



ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

EXTENSIÓN LATACUNGA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO
DE CLORACIÓN DE AGUA EN FORMA REMOTA MEDIANTE
TECNOLOGÍA ZIGBEE PARA LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN “EL
CALZADO” DE LA EPMAPAL”**

**AYALA TRUJILLO SILVIA ALEXANDRA
PACHECO ESPINEL GABRIEL SANTIAGO**

Tesis presentada como requisito previo a la obtención del título de:

“INGENIERO EN MECATRÓNICA”

2013

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

NOSOTROS, AYALA TRUJILLO SILVIA ALEXANDRA

PACHECO ESPINEL GABRIEL SANTIAGO

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado **“Implementación de un sistema de control y monitoreo de cloración de agua en forma remota mediante tecnología zigbee para la planta de potabilización “El calzado” de la EPMAPAL”** ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga, Junio del 2013.

AYALA T. SILVIA A.

PACHECO E. GABRIEL S.

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICADO

ING. DAVID RIVAS (DIRECTOR)

ING. FÉLIX MAJARRÉS (CODIRECTOR)

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado **“Implementación de un sistema de control y monitoreo de cloración de agua en forma remota mediante tecnología zigbee para la planta de potabilización “El calzado” de la EPMAPAL”** Realizado por los señores: AYALA TRUJILLO SILVIA ALEXANDRA y PACHECO ESPINEL GABRIEL SANTIAGO; ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

Latacunga, Junio del 2013.

ING.DAVID RIVAS
DIRECTOR

ING.FÉLIX MANJARRÉS
CODIRECTOR

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

NOSOTROS, AYALA TRUJILLO SILVIA ALEXANDRA

PACHECO ESPINEL GABRIEL SANTIAGO

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo **“Implementación de un sistema de control y monitoreo de cloración de agua en forma remota mediante tecnología zigbee para la planta de potabilización “El calzado” de la EPMAPAL.”** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, Junio del 2013.

AYALA T. SILVIA A.

PACHECO E. GABRIEL S.

DEDICATORIA

En primer lugar, queremos dedicar y a la vez resaltar la labor de nuestro Director de tesis el Ingeniero David Rivas quien ha sido el motor de todo el proceso, desde su inicio hasta el final, su serenidad para escuchar nuestra manera de pensar y luego emitir sus sabios criterios, sus palabras de aliento para hacer frente a los imprevistos que se presentaron y que nos han permitido realizar el proyecto investigativo aplicando los que nos enseñaron nuestros maestros en la carrera innovadora de la “Mecatrónica”.

En segundo lugar, queremos dedicar el Proyecto al Ingeniero Félix Manjarrés Codirector de la Tesis previa a la obtención de la Ingeniería, pues con su apoyo, amabilidad y disponibilidad con que afrontaron nuestra propuesta de trabajo, nos dió luces para salir adelante participando conjuntamente con nosotros en el proceso investigativo.

De igual manera, queremos mencionar la indispensable tarea realizada por nuestros padres, hermanos, familiares y amigos que han participado a lo largo de nuestra carrera estudiantil con su implicación y esfuerzo moral permaneciendo cerca de nosotros, entonces, por qué no dedicarlos, si ellos han sido el pilar para llegar a la culminación estudiantil en nuestra casona universitaria la ESPE-L.

SILVIA Y SANTIAGO

AGRADECIMIENTO

Al analizar la verdadera importancia y dificultad de escribir un brevísimo acápite sobre el contenido del proyecto, llega a nuestras mentes una infinidad de pensamientos difíciles de plasmarlos en unas pocas frases, por ende, al mencionar importancia, debemos reflejar los nombres de las personas e Instituciones que nos han prestado todas las facilidades en un trabajo que no decidieron comenzar pero si esperar resultados. Dificultad, porque resulta imposible agradecer a todas y cada una de las personas que dieron su especial aportación.

Queremos empezar agradeciendo a nuestra Alma Mater: la ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA, que nos abrió las puertas y a cambio nos ha pedido que le presentemos resultados positivos que enaltezcan la educación superior. En el trayecto de estas frases deseamos hacer ostensible nuestros infinitos agradecimientos a La Ilustre Municipalidad de Latacunga, de manera especial a la EPMAPAL, en la persona del economista Francisco Caicedo, quien nos prestó todas Las facilidades para que se haga posible la ejecución de la tesis.

