

Diseño e Implementación de un Módulo Didáctico para Control de Nivel, Temperatura y Caudal mediante la red de Comunicación de Campo DeviceNet

Diego Patricio González Sacoto, Daniel Roberto Noriega Páez

Departamento de Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica del Ejército
Av. El Progreso S/N, Sangolquí, Ecuador

ing.diegogonzalezs@hotmail.com
danielrob_87_@hotmail.com

Resumen--El presente documento expone el diseño e implementación de un módulo didáctico para control de nivel, temperatura y caudal de agua mediante la red de campo DeviceNet, además el módulo está compuesto por sensores que trabajan bajo la adquisición de datos en lazo de corriente de 4 – 20 mA, interfaces hombre-máquina local y remoto, un controlador lógico programable y una serie de dispositivos que hacen del módulo una herramienta muy importante para que los estudiantes desarrollen sus conocimientos en el ámbito de redes industriales, instrumentación industrial, control de procesos y controladores lógicos programables.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes de comunicación de datos toman un papel fundamental en ambientes educativos, comerciales, y no se diga en el ambiente industrial debido que en éste se implican procesos indispensables y en ciertos casos de alto riesgo, es por esto que las redes de comunicación orientadas hacia el área industrial deben tener un alto nivel de confiabilidad y robustez. Las redes de campo nacen como la respuesta a la búsqueda de integración de las comunicaciones industriales, desarrollando nuevos protocolos de comunicación que permitan la medición y control de procesos, donde todos los instrumentos puedan comunicarse en la misma plataforma.

Este proyecto se presenta como una alternativa de aprendizaje sobre el área de redes e instrumentación industrial utilizando dispositivos que posee la Escuela Politécnica del Ejército como sensores de caudal, temperatura, nivel y la red de campo DeviceNet, los mismos que se encuentran disgregados en diferentes laboratorios del Departamento de Eléctrica y Electrónica lo cual hace difícil aplicar los conocimientos adquiridos en

clases, motivo por el cual se propuso la implementación de un módulo didáctico que integre la utilización de los dispositivos antes mencionados, cabe destacar que el módulo proporcionará la utilización de diferentes tecnologías como DeviceNet, interfaces hombre-máquina local y remota además dispositivos que trabajen bajo lazo de corriente, las cuales van a ser integradas en un solo sistema y así dar al estudiante una idea más clara de la utilización de estos elementos.

II. DISEÑO DE LA RED DEVICENET

El diseño de la red DeviceNet instalada en el módulo didáctico fue realizado mediante el software IAB de Rockwell Automation obteniendo los siguientes resultados.

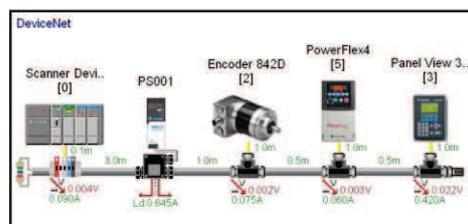


Fig. 1. Red DeviceNet del módulo didáctico

Tabla. 1. Características de voltaje y corriente de DeviceNet

Dispositivo	Parámetro	Valor software
Scanner DeviceNet 1756 DNB	Voltaje	0.003 V
	Corriente	0.090 A
	Longitud cable troncal	3.0 m
Encoder 842D	Voltaje	0.002 V
	Corriente	0.075 A
	Longitud cable troncal	1.0 m
	Longitud cable derivación	1.0 m

PanelView 300	Voltaje	0.003 V
	Corriente	0.042 A
	Longitud cable troncal	0.5 m
	Longitud cable derivación	1.0 m
Power Flex 4	Voltaje	0.006 V
	Corriente	0.060 A
	Longitud cable troncal	0.5 m
	Longitud cable derivación	1.0 m
Fuente de alimentación Allen Bradley 1606-XL	Corriente consumida	0.645 A

III. DISEÑO DEL MÓDULO

3.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Se construirá un sistema didáctico modular, de fácil montaje, flexible y seguro, implementado bajo normas de seguridad y montaje en cuanto sea posible, para el entrenamiento de la red de campo DeviceNet y dispositivos de instrumentación industrial.

El sistema será llamado CTN-1 debido a sus siglas referentes a los procesos que se podrán realizar en éste, los cuales son: control de caudal, control de temperatura y control de nivel de agua.

Las características de los procesos que se podrán realizar en la estación CTN-1 se detallan en la Tabla. 2.

Tabla. 2. Procesos de la estación CTN-1

Proceso	Rango	Tolerancia	Tipo de control
Control temperatura	15 – 20 °C	± 5	On-Off con histéresis
Control nivel	0 – 17 cm	± 5	On-Off con histéresis
Control caudal	20 – 55 l/min	± 5	Proporcional integral (PI)

3.2. SISTEMAS DEL MÓDULO

La descripción del módulo didáctico se dividirá en cuatro sistemas para de esta manera facilitar su entendimiento y descripción. La Figura. 2. muestra los sistemas que forman parte del módulo didáctico.

