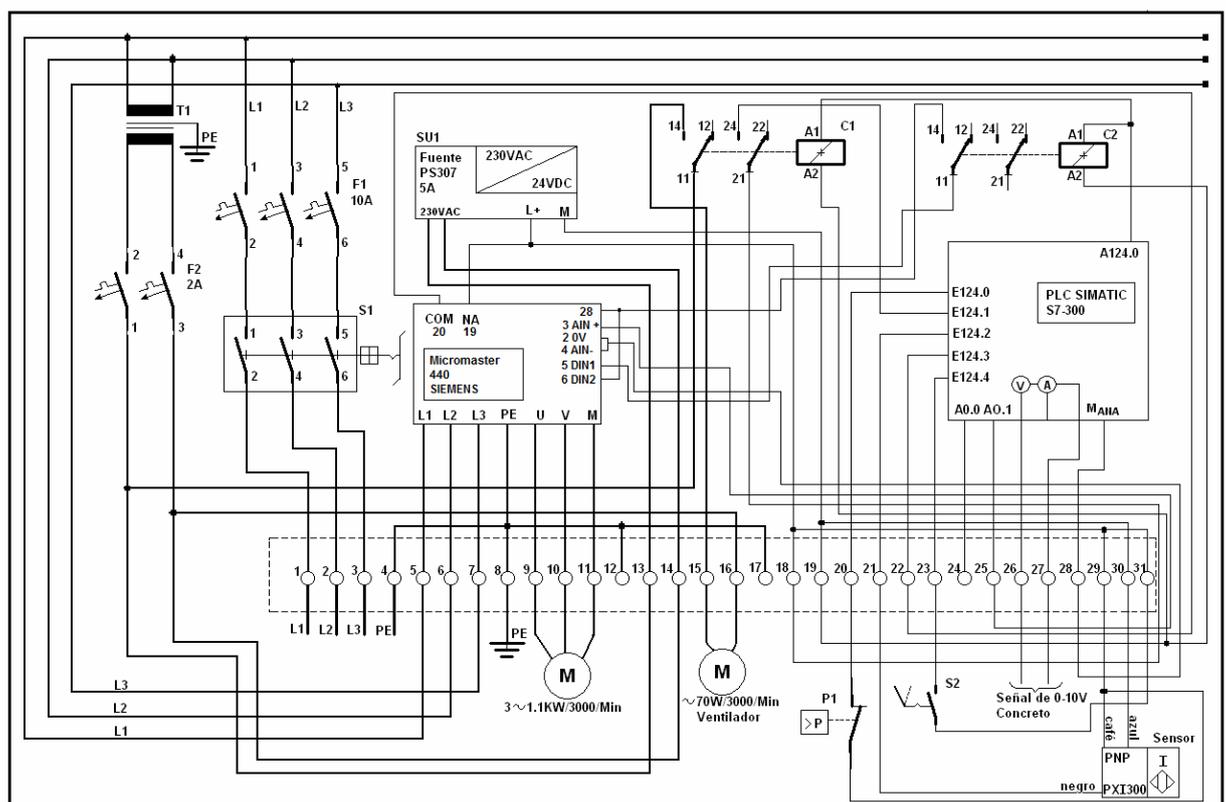
En la figura 5.11 se aprecian varios botones e interruptores. De estos solo se utilizan los tres indicados por las flechas. Los demás se utilizaron para pruebas durante el desarrollo del sistema de dosificación completo. Con estos tres botones el usuario puede conmutar de una función de configuración a otra. Además puede ingresar los valores de m^3 totales de concreto y aditivo por metro cubico a dispensar. Para una descripción detallada de su uso se incluye en el apartado de descripción de software. En el display de 7 segmentos se muestran distintos datos dependiendo de la función donde se encuentre el usuario.

La implementación posterior de la pantalla OP77B no requiere mayores cambios en el hardware del sistema ya que esta se conecta directamente al puerto serial del PLC. Ni en software pues la interacción entre este tipo de monitores y los PLC consisten en la

posibilidad de compartir registros de datos. De modo que la pantalla lee y escribe en los registros del PLC solamente.

5.5.4 Conexión eléctrica

A continuación se hace una descripción de la conexión eléctrica del sistema completo. El nuevo diagrama eléctrico fue implementado en un nuevo panel de control, dentro de un gabinete con un IP 66 para asegurar la protección de los dispositivos eléctricos y electrónicos durante la operación en el túnel.



Paint

Figura 5.12 Diagrama eléctrico del sistema de control.

En la figura 5.12 se observa el diagrama eléctrico de conexión del circuito de control. La línea de alimentación principal es una línea trifásica de 440VAC que ingresa al panel de control y se conecta a un interruptor trifásico llamado S1. De ahí la alimentación pasa por un disyuntor termo magnético llamado F1. Esta es la primer línea de protección del sistema contra sobre tensiones o cortos. De este punto en adelante las líneas trifásicas alimentan al variador de frecuencia. De las líneas L1 y L2 se conecta el transformador T1, que pasa de 440VAC a 230VAC para alimentar el motor del ventilador y la fuente SU1.

La fuente SU1 es una fuente que se alimenta con 230VAC y a su salida suministra 24V, la cual es la tensión de alimentación del PLC, bobinas de relés y sensores. El ventilador es un movido por un motor monofásico de 230VAC cuya tensión de alimentación y por ende su encendido, es controlada mediante el relé C1.

Por las salidas U, V y W del variador se suministra la tensión de alimentación al motor de la bomba dosificadora. La frecuencia de salida del variador y por ende la velocidad de giro del motor y la bomba, se controla en función de la señal que va de la salida analógica AO.1 del PLC a la entrada analógica del variador llamada AIN1.

Las salidas digitales del PLC son utilizadas para controlar el accionamiento de los relés y enviar las señales de control al variador de frecuencia. La entrada digital 2 del variador (DIN2) está configurada como habilitación general y se conecta a OV digital del variador. La entrada digital 1 (DIN1) del variador está configurada como Giro/Para y es la que habilita el encendido del variador. Estas señales están configuradas como activas en bajo.

Las entradas digitales del PLC registran las señales provenientes de los sensores de alta presión, sensor inductivo, confirmación de ventilador y error en el variador. Además de la señal de entrada proveniente del selector S2.

El sensor de alta presión se conecta al PLC a través de la entrada digital E124.0 y este se mantiene en alto mientras la presión en la tubería de salida de la bomba peristáltica sea menor a 10 bar. El sensor inductivo PIX300 se conecta al PLC a través de la entrada digital E124.2 este sensor envía un pulso positivo cada vez que el rotor de la bomba peristáltica realiza una revolución completa.

La entrada E124.1 está conectada al relé C1, que es el relé que se encarga de encender el ventilador, así si el ventilador se enciende correctamente llegara una señal en alto de confirmación de encendido. Esto debido a que el motor de la bomba es un motor controlado por variador, y este tipo de motores requieren un sistema de enfriamiento independiente. Ya que un ventilador conectado al eje del motor para enfriarlo giraría muy despacio a bajas revoluciones del motor, y esto conduciría a un calentamiento y posible daño del motor.