Nuestros sentimientos justos y sinceros de agradecimiento vayan para nuestros distinguidos asesores los señores Ingenieros: David Rivas y Félix Manjarrés que participaron como guías de nuestro trabajo de tesis, sin su colaboración, no se hubiese podido llevar a cabo.

Por último queremos agradecer a nuestras familias y muy especialmente a nuestros padres, por el esfuerzo, la paciencia, el tesón y la confianza que han puesto en nuestra educación. Sin ellos nunca hubiéramos llegado a ser quienes somos, ni a estar donde estamos.

Nuestros más sinceros agradecimientos a todos.

ÍNDICE

PORTADA.....	i
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.	ii
CERTIFICACIÓN	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE	vii
RESUMEN	xviii
PRESENTACIÓN	xix

CAPITULO I..... 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....1

1.1 POTABILIZACIÓN DEL AGUA.....	1
1.1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.2 PROCESOS.....	1
1.1.3 POTABILIZACIÓN DEL AGUA.....	2
1.1.4 DESINFECCIÓN DEL AGUA.....	4
a. CLORACIÓN.....	5
1.1.5 IMPORTANCIA DEL MONITOREO DE LA CLORACIÓN.....	7
1.1.6 LÍMITE DE CLORO Y PH.....	8
1.1.7 NORMA INEN 1108.....	9
1.2 INSTRUMENTACIÓN EN SISTEMAS DE AGUA POTABLE.....	15
1.2.1 SENSOR.....	15
a. CARACTERÍSTICAS DE UN SENSOR.....	16
1.2.2 SENSOR DE CLORO.....	17
1.2.3 SENSOR DE PH.....	18
a. SENSORES ELECTROQUÍMICOS.....	19
b. SENSOR PH DE VIDRIO.....	20

c.	SENSORES ÓPTICOS.....	20
1.2.4	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE.....	20
a.	CONFORMACIÓN INTERNA DE UN PLC.....	21
b.	TIPOS DE PLC.....	23
c.	PROGRAMACIÓN DE UN PLC.....	23
d.	INSTRUCCIONES BÁSICAS DE PROGRAMACIÓN.....	25
1.2.5	SERVOVÁLVULAS.....	27
a.	CONTROL DE POSICIÓN.....	29
b.	CONTROL DE VELOCIDAD.....	29
c.	CONTROL DE FUERZA.....	29
d.	CAMPOS DE APLICACIÓN.....	31
1.3	CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO.....	32
1.3.1	INTRODUCCIÓN.....	32
1.3.2	CONTROL PROPORCIONAL.....	34
1.3.3	CONTROL INTEGRAL.....	35
1.3.4	CONTROL DERIVATIVO.....	37
1.3.5	SIGNIFICADO DE LAS CONSTANTES.....	38
1.3.6	APLICACIONES.....	39
1.4	COMUNICACIÓN INALÁMBRICA ZIGBEE.....	40
1.4.1	INTRODUCCIÓN.....	40
1.4.2	CÓMO FUNCIONA.....	41
1.4.3	CARACTERÍSTICAS DEL ZIGBEE.....	43
1.4.4	ARQUITECTURA.....	44
1.4.5	EMPAQUETAMIENTO Y DIRECCIONAMIENTO.....	46
1.4.6	ESTRATEGIAS DE CONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS EN UNA RED ZIGBEE.....	47
1.4.7	SEGURIDAD.....	49
a.	MODELO BÁSICO DE SEGURIDAD.....	49
b.	ARQUITECTURA DE SEGURIDAD.....	50
1.4.8	TIPOS DE DISPOSITIVOS.....	51
1.4.9	TOPOLOGÍA DE RED ZIGBEE.....	53