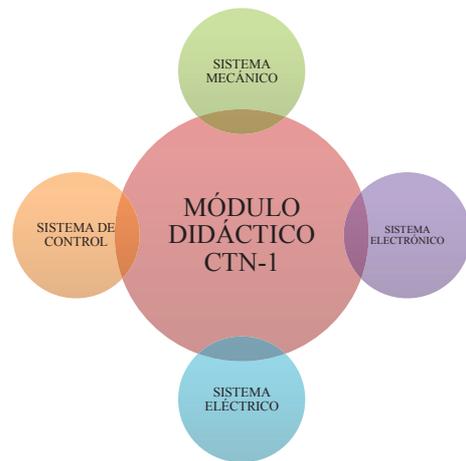


Fig. 2. Sistemas que conforman el módulo didáctico

3.2.1. SISTEMA MECÁNICO

El sistema mecánico consta de dos subsistemas que son: Estructura mecánica y el sistema hidráulico.

3.2.1.1. Estructura mecánica

La base estructural del módulo didáctico fue construido con perfiles de aluminio reforzado de 1½ x 1½ pulgada debido a que se necesita una estructura robusta capaz de soportar toda la instrumentación y componentes mecánicos que va a contener el módulo, la estructura de aluminio se muestra en la Figura. 3.

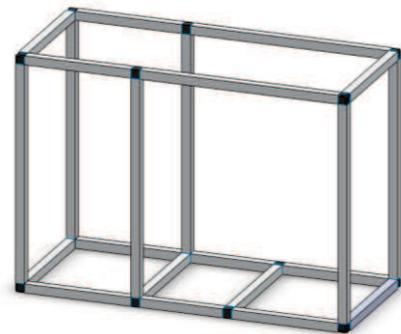


Fig. 3. Base estructural del módulo

Para determinar que el diseño de la estructura de aluminio es suficientemente fuerte y capaz de soportar el peso de los dispositivos que van a ser montados en ésta, se realizó el análisis mecánico con referencia a la resistencia del material y al factor de seguridad. Los resultados obtenidos mediante la utilización del software de diseño asistido por computadora SolidWork se muestran en la Tabla. 3.

Tabla. 3. Análisis estructura de aluminio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Stress	Tensión de von Mises	531.122 N/m ²	3.37844e+006 N/m ²
Factor of Safety	Tensión de von Mises	12.2449	77889

3.2.1.2. Sistema hidráulico

El sistema hidráulico que se utilizó es de realimentación continua lo que significa que el agua circulará por todo el sistema en forma de lazo cerrado, de esta manera se garantiza el ahorro de agua y el abastecimiento constante de la misma.

La Figura. 4. muestra el sistema hidráulico del módulo didáctico.

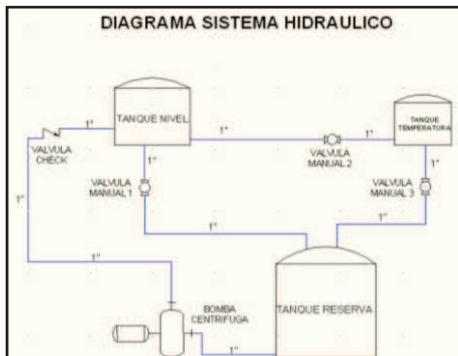


Fig. 4. Sistema hidráulico del módulo

El sistema hidráulico se dividirá en el diseño de la tubería y en el diseño de los tanques, que serán descritos a continuación.

a) TUBERÍA

Los datos impuestos para el diseño del sistema hidráulico correspondientes a la estructura del módulo didáctico que muestra la Figura. 4. se indicarán en la Tabla. 3.

Tabla. 4. Datos de diseño-tubería

Variable	Valor
Caudal	0.001 m ³ /s
Elevación de succión	0.05 m
Elevación de descarga	1.5 m
Longitud de descarga	3 m
Tiempo uso diario	1 h

Sabiendo que la velocidad será de 2 m/s, debido a consideraciones de diseño.

$$Q = V * A$$

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{0,001}{2}$$

$$A = 0,0005 \text{ m}^2$$

Para hallar el diámetro de la tubería se aplica la siguiente ecuación.

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0,0005}{\pi}}$$

$$D = 0,02523 \text{ m} = 25,23 \text{ mm}$$

De tal manera el diámetro comercial sería:

$$D = 25,4 \text{ mm}$$

Corrigiendo la velocidad con el nuevo diámetro,

$$V = \frac{4 * 0,001}{\pi * 0,0254^2}$$

$$V = 1,97 \text{ m/s}$$

Para el cálculo de las pérdidas por fricción se utilizará la ecuación de Manning,

$$Q = 0,3117 \frac{D^{8/3} * hf^{1/2}}{L^{1/2} * n}$$

Donde:

n es el coeficiente de rugosidad Manning, para tubería PVC n=0,009.

L es la longitud de descarga.