Para registrar un posible error en el variador de frecuencia este está provisto de un relé de salida configurable. Este relé se configura para activarse en caso de error, de esta forma se conecta la salida del relé a la entrada E124.3 del PLC. En caso de un error esta señal pasa de bajo a alto, enviando el reporte al PLC.

El selector S2 cumple la función de habilitar la dosificación o detenerla. Es un interruptor de dos posiciones. La dosificación no inicia hasta que este selector este en la posición “Dosificar”. Está conectado a la entrada E124.4 del PLC.

La salida analógica 0 (AO.0) del PLC se utiliza para enviar una señal de 4 a 20mA para el display de 7 segmentos. Esta señal no figura en el diagrama puesto que el uso del display no es una implementación permanente, si no es provisional. La implementación final del Panel de Operador OP77B no afecta el diagrama eléctrico establecido, ya que este se conecta directamente al puerto serial del PLC.

La salida analógica 1(AO.1) del PLC esta configura para enviar una señal de 0 a 10 V a la entrada analógica 1 del variador. Esta es la señal que realiza el ajuste de la velocidad de giro del motor de la bomba peristáltica.

A través de la entrada analógica cero (AI.0) el PLC recibe una señal de 0 a 10V. Esta señal proviene del panel de control de la bomba de concreto. Esta es una señal que está presente en la máquina dosificadora Aliva III de fábrica. Y es equivalente a la cantidad de metros cúbicos de concreto que se están lanzando por hora. Así 0V para 0 m³/hora hasta 10 V para 20 m³/hora.

La salida digital A124.0 controla la activación de los relés C1 y C2, para el encendido del ventilador, confirmación de ventilador encendido y la habilitación del variador de frecuencia.

En la siguiente figura se muestran fotografías del circuito de control durante el proceso de alambrado e implementación.



Editado con Paint

Figura 5.13 Fotografías del circuito implementado

5.6 Descripción del software

En la implementación de este sistema de control, el software forma una parte importante ya que es el eje del sistema. La posibilidad de utilizar un controlador lógico programable (PLC) permite la reducción de una gran parte del hardware utilizado, ya que muchas de las funciones que anteriormente se implementaban con contactores y dispositivos afines, pueden ser integradas dentro del programa a ejecutar. Reduciendo de esta forma la cantidad de elementos necesarios para implementar el sistema de control. A continuación se describen datos y características importantes del software implementado.

5.6.1 Software y lenguaje de programación del PLC Siemens S7-300

El sistema se implementó en PLC Siemens S7-300, el software del fabricante para su programación es el Step7. Este es un software que permite una programación de alto nivel. Dentro de las posibilidades del software está la de realizar la programación en:

- Lenguaje de esquema de contactos KOP
- Lista de instrucciones AWL
- Programación de diagrama de funciones FUP

El programa fue elaborado en lenguaje de esquema de contactos KOP.

5.6.2 Estructura de programación del PLC

El PLC como parte de su estructura de funcionamiento cuenta con estructuras llamadas bloques, estos bloques pueden ser de diferentes tipos:

- a) Bloques funcionales
- b) Bloques organizacionales
- c) Bloques de conversión
- d) Bloques de conversiones de sistema

Los bloques organizacionales se encargan de controlar el proceso interno de funcionamiento del PLC. De estos uno de los más importantes es el bloque organizacional OB 1 este es llamado bloque de organización para la ejecución cíclica del programa. La ejecución cíclica de programas es la ejecución "normal" en los sistemas de automatización. El sistema operativo llama cíclicamente al OB 1 y arranca la ejecución cíclica del programa de usuario. La tabla siguiente muestra las fases de la ejecución cíclica del programa:

Tabla 5. 5 Fases de la ejecución cíclica del programa en un Controlador Lógico Programable.

Paso	Secuencia el CPU
1	El sistema operativo inicia el tiempo de vigilancia del ciclo.
2	La CPU escribe los valores de la imagen de proceso de las salidas en los módulos de salida.
3	La CPU lee el estado de las entradas en los módulos de entradas y actualiza la imagen de proceso de las entradas.
4	La CPU ejecuta el programa de usuario y las operaciones indicadas en dicho programa.
5	Al final del ciclo, el sistema operativo realiza las tareas pendientes, p. ej. cargar y borrar bloques, recibir y enviar datos globales.
6	Finalmente, la CPU regresa al principio del ciclo y arranca nuevamente la vigilancia del tiempo de ciclo.

Para garantizar que la CPU disponga de una imagen real de las señales del entrada y salida durante la ejecución cíclica del programa, al activarse las áreas de operandos relacionadas con las entradas y salidas, la CPU toma los datos directamente de los módulos de señales, sino de una área de memoria interna de la CPU que contiene una imagen de las entradas/salidas.

La ejecución cíclica del programa puede ser interrumpida por:

- una alarma.
- una orden STOP (selector de modo de operación, comando de menú desde la PG, SFC 46 STP, SFB 20 STOP).
- un corte de tensión de red (alimentación).
- el fallo de un aparato o por un error del programa.

El tiempo de ciclo es el tiempo que el sistema operativo necesita para ejecutar el programa cíclico, así como todas las partes del programa que interrumpen dicho ciclo (p. ej. la ejecución de otros bloques de organización) y las actividades del sistema (p. ej. la actualización de las imágenes del proceso). Este tiempo es vigilado por el sistema.

Existen más bloques organizacionales además de OB1 y estos cumplen funciones variadas como respuesta ante alarmas en el programa, selección de modos de arranque del PLC y muchas otras más funciones del tipo de control de flujo de programa.

Con la ejecución cíclica se garantiza que el PLC mantiene un monitoreo constante de las entradas y en función de esto ejecuta el programa de usuario. El programa de usuario se implementa mediante los bloques funcionales que son el equivalente a métodos en JAVA por ejemplo. Estos bloques funcionales son invocados desde el OB1 y en su contenido se encuentran las instrucciones necesarias para ejecutar las funciones programadas por el usuario. Además dentro del bloque OB1 cabe la posibilidad de incluir instrucciones del mismo tipo que las que se incluyen dentro de los bloques funcionales.

5.6.3 Tipos de instrucciones

Los tipos de instrucciones presentes en lenguaje de esquema de contactos KOP, son los siguientes:

1. Operaciones lógicas con bits
2. Comparación
3. Conversión
4. Contaje
5. Llamada DB
6. Salto
7. Coma fija
8. Como flotante
9. Transferencia
10. Control de programa
11. Desplazamiento/rotación
12. Bits de estado
13. Temporización
14. Operaciones lógicas con palabras

De toda esta gama de instrucciones no todas fueron utilizadas para la implementación de la solución. Las más utilizadas fueron:

1. Operaciones lógicas con bits
2. Comparación
3. Conversión
4. Contaje
5. Coma fija
6. Como flotante
7. Transferencia
8. Desplazamiento/rotación
9. Temporización