1.4.10	COMPARATIVAS ZIGBEE-BLUETOOTH-WLAN.....	54
1.4.11	APLICACIONES.....	55
1.5	TRANSCEPTOR.....	57
1.5.1	INTRODUCCIÓN.....	57
1.5.2	TIPOS DE TRANSCEPTORES.....	57
1.6	INTERFAZ HUMANO-MÁQUINA.....	58
1.6.1	INTRODUCCIÓN.....	58
1.6.2	FUNCIONES DE UN SOFTWARE HMI.....	59
1.6.3	TAREAS DE UN SOFTWARE DE SUPERVISIÓN Y CONTROL.....	60
1.6.4	TIPOS DE SOFTWARE DE SUPERVISIÓN Y CONTROL PARA PC.....	60
1.6.5	ESTRUCTURA GENERAL DE UN HMI.....	61
CAPÍTULO II.....		64
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....		64
2.1	ESPECIFICACIONES DE LOS REQUISITOS DEL SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DE CLORACIÓN EN FORMA REMOTA CON TECNOLOGÍA ZIGBEE.....	64
2.1.1	REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DE CLORACIÓN EN FORMA REMOTA CON TECNOLOGÍA ZIGBEE.....	64
2.2	DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CLORACIÓN DE AGUA CON TECNOLOGÍA ZIGBEE.....	65
2.3	SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	68
2.3.1	SENSOR DE PH S8000.....	68
a.	ESPECIFICACIONES DEL ELECTRODO.....	68
b.	ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS.....	68
c.	ESTRUCTURA.....	69
2.3.2	MÓDULO XBEE XBP24-DM.....	69
a.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	70

b.	DISTRIBUCIÓN DE PINES.....	70
2.3.3	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE XC3-24RT-E.....	71
a.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	72
2.3.4	MÓDULO DE EXPANSIÓN DE E/S ANÁLOGAS XC-E4AD2DA.....	72
a.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	73
2.3.5	SENSOR DE CLORO FCL410D.....	74
a.	ESPECIFICACIONES DEL ELECTRODO.....	74
b.	ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS.....	74
c.	FUNCIONAMIENTO.....	75
2.3.6	SERVOVÁLVULA PROPORCIONAL SD8203G002.....	76
a.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	76
2.3.7	BOMBA DE AGUA QB-70.....	77
a.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	77
b.	FUNCIONAMIENTO.....	78
2.3.8	VISUALIZADOR OP320S.....	78
a.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	79
2.3.9	PANEL SOLAR ZT5P.....	79
a.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	80
2.4	DISEÑO DE SISTEMAS.....	80
2.4.1	SISTEMA ELECTRÓNICO.....	80
a.	ACONDICIONAMIENTO DE VOLTAJE PARA LOS MÓDULOS XBEE.....	81
b.	CONVERTIDOR CORRIENTE (I) VOLTAJE (V).....	82
c.	REDUCTOR DE LOS NIVELES DE VOLTAJE DE LAS BATERÍAS.....	83
d.	CIRCUITO GENERAL REPETIDORES ESTACIÓN ERPM.....	85
e.	CIRCUITO GENERAL ESTACIÓN PH.....	86
f.	GENERADOR PWM PARA EL CONTROL DE LA SERVOVÁLVULA PROPORCIONAL.....	86
2.4.2	SISTEMAS DE COMUNICACIÓN.....	88
a.	COMUNICACIÓN XBEE-PLC.....	88
b.	COMUNICACIÓN REPETIDORES.....	89

2.5 IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE.....	89
2.6 IMPLEMENTACIÓN DE LA BOMBA DE AGUA.....	94
2.6.1 CÁLCULOS SELECCIÓN DE BOMBA.....	94
2.7 MANIPULACIÓN Y CONFIGURACIÓN MÓDULOS XBEE.....	98
2.7.1 CONFIGURACIÓN XBEE PRO.....	98
a. ENLACE DE COMUNICACIÓN.....	99
b. DIRECCIONAMIENTO DE LOS MÓDULOS.....	104
c. CONFIGURACIÓN COMO END DEVICE.....	105
d. CONFIGURACIÓN COMO ROUTER.....	107
e. CONFIGURACIÓN COMO COORDINADOR.....	108
f. VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN.....	109
g. POTENCIA DE TRANSMISIÓN.....	110
2.8 DISEÑO DE SOFTWARE.....	110
2.8.1 IMPLEMENTACIÓN RELOJ DEL SISTEMA.....	111
2.8.2 FORMATO DE COMUNICACIÓN LIBRE.....	111
2.8.3 ESTRUCTURA DEL PID.....	113
2.8.4 DIAGRAMAS DE FLUJO DEL SISTEMA.....	115
2.9 DISEÑO HMI.....	121
CAPITULO III.....	123
PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	123
3.1 GENERALIDADES.....	123
3.2 PRUEBAS DE COMUNICACIÓN.....	123
3.2.1 PRUEBAS DE COMUNICACIÓN MÓDULOS XBEE.....	123
3.2.2 PRUEBAS DE COMUNICACIÓN XBEE-PLC.....	124
3.2.3 ANÁLISIS DE LA TRAMA DE DATOS.....	127
3.3 PRUEBAS RELOJ DEL SISTEMA.....	129