D: diámetro de la tubería

Q: Caudal

Despejando hf,

$$hf = \left(\frac{Q * L^{0,5} * n}{0,3117 * D^{2,66}} \right)^2$$

Sustituyendo,

$$hf = \left(\frac{0,001 * 3^{0,5} * 0,009}{0,3117 * 0,0254^{2,66}} \right)^2$$

$$hf = 0,77 \text{ m}$$

Para las pérdidas locales utilizaremos la siguiente formula,

$$hfc = K * \frac{V^2}{2 * g}$$

$$P(HP) = 1,51 HP \approx 1.5 HP$$

Donde:

K: coeficiente que varía de acuerdo al accesorio

g: aceleración de la gravedad

V: velocidad

Se utilizarán 7 codos de 90° en todo el trayecto de la tubería de tal manera el valor de K para el codo de 90° corresponde a 0,90.

$$h_{fc} = 0,9 * \frac{1,97^2}{2 * 9,8}$$

$$h_{fc} = 0,18 * 7$$

$$h_{fc} = 1,26 m$$

Para hallar la presión normal es necesario el cálculo de la altura dinámica para ello se utilizará la siguiente formula,

$$H_m = \text{perdidas por fricción} + \text{perdidas locales} + \text{carga estática}$$

La carga estática se define como,

$$\text{carga estática} = \text{Elevación de descarga} - \text{Elevación de succión}$$

$$\text{carga estática} = 1,5 - 0,05$$

$$\text{carga estática} = 1,45$$

Por tanto,

$$H_m = 0,77 + 1,26 + 1,45$$

$$H_m = 3,48 m$$

Para el cálculo de la bomba centrífuga es necesario saber el caudal de bombeo, el cual se realiza mediante la siguiente ecuación

$$Q_b = \text{Caudal} * \frac{24}{t}$$

$$Q_b = 0,001 * \frac{24}{1}$$

$$Q_b = 0,024 m^3/s$$

La potencia de la bomba centrífuga en HP se calcula con la siguiente formula

$$P(HP) = \frac{Q_b * H_m * \gamma}{79 * \varepsilon}$$

Donde:

Q_b: caudal de bombeo en m³/s

H_m: altura total de carga

γ: Densidad del agua (1000 kg/m³)

ε: Eficiencia (70%)

Sustituyendo,

$$P(HP) = \frac{0,024 * 3,48 * 1000}{79 * 0,7}$$

b) TANQUES

De acuerdo al diseño, el material de los tanques es de acrílico de 12 mm de espesor y de forma rectangular, sus características se describen en la Tabla. 5.

Tabla. 5. Características del material de los tanques

Material	Temp °C	Resistencia	
		mecánica $\frac{kg. m}{cm}$	Corrosión
Acrílico 12 mm	98	0.01 - 0.02	Muy buena resistencia

Las características de los tanques se describen en la Tabla. 6, tomando en cuenta su volumen y su análisis estructural.

Tabla. 6. Características mecánicas de los tanques

Tanque	Volumen m ³	Factor de seguridad	Tensión de Von Mises
Reserva	0.1	10.0554	4.47522e+006 N/m ²
Nivel	0.036	41.7213	1.07859e+006 N/m ²
Temperatura	0.009	224002	200.891 N/m ²

3.2.2. SISTEMA ELECTRÓNICO

El sistema electrónico de la estación CTN-1 consta de dos subsistemas que son: Instrumentación e Interfaces.

3.2.2.1. Instrumentación

Para realizar los procesos control de caudal, control de nivel y control de temperatura la estación CTN-1 posee instrumentación que consta de sensores, actuadores y controladores, la Figura. 5. muestra el diagrama de instrumentación de la estación.

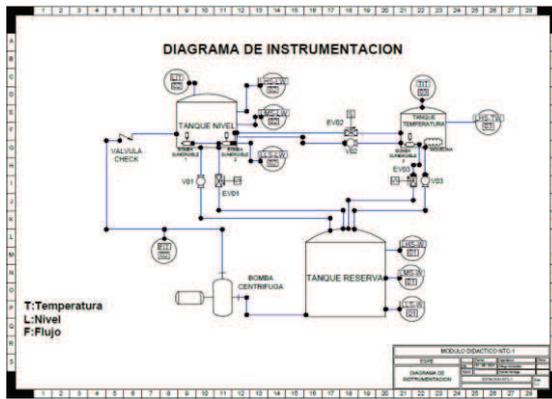


Fig. 5. Diagrama de instrumentación de la estación CTN-1

a) Sensores

Los sensores que posee la estación CTN-1 son:

- **Sensor de Caudal:** Sensor SIEMENS SITRANS FM MAG 5000W y transmisor SIEMENS SITRANS FM MAG 6000I, las principales características de este sensor se detallan en la Tabla. 7.

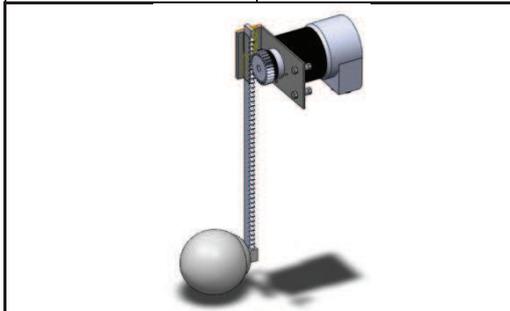
Tabla. 7. Características Sensor de caudal

Parámetro	Especificación
Rango	0 – 150 lt/min
Salida	4 – 20 mA
Alimentación	120 VAC ó 24 VDC
Consumo de corriente	7 mA
Orientación	Horizontal/Vertical
Fluido	Agua

- **Sensor de Nivel:** Para realizar el control de nivel se utilizó como sensor un Encoder DeviceNet Allen Bradley 842D con un acople mecánico, las principales características del Encoder se detallan en la Tabla. 8.