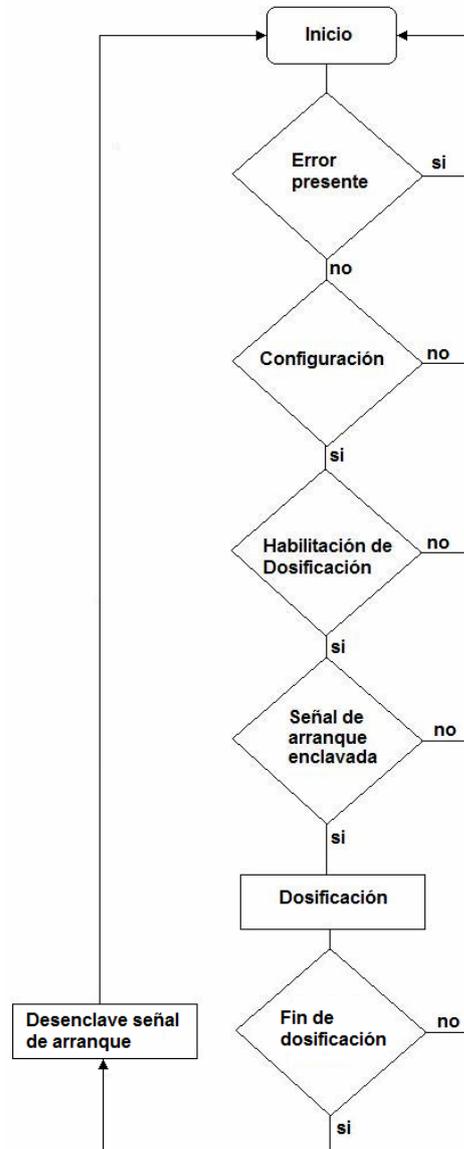
5.6.4 Estructura del programa controlador

La principal función del software implementado es la administración de los recursos del PLC para la implementación del controlador deseado. En su operación normal el PLC ejecuta un muestreo continuo del estado de las entradas, ejecuta el programa de usuario y reinicia el ciclo.

El software implementado se basa en dos tipos de bloques:

- Bloques funcionales de tipo FB y FC
- Bloques organizacionales OB1

El eje central del programa es el bloque organizacional OB1 cuya estructura principal es la siguiente:



Paint

Figura 5.14 Diagrama de flujo bloque OB1.

El código incluido en el bloque organizacional OB1 se encarga de la ejecución cíclica del proceso descrito en la figura 5.14. Este proceso consiste en lo siguiente, en la primera etapa se revisa que la presencia de errores. En caso de error el sistema vuelve al inicio, no prosigue más allá de este punto. Los posibles errores son los mencionados anteriormente y consisten de las señales provenientes: del sensor de alta presión de la bomba peristáltica, señal de confirmación de ventilador y error del variador. Si se presenta alguno de estos errores el sistema no inicia la ejecución del proceso de dosificación. Y si un error se presentase durante la dosificación, el sistema detiene la bomba dosificadora para evitar posibles daños a los sistemas físicos. Estos tres errores son críticos y comprometen la integridad del sistema por lo que no se pueden pasar por alto.

De confirmarse la ausencia de errores el sistema espera a ser configurado. En este punto el operador debe ingresar la cantidad total de concreto a bombear y los litros de aditivo por metro cubico que determina el diseño de concreto.

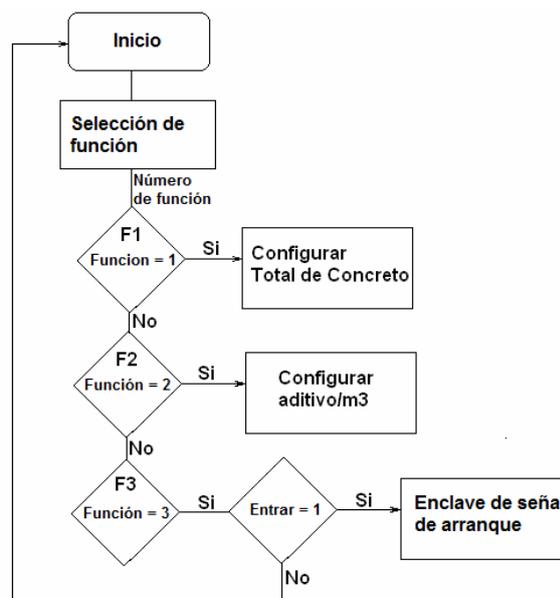
Una vez configurado el sistema se revisa el estado de la señal de dosificación proveniente del selector S2 (ver diagrama eléctrico del sistema de control). Este selector es una confirmación manual por parte del operador para indicar que está listo para iniciar la dosificación. Si esta señal se activa se da paso a esperar las señal de arranque. Si esta señal es desactivada una vez que el proceso de dosificación ya inicio, el proceso de detendrá inmediatamente.

Cumplíéndose las condiciones anteriores para iniciar la dosificación solo resta la activación de la señal de arranque por parte del operador. De esta manera inicia el proceso de dosificación, sin dejar de lado la revisión de todas las condiciones anteriormente mencionadas. También se revisa si la dosificación llego a su fin.

El sistema cuenta con un bloque contador que registra la cantidad de aditivo que se ha suministrado. Al inicio del proceso el sistema calcula la cantidad total de aditivo requerida para la cantidad de concreto definida en el diseño de concreto, de esta forma compara el cálculo con el registro de litros dispensados y determina el momento en que finaliza la dosificación. Si la dosificación ha sido completada libera el enclavamiento de la señal arranque y el sistema vuelve al estado inicial, en espera de iniciar un nuevo proceso de dosificación.

Proceso de configuración

Como se menciona anteriormente ante el retraso en la llegada del componente de hardware interfaz de usuario OP77B de Siemens, el cual es panel de control básico. Se implemento un sistema de configuración provisional cuyo funcionamiento es el siguiente.

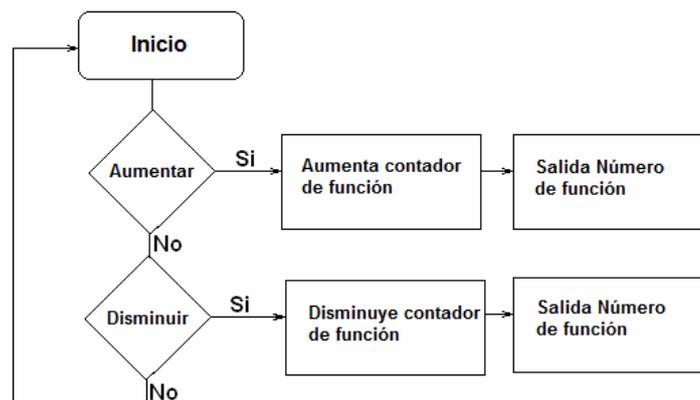


Paint

Figura 5. 15 Diagrama de flujo para configuración de sistema dosificador

Del diagrama de flujo anterior se puede identificar el proceso de selección de función donde el usuario define cual parámetro va a configurar. De esta forma para definir el total de concreto se escoge la función 1. Para poder configurar los litros de aditivo por metro cubico se escoge la función 2. En la función 3 el usuario da término al proceso de configuración dando el aval para el inicio del proceso de dosificación, al oprimir la botón entrar. Siempre recordando que el inicio del proceso de dosificación no solo está sujeto a el enclave de la señal de arranque, sino también dependerá de las otras variables anteriormente mencionadas.