3.4 MEDICIÓN DE VARIABLES.....	130
3.4.1 MEDICIÓN DE CLORO.....	130
3.4.2 MEDICIÓN DE PH.....	131
3.4.3 MEDICIÓN NIVELES DE BATERÍAS.....	132
3.5 PRUEBAS PID.....	132
3.5.1 DETECCIÓN DE VARIACIÓN DE CLORO.....	132
3.5.2 SALIDA DEL PID.....	135
3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	137
3.6.1 NIVEL DE CLORO.....	137
3.6.2 NIVEL DE PH.....	141
3.6.3 NIVEL DE BATERÍAS.....	143
CAPÍTULO IV.....	149
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	149
4.1 CONCLUSIONES.....	149
4.2 RECOMENDACIONES.....	151
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152
GLOSARIO.....	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de bloques de un proceso de potabilización de agua.....	2
Figura 1.2: Sensor de Cloro.....	17
Figura 1.3: Respuesta del PH en función del HCL.....	18
Figura 1.4: PLC.....	21
Figura 1.5: Lenguaje de Programación PLC.....	25
Figura 1.6: Diferencia de caudal en orificios redondos y rectangulares.....	27
Figura 1.7: Servocontrol en reposo.....	28
Figura 1.8: Servocontrol activado.....	29
Figura 1.9: Servoválvula en reposo (todas las vías cerradas).....	30
Figura 1.10: Servoválvula activada.....	31
Figura 1.11: Diagrama en bloques de un control PID.....	32
Figura 1.12: Control proporcional.....	34
Figura 1.13: Control Integral.....	36
Figura 1.14: Control derivativo.....	37
Figura 1.15: Estructura de canales ZigBee.....	42
Figura 1.16: Capas que conforman la pila de protocolos para ZigBee.....	44
Figura 1.17: Campos de los cuatro tipos de paquetes básicos de ZigBee.....	46
Figura 1.18: Diferentes topologías de red disponibles en ZigBee.....	53
Figura 1.19: Aplicaciones de Zigbee.....	56
Figura 1.20: Interfaz Humano Máquina.....	58
Figura 1.21: Funcionamiento de programas y archivos.....	61
Figura 1.22: Bloques estructurados en cadenas para procesar una señal.....	63
Figura 2.1: Diagrama de Bloques del Sistema.....	67
Figura 2.2: Sensor de PH.....	69
Figura 2.3: Distribución de Pines módulo Xbee.....	70
Figura 2.4: PLC XINJE XC3-24RT-E.....	71
Figura 2.5: Módulos de E/S Análogas.....	73
Figura 2.6: Sensor de Cloro.....	75
Figura 2.6: Servoválvula SD8203G002.....	76