Tabla. 8. Características Encoder

Parámetro	Especificación
Formato de codificación	Binario natural
Interface eléctrica	Especificación DeviceNet 2.0
Voltaje de operación	11 – 25 VDC
Potencia	1.8W (75 mA a 24 VDC)



- **Sensor de Temperatura:** Sensor Allen Bradley 873E, las principales características de este sensor se detallan en la Tabla. 9.

Tabla. 9. Características Sensor de temperatura

Parámetro	Especificación
Rango	0 – 150 °C
Salida	4 – 20 mA
Alimentación	24 VDC
Consumo de corriente	60 mA
Orientación	Horizontal/Vertical
Precisión	0.2 °C
Repetibilidad	0.1 °C
Linealidad	alta

- **Sensores de nivel de los tanques:** El diseño de los sensores de nivel alto, medio y bajo de los tanques de reserva, nivel y temperatura se basa en el principio de la conductividad del agua.

Cada tanque consta de 3 contactos y se aplica un voltaje de 24 VDC en la base de los tanques, a medida que el agua sube alcanza cada contacto y estos transmiten los 24 VDC al PLC.

b) Actuadores

Los actuadores que posee la estación CTN-1 son:

- **Bomba Centrífuga:** Los cálculos realizados anteriormente demostraron que el valor de la potencia de la bomba requerida es de 1,5 Hp, para realizar el control de caudal y el control de nivel se dispone del variador de frecuencia PowerFlex 4 que permite controlar motores de hasta 5 Hp y trabaja con un voltaje trifásico de 220 VAC, de esta manera la bomba centrífuga POMPETRAVAINI que posee la estación CTN-1 tiene las características que detallan la Tabla. 10.

Tabla. 10. Características Bomba Centrífuga

Parámetro	Valor
Alimentación	3 fases 220 VAC
Potencia	1,5 Hp
Corriente nominal	5 A
Caudal	30 - 110 l/min

- **Bombas Sumergibles:** Las bombas sumergibles se usan para el drenaje automático del tanque de nivel y para el llenado y drenaje automático del tanque de temperatura.

La cantidad de agua que se drena del tanque de nivel es de 15 litros, el tiempo de drenaje para este volumen de agua lo impusimos de 1,5 minutos, de esta manera el caudal que tiene la bomba sumergible es:

$$Q = \frac{15 \text{ litros}}{1,5 \text{ minutos}}$$

$$Q = 10 \text{ l/min}$$

El volumen utilizable del tanque de temperatura es de 5 litros, el tiempo de llenado y drenaje para este volumen de agua lo impusimos de 1 minuto, de esta manera el caudal que tienen las bombas sumergibles es:

$$Q = \frac{5 \text{ litros}}{1 \text{ minutos}}$$

$$Q = 5 \text{ lt/min}$$

- **Niquelina:** El cálculo de la potencia de la niquelina requerida se basa en la cantidad de agua potable y el tiempo en el cual se va a calentar hasta llegar a su valor máximo.

El tanque en el cual se va a realizar el control de temperatura posee un volumen interno de 7 litros aproximadamente, de los cuales utilizaremos 5 litros como seguridad para evitar el desbordamiento del agua.

Como característica del control nos impusimos una temperatura máxima de 50 °C en un tiempo de 10 minutos, mientras que la temperatura inicial del proceso será la temperatura ambiente del agua potable que es de 15 °C.

Para calcular la potencia requerida se debe calcular el calor necesario para calentar los 5 litros de agua mediante la ecuación de transferencia de calor.

$$q = m \cdot Ce \cdot \Delta T$$

q: Calor necesario

m: Masa de agua

Ce: Calor específico del agua ($1 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}$)

ΔT : Variación de temperatura (35°C)

El cálculo de la masa de agua se realiza en base a la ecuación de la densidad:

$$d = m \cdot V$$

m: Masa de agua

d: Densidad del agua ($1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)

V: Volumen de agua (5 lts o 5000 cm³)

$$m = d \cdot V$$

$$m = \frac{1 \text{ g}}{\text{cm}^3} \cdot 5000 \text{ cm}^3$$

$$m = 5000 \text{ g}$$

$$q = m \cdot Ce \cdot \Delta T$$

$$q = 5000 \text{ g} \cdot \frac{1 \text{ cal}}{\text{g}^\circ\text{C}} \cdot 35^\circ\text{C}$$

$$q = 175000 \text{ cal}$$

La potencia se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$P = \frac{q \text{ (cal)}}{t \text{ (s)}}$$