Para la selección de función se realiza el siguiente proceso:



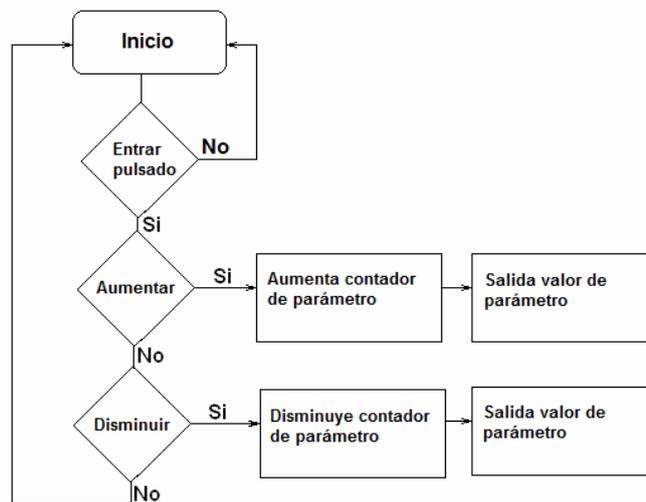
Paint

Figura 5.16 Diagrama de flujo para selección de función de configuración.

Donde el PLC procesa los pulsos que ingresan a sus entradas digitales desde los botones aumenta y disminuye, y de esta forma incrementa o decrementa el contador de función respectivamente. Los contadores son parte de las herramientas presentes en el software del PLC.

Una vez que el usuario se ha posicionado sobre una función específica (función 1 y 2) para tener acceso a la modificación del parámetro que controla cada función respectivamente, deberá mantener pulsado el botón entrar. De esta forma mientras entrar este pulsado los botones aumentar y disminuir no se desplazaran de función a función, sino que aumentaran o disminuirán el valor de parámetro respectivo.

El proceso de ajuste de parámetros se desarrolla según el siguiente esquema:



Paint

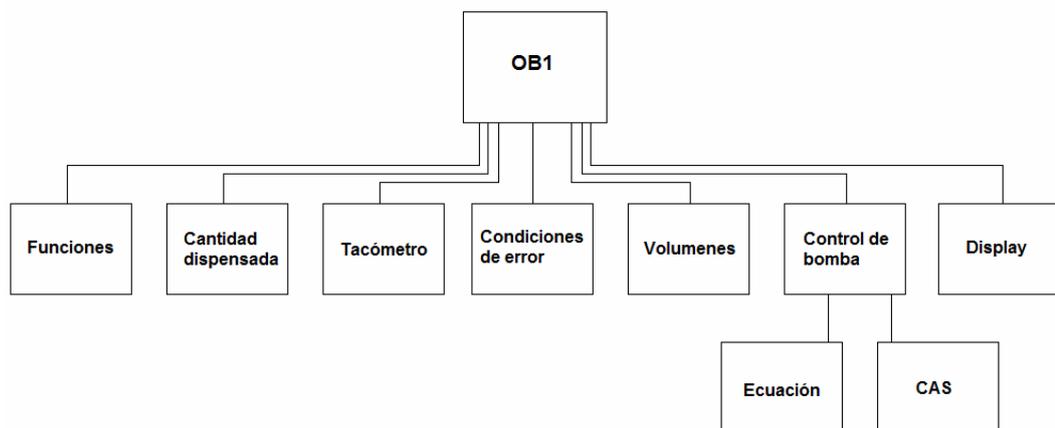
Figura 5.17 Diagrama de flujo para configuración de parámetros.

Los valores del parámetro configurado son mostrados al usuario a través del display de 7 segmentos, a través del bloque funcional Display que será descrito a continuación.

Todo el proceso de configuración es ejecutado desde el bloque organizacional OB1, desde este mismo bloque se instancia todos los demás bloques necesarios para realizar los procesos descritos para la configuración del sistema dosificador.

Proceso de dosificación

Para realizar el proceso de dosificación se implementaron una serie de bloques funcionales de tipo FC y FB según el requerimiento. Cada uno de estos bloques son equivalentes a métodos en otros lenguajes de programación. La diferencia principal entre un bloque funcional tipo FC y FB, es que el bloque FB posee la capacidad de administrar recursos de memoria, para datos y variables temporales. Mientras que el bloque FC se utiliza solo para funciones donde almacenar un resultado final no es necesario. La estructura de instanciación de los bloques implementados se muestra en la figura 5.18.



Paint

Figura 5.18 Estructura de instanciación de bloques funcionales del programa.

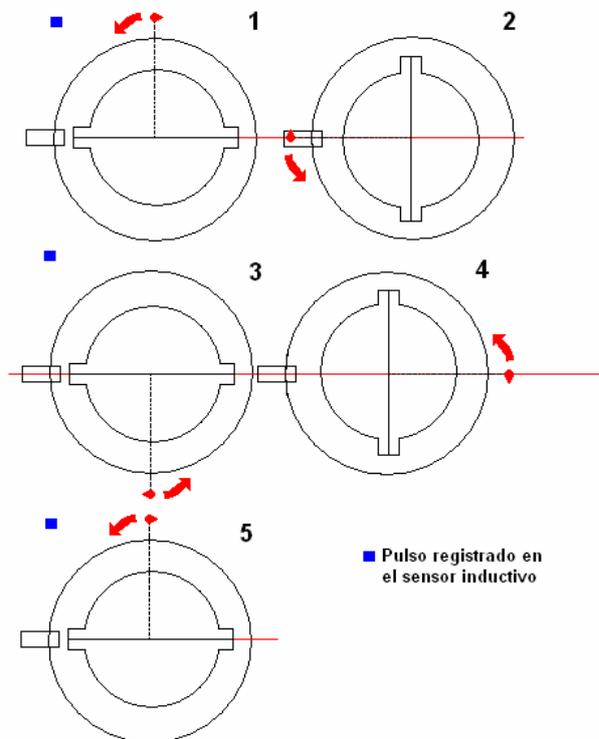
Cada uno de estos bloques es instanciado desde el bloque organizacional OB1, el cual se encarga de ejecutar el ciclo de control de programa. Cada bloque realiza una función específica y el conjunto de estas funciones permite el funcionamiento del sistema de control implementado.

Los bloques implementados a parte del OB1 son los siguientes:

- a) Cantidad dispensada
- b) Tacómetro
- c) Volúmenes
- d) Control de bomba
- e) Condiciones de error
- f) Ecuación
- g) CAS
- h) Display
- i) Funciones

Ahora se describirá cada uno de estos bloques en forma separada.

a) Cantidad dispensada es un bloque donde se registra el total de aditivo que ha salido por la bomba. Esto se realiza mediante un conteo de vueltas de la bomba. Estas vueltas son contadas mediante los pulsos que se reciben del sensor inductivo PIX300 Siemens, luego se sabe a través del uso del bloque de pruebas tacómetro que por revolución la bomba es capaz de lanzar 0.12 litros en promedio. Con una multiplicación se obtiene una aproximación de la cantidad de aditivo dispensada en cada momento.



Paint

Figura 5.19 Diagrama de registro de pulsos para bloque Cantidad dispensada.