Figura 2.7: Bomba periférica QB70.....	78
Figura 2.8: Visualizador OP320S.....	78
Figura 2.9: Panel Solar ZT5P.....	79
Figura 2.10: Circuito alimentación módulos xbee.....	81
Figura 2.11: Circuito convertidor de corriente a tensión.....	82
Figura 2.12: Circuito conversor corriente tensión sensor de PH.....	83
Figura 2.13: Circuito Reductor de Tensión Estación ERPM.....	84
Figura 2.14: Circuito Reductor de Tensión Estación PH.....	85
Figura 2.15: Circuito General Repetidores.....	85
Figura 2.16 Circuito General Estación PH.....	86
Figura 2.17: Acondicionamiento señal de I/V servoválvulas.....	87
Figura 2.18: Generador de PWM.....	88
Figura 2.19: Placa Estación Repetidora.....	90
Figura 2.20: Placa Estación PH.....	90
Figura 2.21: Placa Control Servoválvula.....	90
Figura 2.22: Placa Repetidores Acoplamiento de Elementos.....	91
Figura 2.23: Placa Estación PH Acoplamiento de Elementos.....	91
Figura 2.24: Placa Control Servoválvulas Acoplamiento de Elementos.....	91
Figura 2.25 Montaje Componentes Caja Repetidores.....	92
Figura 2.26: Montaje Componentes Caja Estación PH.....	92
Figura 2.27: Módulos Terminados.....	92
Figura 2.28: Caja Controlador Lógico Programable.....	93
Figura 2.29: Caja Sensor de cloro.....	93
Figura 2.30: Ventana de reconocimiento módulo Xbee.....	98
Figura 2.31: Ventana de comunicación.....	99
Figura 2.32: Verificación de la Comunicación entre las Estaciones.....	101
Figura 2.33: Enlace de Comunicación entre Estación PH y ERPM1.....	102
Figura 2.34: Enlace de Comunicación entre Estación ERPM 1 y ERPM 2.....	102
Figura 2.35: Enlace de Comunicación entre Estación ERPM 2 y El calzado.....	103
Figura 2.36: Transmisión de Datos módulos xbee.....	104
Figura 2.37: Direcciones Destino de los módulos xbee routers y end device.....	104

Figura 2.38: Direccionamiento y configuración del módulo con End Device.....	105
Figura 2.39: Habilitación modo API y entradas D0 y D1 como ADC.....	106
Figura 2.40 Configuración del módulo como Router.....	107
Figura 2.41: Configuración del módulo como Coordinador.....	108
Figura 2.42: Configuración Velocidad de Transmisión.....	109
Figura 2.43: Configuración Potencia de Transmisión.....	110
Figura 2.44: Acceso a la configuración de modo de comunicación libre.....	111
Figura 2.45: Configuración parámetros de recepción de datos.....	112
Figura 2.46: Colocación Marca Especial y longitud de la trama.....	112
Figura 2.47: Diagrama de control PID.....	113
Figura 2.48: Selección PID.....	114
Figura 2.49: Configuración PID.....	115
Figura 2.50: Diagrama de Flujo funcionamiento Horas Exactas.....	116
Figura 2.51: Diagrama de Flujo Tiempo de Recopilación de datos del Sensor de Cloro.....	117
Figura 2.52: Diagrama de Flujo Set point y limites de ppm cloro.....	118
Figura 2.53: Diagrama de Flujo Nivel de Baterías Estación PH.....	119
Figura 2.54: Diagrama de Flujo Nivel de Baterías Estaciones Repetidoras.....	119
Figura 2.55: Diagrama de Flujo Control datos módulos xbee.....	120
Figura 2.56: Pantalla de Inicio.....	121
Figura 2.57: Diagrama de Flujo Funcionamiento HMI.....	122
Figura 3.1: Trama de datos enviados.....	124
Figura 3.2: Parámetros de Comunicación.....	125
Figura 3.3: Formato de comunicación libre del PLC.....	125
Figura 3.4: Configuración de comunicación libre del PLC.....	126
Figura 3.5: Recepción de datos habilitado.....	126
Figura 3.6: Registro de datos xbee.....	127
Figura 3.7: Reloj del Sistema de Cloración.....	130
Figura 3.8: Medición acondicionamiento de señal.....	132
Figura 3.9: Tiempo de Reacción del Sensor de Cloro Lecturas Incrementales...	133