P: Potencia necesaria ($\frac{\text{cal}}{\text{s}}$)

q: Calor (cal)

t: Tiempo (10 min o 600 s)

$$P = \frac{175000 \text{ cal}}{600 \text{ s}}$$

$$P = 291,67 \frac{\text{cal}}{\text{s}}$$

$$P = 1050 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$1 \text{ watt} = 0,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$P[W] = \frac{1050 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \cdot 1 \text{ watt}}{0,86 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}$$

$$P[W] = 1121 \text{ W} \approx 1000 \text{ W}$$

Para la activación de la niquelina es necesario el uso de un relé de estado sólido, la corriente que deben soportar los contactos del relé se calcula de acuerdo al voltaje y a la potencia de la niquelina de la siguiente manera:

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{1000}{118}$$

$$I = 8,47 \text{ A} \approx 10 \text{ A}$$

c) Controladores

El controlador que posee la estación CTN-1 es:

- **Controlador Lógico Programable (PLC):** Para realizar los procesos control de caudal, control de nivel y control de temperatura la Estación CTN-1 cuenta con el PLC ControlLogix 1756-L61 que posee los siguientes módulos:

Tabla. 11. Módulos del PLC

Tipo	Módulo
Controlador	1756-L61
Salidas a relé	1756-OW16I
Entradas DC	1756-IB16/A
Entradas análogas	1756-IF8
Scanner DeviceNet	1756-DNB
Comunicación Ethernet	1756-ENBT

3.2.2.2. Interfaces

La estación CTN-1 se controla y monitorea mediante dos interfaces una local y otra remota que se encuentra montada en el panel del operador.

a) Panel del Operador

En el panel del operador se encuentran los dispositivos necesarios para que el usuario pueda controlar y supervisar correctamente a la estación CTN-1, el diseño del panel del operador se basó en la guía ergonómica de diseño GEMMA.

Al aplicar la guía GEMMA en el diseño de la estación CTN-1 se obtuvo el gráfico GEMMA, en este se indica la evolución que existe entre los estados de funcionamiento, paro y fallo de la estación, el gráfico obtenido se muestra en la Figura. 6.

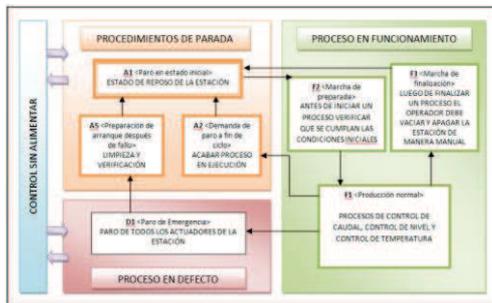


Figura.6. Gráfico GEMMA de la estación CTN-1

Luego de obtener el gráfico GEMMA completo de la estación CTN-1, se deben detallar los elementos de mando y visualización que se requieren en cada estado como indica la Tabla. #.

Tabla. 12. Dispositivos del panel del operador de la estación

Dispositivo	Estados	Tipo
PLC	F1, A2, D1	Control
Panel View	F1, A2	Dispositivo gráfico de visualización y control
Pulsador verde	A1	Maniobra
Pulsador rojo	F3	Maniobra
Pulsador hongo rojo de emergencia	D1	Maniobra
Luz piloto verde	A1	Indicador

Luz piloto amarilla	F3	Indicador
Luz piloto roja	D1	Indicador

De esta manera el Panel del Operador se muestra en la Figura. 7.



Figura. 7 Distribución de elementos del panel del operador

b) HMI Remoto

El HMI remoto se desarrolló en el dispositivo Panel View 300 mediante el software PanelBuilder32, para realizar los procesos control de caudal, control de nivel y control de temperatura se realizaron las siguientes pantallas:

Tabla. 13. Pantallas del HMI remoto

Pantalla	Función
	Información textual del propietario de la estación CTN-1.
	Permitirá seleccionar los diferentes procesos
	Indica toda la información textual y grafica necesaria para el desarrollo de los diferentes procesos
	Indica si se ha activado alguna alarma en cualquier proceso.

c) HMI Local

Para el desarrollo de la interface hombre-máquina local se utilizará la guía de diseño Gedís que consta de 10 pasos como se describe en la Figura. 5.

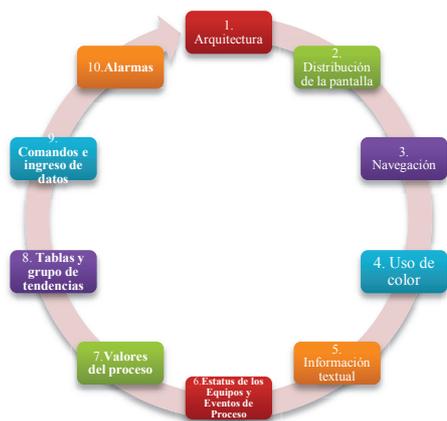


Figura. 8. Pasos de diseño de la guía Gedis

Después de haber corrido la guía el resultado de ésta se refleja en las pantallas del HMI remoto que se indican a continuación.