Del diagrama de la figura 5.19 se observa que de acuerdo con la construcción de la bomba peristáltica, cada dos pulsos en el sensor corresponde a una sola revolución de la bomba. Ya que las dos deflectores de acero se encuentran en dos puntos opuestos del eje de rotación y pasan por las cercanías del sensor inductivo en dos ocasiones por revolución. En los cálculos del bloque de Cantidad dispensada esto es tomado en consideración.

b) Tacómetro es un bloque implementado para determinar la relación de líquido dispensado por revolución. Utilizando los temporizadores del PLC se crea una ventana de 1 minuto y se registran las revoluciones que se dieron durante ese lapso de tiempo, con el motor operando a una velocidad constante. Se recoge en un contenedor el líquido que sale de la bomba durante ese periodo de un minuto. Ahora con la relación litros por minuto y revoluciones por minuto se el bloque es capaz de determinar la cantidad de liquido que la bomba dispensa por revolución.

c) Volúmenes es un bloque encargado de registrar datos ingresados por el usuario. Datos correspondientes al volumen de concreto en m^3 o aditivo litros por metro cubico. Estos datos posteriormente son utilizados para los cálculos de ajuste del sistema.

d) Control de bomba está encargado de controlar la operación del motor de la bomba de aditivo. Desde este bloque funcional se instancia a los bloques funcionales Ecuación y CAS. Su entrada es el valor de litros por minuto a dispensar, con este dato se activa el bloque Ecuación el cual suministra el valor de frecuencia de operación del motor de la bomba. Esta frecuencia es escalada mediante CAS y puesta en la salida analógica del PLC.

e) Condiciones de error este bloque funcional se encarga de registrar el estado de las señales:

- Sensor de alta presión
- Error en variador de frecuencia
- Confirmación de ventilador

En su salida de tipo booleana informa al resto del sistema la existencia o ausencia de errores que podrían dañar seriamente al equipo de dosificación de aditivo.

f) Ecuación es un bloque encargado del cálculo de la frecuencia de salida que el sistema debe enviar al variador de frecuencia en función de la cantidad de litros por minutos calculados en OB1. Este bloque recibe como entrada los litros por minuto a dosificar y entrega como salida la frecuencia a programar en el variador de frecuencia Micromaster 440. La ecuación que este bloque ejecuta es la ecuación 5.3, para esto se requiere utilizar las herramientas para cálculos de punto flotante del Step 7.

g) CAS es un bloque encargado del escalamiento de la señal de salida. Su función consiste en tomar la salida del bloque Ecuación y escalarla para luego ser enviada al canal de salida analógico del PLC. Este canal analógico se interconecta con la entrada analógica del variador de frecuencia y de esta forma se ajusta el valor de frecuencia al que debe girar el motor de la bomba. La ecuación para el escalamiento se obtiene de la figura 5.20.

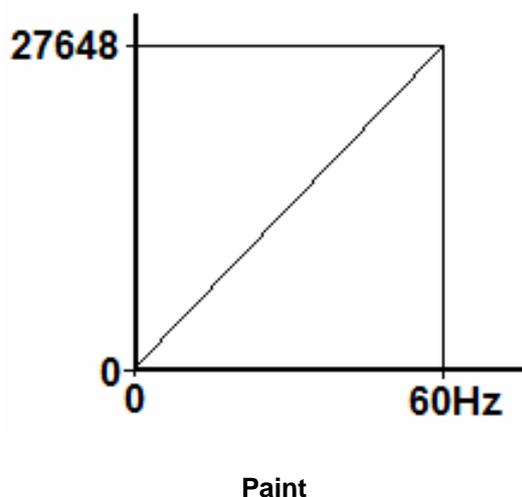


Figura 5.20 Escalamiento de la señal de frecuencia.

Donde se tiene que:

$$\text{escalamiento} = \text{frecuencia} \times 460.8 \quad (\text{Ecuación 5.4})$$

Este valor de escalamiento en el rango de 0 a 27648 es tomado por la salida analógica, y convertido en una tensión de salida de 0 a 10 V respectivamente.

h) Display es el bloque encargado de mostrar los datos en un display de 7 segmentos. Tiene como entrada un valor de tipo real y coloca en un canal analógico de salida del PLC el valor correspondiente escalado para ajustarse a las unidades del display. De esta forma se da una señal de salida analógica de 4 a 20 mA, que es recibida en el display y convertida en un rango de 0 a 100 unidades. Dependiendo de flujo de programa el bloque display muestra distintos datos.

i) Funciones este es un bloque selector de parámetros de configuración. Utiliza contadores delimitados para determinar en cual parámetro se encuentra el usuario. Los posibles estados son:

- Función 1: Ingresar total de m³ de concreto
- Función 2: Ingresar litros de aditivos por m³ de concreto
- Función 3: Configuración completa

Así dependiendo de la función donde se encuentre el usuario puede ajustar los parámetros dentro de los cuales va a operar el sistema. Recibe las señales para moverse de una función a otra de los botones de control:

- Entrar
- Aumentar
- Disminuir

Su salida es un entero con el valor de función escogido.

La ejecución de todos estos bloques funcionales es controlada por el bloque organizacional OB1, y son ejecutados de forma cíclica de manera que el proceso de ejecución de las instrucciones es secuencial.

Capítulo 6: Análisis de Resultados

6.1 Resultados

En las pruebas finales del sistema se realizaron una serie de mediciones de la cantidad de líquido dosificado por el sistema dosificador de aditivo. Las pruebas fueron realizadas con agua como líquido a dosificar. La razón para esto es que el aditivo es una sustancia irritante de la piel, ojos y vías respiratorias. Además su precio es elevado, y es contaminante del ambiente por lo cual no se pudo dar pérdidas del mismo en forma de derrames durante las pruebas.

Las condiciones de conexión de la bomba en el taller son similares a las que se presentaran una vez montada sobre la máquina Aliva III. El líquido a dosificar en este caso agua se extrajo de la pila de agua utilizada en el taller eléctrico para la prueba de bombas centrífugas. El sitio y las condiciones de pruebas se ilustran en la figura 6.1.



Figura 6.1 Sitio de pruebas realizadas al sistema dosificador de aditivo.

La siguiente tabla muestra los datos de la prueba final realizada al sistema por parte del departamento de Control de Calidad.

Tabla 6. 1 Datos de la medición final realizada al sistema dosificador.

Prueba 1			
m ³ /hora de concreto proyectado	Litros/minuto Teórico	Litros/minuto Reales medidos	% Error
20	3.36	3.32	1.2
18	3.03	3.03	0
15	2.50	2.49	0.4
12	2.01	2	0.5
10	1.69	1.67	1.18
8	1.34	1.33	0.74
6	1.04	1.03	0.96
Prueba 2			
m ³ /hora de concreto proyectado	Litros/minuto Teórico	Litros/minuto Reales medidos	% Error
20	3.36	3.36	0
18	3	3	0
15	2.52	2.51	0.39
12	2.01	2	0.49
10	1.69	1.67	1.18
8	1.33	1.32	0.75
6	1	1	0

6.2 Análisis

En los datos de la tabla 6.1 los cuales están en el rango de los 6 a 20m³ por hora de concreto lanzado se observa que en todas las mediciones el porcentaje de error es menor al 2%, por lo que el sistema cumple con el objetivo general de lograr una dosificación con un error menor al 2% por litro de líquido dosificado. Este rango dentro del cual el error es menor al 2% se define como el rango de confiabilidad del sistema.