Figura 3.10: Tiempo de Reacción del Sensor de Cloro Lecturas Decrementales.....	134
Figura 3.11: Entrada PID.....	137
Figura 3.12: Comparación de medidas entre el colorímetro y sensor de cloro...	139
Figura 3.13: Comparación Sistemas de Dosificación.....	141
Figura 3.14: Niveles de alcalinidad del Agua.....	143
Figura 3.15: Niveles de baterías estación PH.....	145
Figura 3.16: Nivel de baterías repetidor ERPM1	147
Figura 3.17: Nivel de baterías repetidor ERPM 2.....	147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Agentes Potencialmente Infecciosos Presentes en el Agua.....	6
Tabla 1.2: Límites de cloro residual y alcalinidad según la norma INEN1108.....	9
Tabla 1.3: Propiedades del IEEE 802.15.4 ZigBee.....	41
Tabla 1.4: Comparativas Zigbee – Bluetooth – WLAN.....	54
Tabla2.1 Descripción de Pines necesarios para el funcionamiento.....	70
Tabla2.2 Características técnicas módulo de Expansión E/S análogas.....	73
Tabla2.3 Características técnicas módulo de Expansión E/S análogas.....	76
Tabla2.4 Características técnicas Bomba QB-70.....	77
Tabla2.5 Características OP320S.....	79
Tabla2.6 Características Panel Solar ZT5P.....	80
Tabla2.7 Coordenadas de latitud y longitud para Ubicación de Estaciones.....	100
Tabla3.1 Trama de datos módulos xbee repetidores.....	128
Tabla3.2 Trama de datos módulo xbee PH.....	129
Tabla3.3 Datos sensor de Cloro.....	130
Tabla3.4 Tiempo de Reacción Sensor de Cloro.....	133
Tabla3.5 Entrada retroalimentación.....	136
Tabla3.6 PPM de cloro residual.....	138
Tabla3.7 Resultados del sistema de cloración.....	140
Tabla3.8 Niveles de PH.....	142
Tabla 3.9 Niveles de PH.....	144
Tabla 3.10 Niveles de baterías estación ERPM.....	146

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SENSOR DE CLORO

- ANEXO B ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SENSOR DE PH S8000

- ANEXO C ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SERVOVÁLVULA

- ANEXO D ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MÓDULO XBEE XBP24-DM
 - ANEXOS D1 DISTRIBUCIÓN DE PINES MÓDULO XBEE.
 - ANEXOS D2 RECEPCIÓN DE LA TRAMA MÓDULO XBEE.
 - ANEXOS D3 DESENCRIPTACIÓN TRAMA MÓDULO XBEE.
 - ANEXOS D4 CONFIGURACIÓN MÓDULO XBEE COMO CORDINADOR

- ANEXO E ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PANEL SOLAR ZT5P.

- ANEXO F DISTRIBUCIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS PLC XC3-24RT
 - ANEXO F1 DESCRIPCIÓN DE PARTES PLC XC3-24RT-E
 - ANEXO F2 CONEXIÓN DE ENTRADAS PLC XC3-24RT-E
 - ANEXO F3 CONEXIÓN DE SALIDAS PLC XC3-24RT-E
 - ANEXO F4 MARCAS ESPECIALES PLC XC3-24RT-E

- ANEXO G MÓDULO DE EXPANSIÓN DE E/S ANÁLOGAS
 - ANEXO G1 DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ENTRADAS ANÁLOGAS MÓDULO XC-E4AD2DA.

ANEXO G2 DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN SALIDAS
ANÁLOGAS MÓDULO XC-E4AD2DA

ANEXO H PROGRAMA PLC SISTEMA DE CLORACIÓN

ANEXO I TABLAS SELECCIÓN DE BOMBAS

ANEXO I1 TABLAS PROPIEDADES DEL AGUAY OTROS LÍQUIDOS.

ANEXO I2 DIMENSIONES DE TUBERÍAS.

ANEXO J MANUAL DE MANTENIMIENTO Y OPERACIONES.

ANEXO K ESQUEMA DE CONTROL.

ANEXO L INSTALACIÓN DE SISTEMA DE CAPTACIÓN Y BOMBA.

ANEXO M PANEL DE CONTROL.

ANEXO N CAJAS REPETIDORES.

ANEXO O INSTALACIÓN ESTACIÓN EL CALZADO.

ANEXO P INSTALACIÓN REPETIDORES.

RESUMEN

En las últimas décadas el desarrollo tecnológico a llevado a la ciudadanía a mejorar todo a su alrededor: tanto en el campo empresarial, como en el campo domiciliario, es así que, mediante la automatización se quiere facilitar la vida de los seres vivos.

La presente tesis consiste en la **“Implementación de un sistema de control y monitoreo de cloración de agua en forma remota mediante tecnología zigbee para la planta de potabilización “El calzado” de la EPMAPAL”**.