Tabla. 14. Pantallas HMI-Local

Pantallas	Función
	Pantalla de presentación de la estación CTN-1
	Indica toda la información textual y gráfica necesaria para el desarrollo de los diferentes procesos
	Se visualiza las variables del proceso mediante un Real-Time Trend.
	Indica las condiciones previas de la estación antes de realizar algún proceso.
	Indica el detalle si ha ocurrido un evento de alarma en cualquier proceso.
	En esta pantalla se encontrará información de manuales
	Información general de la estación

3.2.3. SISTEMA ELÉCTRICO

El sistema eléctrico de la estación CTN-1 consta de tres subsistemas principales que son: Consumo de potencia, Protecciones y Alambrado.

3.2.3.1. Consumo de Potencia

La Tabla. 15. detalla el consumo de potencia de los dispositivos de la estación CTN-1

Tabla. 15. Consumo de potencia de los dispositivos de la estación CTN-1

Dispositivo	Consumo de potencia [W]
Controlador Lógico Programable	25
Bombas de agua sumergibles (3)	33
Luces indicadoras (3)	72
Fuente 24 VDC	240
Niquelina	1000
Bomba Centrifuga	1120
Total	2489

Para obtener el consumo de potencia de la estación CTN-1 se multiplica el valor de 2489 W por el factor de sobrecarga de 1.1.

$$P = 2489 * 1.1$$

$$P = 2738 \text{ W}$$

3.2.3.2. Protecciones

Como en toda instalación eléctrica la estación CTN-1 cuenta con protecciones eléctricas contra cortocircuito y sobrecarga.

a) Cortocircuito

Tabla. 16. Características de los fusibles de la estación CTN-1

Tipo de fusible	Corriente Nominal [A]	Voltaje [V]	Nomenclatura
Fusible tubular tipo L	4	120 VAC	F1
Fusible tubular tipo M	6	220 VAC	F2, F3 y F4

b) Sobrecarga

Tabla .17. Características de los disyuntores termo-magnéticos de la estación CTN-1

Nomenclatura	Corriente Nominal [A]	Voltaje [V]
Q1	10	120 VAC
Q2	4-6.3	220 VAC

3.2.3.3. Alambrado

El alambrado de la estación CTN-1 se realizó de acuerdo a la norma IEC 60446, la cual establece el siguiente código de colores de cables:

Tabla. 18. Color de cables de acuerdo al voltaje

Voltaje		Color
24 VDC	24 VDC	Rojo
	0 VDC COM	Negro
120 VAC	Fase	Negro
	Neutro	Blanco
	Tierra	Verde
220 VAC	Fase T	Amarillo
	Fase R	Azul
	Fase S	Rojo
	Neutro	Blanco
	Tierra	Verde

3.2.4. SISTEMA DE CONTROL

Para el control de temperatura y nivel se realizaron controles ON-OFF con histéresis, sus características se describen en las siguientes tablas respectivamente.

Tabla. 19. Control de temperatura

Control de temperatura ON-OFF	
Rango de control	15 – 50 °C
Histéresis	
Histéresis positiva	Set Point + 1 °C
Histéresis negativa	Set Point - 1 °C
Estados	
Actuadores	
Si el Set Point es mayor que la variable de proceso	Se activa la niquelina
Si el Set Point es menor que la variable de proceso	Se activan las bombas sumergibles de drenaje y mezcla de agua con el fin de re circular el agua
Si el Set Point se mantiene entre los límites de la histéresis	Todos los actuadores se desactivan

Tabla. 20. Control de nivel

Control de nivel ON-OFF	
Rango de control	0 – 17 cm
Histéresis	
Histéresis positiva	Set Point + 0.5 cm
Histéresis negativa	Set Point - 0.5 cm
Estados	
Actuadores	
Si el Set Point es mayor que la variable de proceso	Se activa la bomba centrífuga a 20 Hz
Si el Set Point es menor que la variable de proceso	Se activan las bombas sumergibles de drenaje automático
Si el Set Point se mantiene entre los límites de la histéresis	Todos los actuadores se desactivan

Para el control de caudal se diseñó un controlador PI, el propósito de este controlador es disminuir y eliminar el error en estado estacionario, mejorar el margen de ganancia y disminuir el tiempo de establecimiento del sistema.

A partir de la curva de reacción del proceso se realiza una aproximación de los parámetros de la planta a un modelo matemático de primer orden más tiempo muerto cuya ecuación de transferencia posee la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{K e^{-t_0 \cdot s}}{\tau s + 1}$$

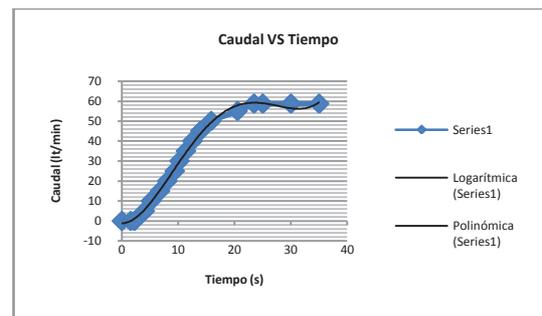


Figura. 9. Curva de reacción de la planta de caudal

El método que se utilizó para obtener el modelo matemático de la planta es el método de los dos puntos propuesto por Smith, el cual consiste en determinar los instantes de tiempo t_1 y t_2 en los cuales la variable del proceso alcanza el 28,3 y 63,2 % de su máximo valor, con la ayuda de las siguientes ecuaciones determinamos las constantes del modelo matemático de la planta.