También se observa como existe una fluctuación en los valores del porcentaje de error entre valores cercanos de velocidad de proyección de concreto. Por ejemplo para la prueba 1, de 20 a 18 metros de concreto lanzado por hora se da en algunos casos una fluctuación de 1.2% a un 0% de error. Esto se debe

primordialmente a errores presentes en la ecuación de aproximación polinomial para caracterizar el sistema. Donde existirán valores para los cuales la aproximación ecuación es más exacta que para el caso de otros valores.

El haber realizado las pruebas con agua y no con silicato de sodio no tiene mayor efecto sobre los resultados. Puesto que la bomba peristáltica está diseñada de manera que una mayor densidad del líquido a dosificar no afecte su velocidad de giro. Aunque el agua y el aditivo tienen distintas densidades, el factor que se mide es el volumen.

En la implementación del circuito se consiguió que el sistema sea robusto para resistir las duras condiciones dentro del túnel, gracias a los componentes utilizados. Además para asegurar la protección este se implemento dentro de un gabinete con un nivel de protección IP 65.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

1. El sistema implementado presenta un esquema eléctrico simplificado gracias a la utilización de un PLC, por lo que el número de componentes de hardware se ve reducido.
2. Para lograr una adecuada relación en la mezcla concreto aditivo el factor determinante es lograr distribuir la cantidad de aditivo de una manera uniforme en el concreto, mediante una dosificación en litros por minuto.
3. Las fluctuaciones en los valores de porcentaje de error entre distintas mediciones son producto de la ecuación de aproximación. Donde existirán valores que serán mejor representados por la ecuación y tendrán mayor precisión, mientras que otros valores no serán tan bien representados y su precisión no será tan alta.
4. Para la implementación de un sistema robusto capaz de soportar el duro ambiente en el interior del túnel y garantizar la protección de los equipos eléctricos y electrónicos, se requiere el uso de un gabinete con un grado de IP que garantice hermetismo contra agua, polvo y suciedad.

7.2 Recomendaciones

1. Es recomendable la utilización de un PLC cuyas capacidades no excedan los requerimientos para la implementación del sistema y que a la vez tenga la capacidad suficiente para realizar las funciones requeridas. Esto a fin de disminuir costos económicos y evitar el desperdicio de recursos del PLC.
2. La utilización de componentes de control del mismo fabricante facilita la puesta en marcha del sistema. Por lo que para el caso del PLC y el variador de frecuencia es recomendable utilizarlos de misma casa fabricante. Esto ofrece ventajas en cuanto a precisión del sistema y velocidad en la implementación.
3. Para mejorar la comunicación entre usuario y sistema se recomienda la implementación de una interfaz de tipo HMI¹².
4. El sistema de dosificación es confiable dentro de un rango específico de m³ por hora proyectos, por lo que es recomendable trabajar dentro de ese rango. Llamado rango de confiabilidad.

¹² Human Machine Interfaz, término utilizado por los fabricantes de equipo de automatización.

Bibliografía

1. SIKA. [En línea]: *Sika Global Website* [Suiza]: También disponible en: < <http://www.sika.com> > [Consulta: 2 de Agosto de 2008, 08:00 a.m.]
2. Siemens. [En línea]: *Automation Technologies* [Alemania]: También disponible en: < <http://www.siemens-automation.com> > [Consulta: 5 de Agosto de 2008, 08:00 a.m.]
3. Wikipedia. [En línea]: *IP Code*: También disponible en: <http://en.wikipedia.org/wiki/IP_Code > [Consulta: 10 de septiembre de 2008, 10:00 a.m.]
4. Grupo ICE. [En línea]: *Historia: ¿Cómo nacimos?* [San José, Costa Rica]: También disponible en: < <http://www.grupoice.com/esp/gsomos/infobase/historia.htm> > [Consulta: 10 de Octubre de 2008, 03:00 p.m.]
5. Grupo ICE. [En línea]: Proyecto hidroeléctrico Toro 3 [San José, Costa Rica]: También disponible en: < http://www.grupoice.com/esp/ele/ccgpresas/plantas/fichatecnica/Proyectos_pdf/Toro3.pdf > [Consulta: 11 de Octubre de 2008, 04:00 p.m.]
6. Gobierno de España. [En línea]: Educación Observatorio Tecnológico [España]: También disponible en: < <http://observatorio.cnice.mec.es/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=504> > [Consulta: 6 de Noviembre de 2008, 11:00 a.m.]
7. Universidad Los Libertadores. [En línea]: Taller de ajuste polinomial de curvas [Colombia]: También disponible en: < <http://www.google.co.cr/search?hl=es&q=taller+de+ajuste+polinomial+de+curvas%2Bing+rancisco+orjuela&meta=><http://www.ulibertadores.edu.co> > [Consulta: 9 de Noviembre de 2008, 10:00 a.m.]

Apéndices

A.1 Glosario y abreviaturas

A.1.1 Glosario

Aditivos para concreto: grupo de productos químicos añadidos al concreto para variar sus propiedades de acuerdo a los requerimientos.

Aliva III: máquina proyectora de concreto de fabricación europea, por la empresa SIKA.

Bloques funcionales: los bloques funcionales son equivalentes a métodos en JAVA por ejemplo. Estos bloques funcionales son invocados desde el OB1 y en su contenido se encuentran las instrucciones necesarias para ejecutar las funciones programadas por el usuario.

Bomba peristáltica: es un tipo de bomba cuyo funcionamiento se basa en un sistema de rodillos giratorios que presionan una manguera de caucho. Este proceso de presionar la manguera produce un caudal de salida.

Código IP: es el código encargado de clasificar el grado de protección contra la intrusión de objetos sólidos (incluyendo partes del cuerpo como manos y piernas), polvo, contacto accidental, agua en gabinetes eléctricos. Consiste de las letras IP (international protection rating) seguido por dos dígitos y una letra opcional.

Concreto lanzado: método de colocación de concreto sobre superficies. Donde el principio es proyectar o lanzar el concreto sobre la superficie a cubrir.

Concreto u hormigón: mezcla compuesta de cemento, agua y agregados (arena y grava).

Controlador lógico programable: Sistema Industrial de Control Automático que trabaja bajo una secuencia almacenada en memoria, de instrucciones lógicas.

Diseño de concreto: es un conjunto de cálculos que lleva a la estimación de las cantidades de cemento, agua y agregados necesarios para obtener un concreto, con ciertas características específicas.

Display de 7 segmentos: dispositivo utilizado para mostrar datos, compuesto de un arreglo de diodos emisores de luz.

Disyuntor termo magnético: interruptor eléctrico dotado con protección contra sobre corriente y corto circuitos.

Entrada/salida analógica: puertos con los que está dotado un dispositivo, diseñados para responder a o emitir señales eléctricas de tensión o corriente, con intensidad proporcional a la información contenida.

Entrada/salida digital: puertos con los que está dotado un dispositivo, diseñados para responder a o emitir señales en forma de pulsos.

Gabinete: caja herméticamente sellada utilizada para la instalación de circuitos eléctricos.

Instanciar: es el proceso donde se hace la llamada de un método o bloque de código desde otro método o bloque.

Relé: dispositivo interruptor controlado a través de un solenoide.

Sensor inductivo: sensor capaz de detectar la presencia de metales cerca de su punto sensible, emitiendo un campo magnético que interactúa con el metal detectado.