$$K = \frac{\Delta Salida}{\Delta Entrada} = \frac{(58,67 - 0) \text{ lt/min}}{(60 - 0) \text{ Hz}} = \frac{58,67 \text{ lt/min}}{60 \text{ Hz}} = 0,978 \text{ lt/minHz}$$

$$\tau = \frac{3}{2}(t_1 - t_2) = \frac{3}{2}(12s - 7s) = 7,5s$$

$$t_0 = t_2 - \tau = 12s - 7,5s = 4,5s$$

De esta manera la ecuación característica de la planta para el control de caudal es la siguiente:

$$G(s) = \frac{0,978 e^{-4,5 \cdot s}}{7,5s + 1}$$

El diseño del controlador PI de la planta del proceso de control de caudal se diseñó en base al método de oscilaciones de Ziegler-Nichols, luego de aplicar el método a la planta se obtuvieron la ganancia crítica (K_c) y el período de oscilación (P_c) con los siguientes valores:

$$K_c = 40$$

$$P_c = 5s$$

Para obtener las constantes del controlador PI mediante los datos obtenidos aplicamos las ecuaciones descritas por Ziegler-Nichols que se detallan en la Tabla. 21.

Tabla. 21. Ecuaciones de Ziegler-Nichols

	K	Ti	Td
P	0.50 Kc		
PI	0.45 Kc	$\frac{Pc}{1.2}$	
PID	0.60 Kc	$\frac{Pc}{2}$	$\frac{Pc}{8}$

Aplicando los valores obtenidos a las ecuaciones de Ziegler-Nichols se obtiene los valores de los parámetros del controlador.

$$Kp = 0.45Kc = 0.45 * 40 = 18$$

$$Ti = \frac{Pc}{1.2} = \frac{5}{1.2} = 4.17$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} = \frac{18}{4.17} = 4.32$$

Para verificar la respuesta del controlador lo sometemos a una entrada escalón, la simulación de la planta y del controlador se realizaron en Simulink de Matlab como se indica en la Figura. 10.

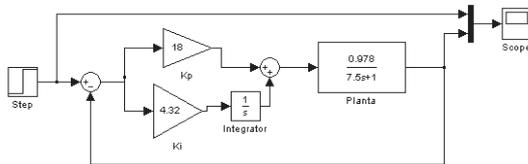


Figura. 10. Simulación de la planta y controlador de caudal

La respuesta del controlador ante una entrada escalón se indica en la Figura. 11.

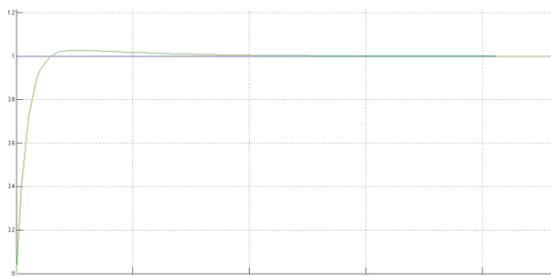


Figura. 11. Respuesta del sistema ante una entrada escalón.

IV. CONCLUSIONES

➤ Con la creación de éste sistema de entrenamiento para la Escuela Politécnica del Ejército, se permitirá a los alumnos el inicio de la utilización de redes industriales en éste caso la red de campo DeviceNet, la utilización de sensores que trabajan bajo el lazo de corriente 4 -20 mA y la utilización de controladores lógicos programables, mediante tres prácticas de control de procesos industriales como son: control de caudal, control de nivel y control de temperatura.

➤ El módulo de entrenamiento ó estación de procesos CTN-1 fue diseñada considerando las normas de seguridad, tanto para protección de los operadores como de los equipos que se encuentran instalados.

➤ De acuerdo a los datos obtenidos en el análisis estructural de los dispositivos mecánicos de la estación CTN-1, se garantiza que el sistema mecánico cumple satisfactoriamente con las normas de seguridad impuestas en el diseño.

➤ Al implementar la red de comunicación de campo DeviceNet en la estación CTN-1 se ha conseguido disminuir el cableado, el costo de la instalación y el tiempo de puesta en marcha, siendo éstas las principales características de los buses de campo frente a otro tipo de sistemas de adquisición de datos, comprobando que las redes de campo son una muy buena alternativa para el control, monitoreo y diagnóstico de un proceso industrial.

➤ Debido a que DeviceNet es un protocolo abierto, existe una gran variedad de opciones de cableado y dispositivos que permitiría una futura expansión de la estación CTN-1 sin necesidad de realizar mayores cambios en ésta y así hacer de la estación una herramienta más completa para el desarrollo práctico de los estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

➤ Al diseñar el HMI basándonos en la guía ergonómica de diseño GEDIS, se ha conseguido implementar un sistema de interface hombre-máquina amigable con el usuario y fácil de interpretar, de esta manera se agiliza el uso de la estación CTN-1.

➤ Debido a las características de los procesos de control de temperatura y nivel, fue necesario realizar un control On-Off con histéresis, el cual prolonga la vida útil de los actuadores disminuyendo las conmutaciones sucesivas de éstos.

➤ Para el control de caudal fue suficiente implementar un controlador PI ya que éste tipo de control es ideal para un sistema que posee una constante de tiempo corta, por tal motivo la variable derivativa no influye en la respuesta del controlador.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradecemos a Dios, por darnos salud, fortaleza y sabiduría necesarias para concluir con éxito tan exigente carrera, y por darnos a los padres que tenemos los cuales son los mejores del mundo quienes nos dieron y guiaron nuestras vidas, a nuestros hermanos que siempre estuvieron cuando los necesitábamos y siempre estarán ahí.

Un profundo agradecimiento a la Escuela Politécnica del Ejército por ser una de las mejores universidades del país, donde pudimos aprender a ser personas útiles para la sociedad tanto en el crecimiento intelectual como personal.

A nuestros profesores que gracias a sus proyectos aprendimos a trabajar por muchas horas seguidas y al momento de culminarlos sentir esa alegría única que nos da la satisfacción de decir, eso lo hicimos nosotros.

Gracias a nuestros amigos con quienes compartimos deberes, proyectos, amanecidas, farras, alegrías, decepciones y muchas cosas las cuales nos hacen valorarlos y respetarlos.

REFERENCIAS

[1] Muñoz, Juan, Estudio de la aplicación de los estándares DeviceNet y ControlNet de comunicaciones industriales como soluciones de red de campo y proceso de una planta industrial, <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2007/bmfcim971e/doc/parte/ii.pdf>

[2] Universidad mayor de San Simón, Abastecimiento de agua, Hidráulica de tuberías, <http://es.scribd.com/doc/13938949/Capitulo-V-Hidraulica-de-tuberias>, octubre 2011.

[3] Bradley, Allen, Sistema de cables DeviceNet, www.rockwellautomation.com, Mayo 1999, Septiembre 2011.

[4] RISTAL S.R.L., RISTAL, Ristal Tableros Eléctricos, http://www.ristal.com.ar/html/e_gest1.htm, Septiembre 2011.

[5] SIEMENS. (s.f.). SITRANS F M MAG 5000/6000. http://cache.automation.siemens.com/dnl/DE/DE1MDIXMQAA_42674515_HB/MAG_5_6000_Operating_Instructions_Es.pdf, septiembre 2011

[6] SIEMENS. (s.f.). SITRANS MAG 6000 I/6000 I Ex, www.siemens.com/flowdocumentation/A5E01222968-04, septiembre 2011

[7] SIEMENS. (s.f.). SIEMENS caudalímetros electromagnéticos manual usuario, [http://www.google.com.ec/#hl=es&sugexp=kjrmc&cp=23&gs_id=2&xhr=t&q=MAG5100_OI_Es_esES+\(2\)&pf=p&scient=psyb&site=&source=hp&pbx=1&oq=MAG5100_OI_Es_esES+\(2\)&aq=f&aqi=&aql=&gs_sm=&gs_upl=&bav=cf.osb&fp=d3abf746c960a6f3&biw=1024&bih=587](http://www.google.com.ec/#hl=es&sugexp=kjrmc&cp=23&gs_id=2&xhr=t&q=MAG5100_OI_Es_esES+(2)&pf=p&scient=psyb&site=&source=hp&pbx=1&oq=MAG5100_OI_Es_esES+(2)&aq=f&aqi=&aql=&gs_sm=&gs_upl=&bav=cf.osb&fp=d3abf746c960a6f3&biw=1024&bih=587), septiembre 2011

[8] Automation, R. (s.f.). Sensor Temperatura 837E,

http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/837e-m001_-en-p.pdf, septiembre 2011

[9] Automation, R. (s.f.). Sensores DeviceNet, http://samplecode.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/ca/c116-ca510_-de-p.pdf, septiembre 2011

[10] Automation, R. (s.f.). Encoder DeviceNet 842D, http://samplecode.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/842d-um001_-en-p.pdf, septiembre 2011

BIBLIOGRAFÍA DE LOS AUTORES

Diego Patricio González Sacoto



Nace el 22 de septiembre de 1986, en la ciudad de Quito, sus estudios primarios los realizó en el Colegio Militar “Abdón Calderón” de la ciudad de Quito, para posteriormente ingresar a la Unidad Educativa Municipal Quitumbe donde se graduó con el título de Físico Matemático.

Obtuvo el título de Ingeniero Electrónico especialidad Automatización y Control en la Escuela Politécnica del Ejército en el año 2012.

Daniel Roberto Noriega Páez



Nace el 2 de Enero de 1987, en la ciudad de Quito, sus estudios primarios y secundarios los realizó en colegio Liceo Naval de la ciudad de Quito donde se graduó con el título de Físico Matemático.

Obtuvo el título de Ingeniero Electrónico especialidad Automatización y Control en la Escuela Politécnica del Ejército en el año 2012.