Sensor: también conocido como transductor es un dispositivo que convierte las variables físicas en señales eléctricas para su interpretación.

Señal analógica: señal de tensión o corriente con un valor variable de amplitud y periodo en el tiempo, esta variable de amplitud o periodo puede representar un dato.

Unidad dosificadora: unidad compuesta por, la bomba dosificadora la cual es una bomba de tipo peristáltica, el motor trifásico que mueve la bomba (incluida la caja reductora que interconecta la bomba con el motor trifásico) y el gabinete contenedor de circuitos de control.

Variador de frecuencia: dispositivo utilizado para controlar la velocidad en motores trifásicos.

A.1.2 Abreviaturas

AWL: lista de instrucciones.

FB: tipo de bloque funcional con capacidad de manejo de memoria.

FC: tipo de bloque funcional sin capacidad de manejo de funciones.

FT: frente de trabajo llamado frente de túnel.

FUP: programación de diagrama de funciones.

HMI: interfaz humano máquina de sus siglas en ingles Human Machine Interface.

KOP: lenguaje de esquema de contactos.

PH: proyecto hidroeléctrico.

PLC: Controlador lógico programable de sus siglas en ingles Programmable Logic Controller.

PT: frente de trabajo llamado pozo túnel.

A.2 Manual de usuario

Proyecto Hidroeléctrico Toro III

Sistema dosificador de aditivo para la
Maquina proyectora de concreto Aliva III

Manual de usuario



Índice

1. Descripción de los controles del sistema	3
2. Configuración del sistema.....	4
3. Interrupción del proceso de dosificación.	5
4. Fin del proceso de dosificación.....	5
5. Posibles errores.....	6
6. Operación en conjunto con la proyectora de concreto Aliva III.....	6



1. Descripción de los controles del sistema

Los principales controles del sistema de dosificación son los que se describen a continuación:

Encendido general: este es el interruptor que controla el encendido general del sistema. Controla el paso de la tensión de alimentación al sistema dosificador.

Selector de dosificación: este selector permite iniciar o detener el proceso de dosificación.

Botón Aumentar: permite aumentar el valor de función o el valor del parámetro de configuración.

Botón Disminuir: permite disminuir el valor de función o el valor del parámetro de configuración.

Botón Entrar: permite conmutar entre selección de función o configuración de parámetro, además se utiliza para dar inicio al proceso de dosificación.

En la figura 1 se observa la ubicación del selector de dosificación y el interruptor de encendido general



Figura 1. Controles para el sistema de dosificación de aditivo.



En la figura 2 se observan los controles llamados Aumentar, Disminuir y Entrar. Además del display de 7 segmentos, el cual es una pantalla en la que se muestran los valores de los distintos parámetros que son ingresados por el usuario.

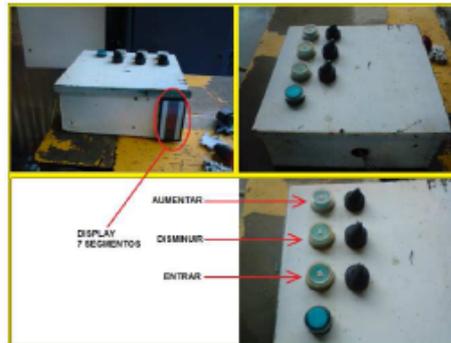


Figura 2. Controles para el sistema de dosificación de aditivo.

2. Configuración del sistema

Para configurar el sistema se deben seguir los siguientes pasos:

Paso 1: Gire el interruptor de encendido general a su posición vertical.

Paso 2: Asegúrese que el selector de dosificación este posicionado a la derecha. Esto dará luz verde al inicio del proceso de dosificación, una vez concluida la configuración del sistema.

Paso 3: Con los botones aumentar y disminuir podrá desplazarse de una función a otra. Así posicione el sistema en la función 1, configuración de metros totales de concreto.

Paso 4: Manteniendo oprimido el botón entrar, con los botones aumentar y disminuir podrá definir el valor de metros totales de concreto deseados. Una vez que define el valor deseado libere el botón entrar y el valor quedara configurado

Paso 5: Posicione el sistema en la función 2, ahora siguiendo el procedimiento de paso 4 podrá configurar el valor de litros de aditivo por metro cubico.

Paso 6: Una vez definido los parámetros de total de concreto y litros de aditivo por metro cubico de concreto, el sistema está listo para iniciar la dosificación. Posicione el sistema en la función 3 y presione el botón entrar. Esto dará inicio al proceso de dosificación de aditivo.



De esta manera el sistema inicia el proceso automático donde ajusta la cantidad de aditivo en litros por minuto que es dispensada al concreto.

3. Interrupción del proceso de dosificación.

Si en algún momento se requiere detener el proceso de dosificación basta con colocar el selector de dosificación hacia su posición izquierda. Esto detendrá inmediatamente el proceso de dosificación.

4. Fin del proceso de dosificación.

Al completarse el proceso de dosificación el sistema se detendrá automáticamente y estará en un estado de espera para el siguiente proceso de dosificación. Esto se da cuando se ha dispensado la cantidad de aditivo total que el sistema calculó, en función de los parámetros ingresados por el usuario.

Por ejemplo: si el usuario define 6m^3 totales de concreto con 15 litros de aditivo por metro cubico de concreto, el sistema calcula el total de aditivo como 90 litros. Así cuando se hayan dispensado 90 litros el sistema se detendrá automáticamente.

Para una nueva configuración del sistema se parte del paso 3 del proceso de configuración del sistema. Si los parámetros son los mismos basta con oprimir el botón entrar para reiniciar un proceso de dosificación idéntico al recién finalizado.



5. Posibles errores

El sistema podría no iniciar el proceso de dosificación si se dan los siguientes casos:

1. El sistema está configurado correctamente pero este no arranca el proceso de dosificación. **Solución:** *coloque el selector de dosificación en su posición derecha.*
2. El selector de dosificación está en su posición correcta y el sistema no arranca el proceso de dosificación. **Solución:** *revisar que el proceso de configuración se haya realizado correctamente ya que si algún parámetro no se ha configurado aun el sistema no dará inicio hasta que a todos los parámetros se les haya definido un valor.*
3. Con el selector de dosificación en la posición correcta y la configuración adecuada el sistema no arranca el proceso de dosificación. **Solución:** *esto puede ser producto de un error ajeno al operador, comuníquese con su técnico.*

6. Operación en conjunto con la proyectora de concreto Aliva III.

Este sistema forma parte del la proyectora de concreto Aliva III. Y su funcionamiento está relacionado directamente con la velocidad de proyección de concreto. Por lo que una vez configurado he inicializado el sistema de dosificación se puede dar comienzo al bombeo de concreto. El sistema de dosificación de adaptara de forma automática a la velocidad de bombeo de concreto de la Aliva III.

De igual forma podría darse el caso donde se desea proyectar concreto sin aditivo agregado, para lo cual basta con deshabilitar la dosificación de aditivo con el selector de dosificación en su posición izquierda.

A.3 Relación concreto aditivo para un diseño de concreto específico.

El proceso del cálculo de los elementos necesarios para obtener un concreto específico es el diseño de concreto. Donde se especifica las cantidades de exactas de agregados (arena y grava), agua y cemento necesarias para que el concreto tenga características específicas de resistencia. Los cálculos necesarios para completar un diseño de concreto son extensos y requieren una serie de mediciones de las características físicas de los agregados y el cemento a utilizar. Estos cálculos y mediciones son de competencia de los técnicos e ingenieros del departamento de control de calidad y son bastante extensos como para ser descritos en este documento. Pero estos cálculos arrojan resultados finales de importancia, como los son la cantidad de agregados, la cantidad de agua y la cantidad de cemento necesarios para la preparación de 1m³ de concreto. Los diseños se crean para un metro cubico de concreto por lo general.

Cada fabricante dicta especificaciones del porcentaje de aditivo por kilo de cemento necesario para que su producto funcione adecuadamente. De esta forma se toma el resultado final de kilos de cemento y se relaciona con el porcentaje de aditivo por kilo de cemento, de esta forma se determina la cantidad de aditivo por metro cubico que se debe dosificar.

$$\text{litros de aditivo por metro cubico} = \text{kilos de cemento} \times \text{porcentaje de aditivo} \quad (\text{Ecuación A.3.1})$$

De esta forma es que se conoce el valor de litros por metro cubico que el operario debe ingresar al sistema dosificador. Se considera importante mencionar estos aspectos para una comprensión mayor del papel del sistema dosificador en el proceso global de la producción de concreto de calidad para ser lanzado.

A.4 Información sobre la empresa/institución

A.4.1 Descripción de la empresa.¹³

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) fue creado por el Decreto - Ley No.449 del 8 de abril de 1949. Su creación fue el resultado de una larga lucha de varias generaciones de costarricenses que procuraron solucionar, definitivamente, los problemas de la escasez de energía eléctrica presentada en los años 40 y en apego de la soberanía nacional, en el campo de la explotación de los recursos hidroeléctricos del país. Como objetivos primarios el ICE debe desarrollar, de manera sostenible, las fuentes productoras de energía existentes en el país y prestar el servicio de electricidad. Posteriormente, en 1963 se le confirió al ICE un nuevo objetivo: el establecimiento, mejoramiento, extensión y operación de los servicios de comunicaciones telefónicas, radiotelegráficas y radiotelefónicas en el territorio nacional. Tres años más tarde, instaló las primeras centrales telefónicas automáticas y, a partir de entonces, las telecomunicaciones iniciaron su desarrollo.

Con el devenir del tiempo, ha evolucionado como un grupo de empresas estatales, integrado por el ICE (Sectores Electricidad y Telecomunicaciones) y sus empresas: Radiográfica Costarricense S.A. (RACSA) y la Compañía Nacional de Fuerza y Luz S.A. (CNFL), las cuales han trazado su trayectoria, mediante diversos proyectos de modernización desarrollados en las últimas décadas.

¹³ Tomado textualmente de cita bibliográfica 4.

La globalización de los mercados y la revolución tecnológica llevan a las empresas del Grupo ICE a redoblar esfuerzos con una clara orientación hacia el cliente, con los mejores y más innovadores productos y servicios, con menos recursos y en el menor tiempo posible.

A.4.2 Descripción del departamento o sección en la que se realizó el proyecto.

El proyecto hidroeléctrico se ubica en la cuenca del río Toro, subcuenca del Río Sarapiquí, perteneciente a la vertiente norte. El proyecto capta las aguas turbinadas por la planta Toro 2. Esta agua se incrementa en un 9 % de las captaciones de los ríos Flor, Florcita, Gemelas y Guayabo. La casa de máquinas será superficial, ubicada en la margen izquierda del río Toro. Se conectará con la línea de transmisión proveniente de Toro 2, ubicada a 300 m de la casa de máquinas.¹⁴

En este proyecto se implementó el taller eléctrico. Este taller forma parte de la SETEC es el departamento de servicios técnicos. Es el grupo de talleres encargados de dar mantenimiento a los equipos del proyecto hidroeléctrico. Además se encarga de implementar los dispositivos necesarios para resolver los problemas que van surgiendo durante el proceso de construcción del proyecto hidroeléctrico. SETEC está formado por el Taller eléctrico, Taller mecánico, Taller de estructuras y Taller de precisión.

¹⁴ Tomado textualmente de cita bibliográfica 5.

Anexos

B.1 Carta de entendimiento

Señores
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Biblioteca José Figueres Ferrer

Yo Greivin Morera Sandoval carné 200021492 , autorizo a la Biblioteca José Figueres del Instituto Tecnológico de Costa Rica disponer del Trabajo Final realizado por mi persona, con el título ***Control de la mezcla concreto-aditivo para la máquina proyector de concreto ALIVA III*** para ser ubicado en la Biblioteca Digital y ser accesado a través de la red Internet.

Firma de estudiante
Cédula: 1-1149-0198

B.2 Aprobación del departamento de control de calidad.

04/11/2008

Proyecto Hidroeléctrico Toro III, Venecia de San Carlos

Señores:

Profesores de la Escuela Ingeniería en Electrónica

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Para las pruebas realizadas al sistema de dosificación de aditivo implementado por el estudiante Greivin Morera Sandoval, como proyecto de graduación en el Proyecto Hidroeléctrico Toro III.

Se hace constar que fueron realizadas las siguientes pruebas de medición en las condiciones descritas a continuación:

- a) Las pruebas se implementaron en el taller eléctrico a manera de laboratorio.
- b) Las pruebas fueron realizadas sobre la bomba de aditivo, aun sin instalar en la proyectora de concreto Aliva III.

De acuerdo con los datos de las mediciones presentados a continuación en la tabla 1 y tabla 2:

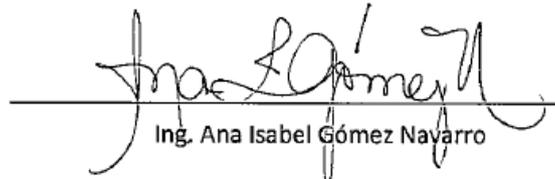
Tabla 1. Mediciones para sistema de dosificación de aditivo Prueba 1.

m ³ /hora de concreto proyectado	Litros/minuto Teórico	Litros/minuto Reales medidos	% Error
20	3.36	3.32	1.2
18	3.03	3.03	0
15	2.50	2.49	0.4
12	2.01	2	0.5
10	1.69	1.67	1.18
8	1.34	1.33	0.74
6	1.04	1.03	0.96

Tabla 2. Mediciones para sistema de dosificación de aditivo Prueba 2.

m ³ /hora de concreto proyectado	Litros/minuto Teórico	Litros/minuto Reales medidos	% Error
20	3.36	3.36	0
18	3	3	0
15	2.52	2.51	0.39
12	2.01	2	0.49
10	1.69	1.67	1.18
8	1.33	1.32	0.75
6	1	1	0

Se concluye por parte del Departamento de Control de Calidad, que el sistema probado en las condiciones anteriormente descritas (condiciones a y b), satisface los requerimientos de precisión para el proceso de dosificación de aditivo en el proyector de concreto Aliva III.



Ing. Ana Isabel Gómez Navarro

Jefatura Departamento de Control de Calidad

Proyecto Hidroeléctrico Toro III - ICE