El sistema está diseñado para tener niveles de cloro residual estables y aptos para el consumo humano mediante un monitoreo constante durante las veinte y cuatro horas del día. El proyecto consta de un sensor de cloro alimentado mediante un sistema hidráulico, mismo que consta de una bomba para dotar al sensor de cloro de agua mezclada con cloro residual que permite determinar los niveles de cloro que está siendo enviados hacia la red y, a la vez establecer los datos de la variable de entrada hacia el control PID que regula la dosificación de cloro mediante el uso de una servoválvula proporcional. Se desea saber las pérdidas de cloro residual en la tubería causadas por las impurezas; para ello se instaló un sensor de PH en la tubería de llegada a la urbanización La Hacienda ubicada a dos kilómetros de distancia de la planta de potabilización. Nos basamos en la tecnología zigbee que envía los datos de PH desde la urbanización por medio de estaciones repetidoras que facilitan la retransmisión de la información. Las estaciones repetidoras no poseen alimentación eléctrica propia por lo que nos ayudamos de paneles de energía solar y baterías de doce voltios para que posean un suministro de energía permanente.

Para realizar el control de cada una de las variables y datos del PID nos basamos en un PLC que asista y regule cada una de las funciones del sistema.

PRESENTACIÓN

En el presente proyecto se desarrolla un sistema de control y monitoreo de cloración de agua en forma remota mediante tecnología zigbee para la planta de potabilización “El Calzado” de la EPMAPAL, dicho sistema permite la dosificación de cloración de agua de manera permanente y la detección de pérdidas en la tubería de manera remota.

El Capítulo I contiene información de los elementos utilizados en el sistema de cloración, así como los pasos a seguir para una purificación de agua en base a la norma INEN 1108 que estandariza los niveles de cloro permisibles para el consumo humano, además se puede observar detalles de la comunicación zigbee, lazos de control PID y diseño de interfaz humano máquina, es decir en este capítulo se observa los materiales y recursos necesarios para la implementación del sistema de cloración.

El Capítulo II detalla la selección de materiales del sistema de cloración, así como también el diseño y la implementación de cada uno de los circuitos requeridos para el acondicionamiento de señales a los módulos xbee, tarjeta generadora del PWM y sensores, además la configuración de cada uno de los módulos xbee incluyendo el lugar de su ubicación.

El Capítulo III presenta las pruebas efectuadas en cada uno de los componentes que intervienen en el sistema para analizar los resultados, eliminar posibles fallas y optimizar su correcto funcionamiento.

El Capítulo IV presenta las conclusiones y recomendaciones del proyecto, mismas que permitirán realizar posibles mejoras al sistema.

Se incluyen anexos y referencias bibliográficas para validar el proyecto realizado.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 POTABILIZACIÓN DEL AGUA

1.1.1 INTRODUCCIÓN

El agua es el elemento vital de mayor importancia en nuestro planeta y resulta ser el componente primordial para el desenvolvimiento diario de los seres humanos. Es un preciado recurso de la madre naturaleza, que en algunos casos se encuentra con la pureza que la vuelve apta para su consumo pero debido al incremento de las fuentes contaminantes y agentes externos muchas de las veces es necesario procesarla antes de beberla.

Para la actividad humana es necesario utilizar el agua para numerosos fines, por ello la importancia de su potabilización. Por tanto, el hombre se sirve del agua existente en la naturaleza para consumirla y utilizarla, pero es evidente que debido a determinadas características químicas, físicas y biológicas del agua, ésta no puede ser utilizada de forma directa, y es por ello que el agua requerirá de una serie de correcciones y tratamientos que eliminen aquellas partículas o sustancias perjudiciales para el hombre.

1.1.2 PROCESOS

Las aguas son sometidas a un conjunto de operaciones y tratamientos para que sean aptas para el consumo humano o para determinadas aplicaciones industriales.

El agua suministrada al público debe estar libre de impurezas. Todas estas impurezas deben reducirse a cantidades seguras, antes de que el agua sea enviada a las casas y fábricas. Los tratamientos empleados para reducir las impurezas pueden ser de naturaleza física, química o bacteriológica.

1.1.3 POTABILIZACIÓN DEL AGUA

La potabilización del agua generalmente incluye los siguientes procesos: Captación, Conducción, Sedimentación, Coagulación, Ablandamiento, Eliminación de hierro y manganeso, Eliminación de olor y sabor, Filtrado Aireación, Control de corrosión, Evaporación y Desinfección.

- **CAPTACIÓN.-** La captación de aguas superficiales se realiza por medio de tomas de agua que se hacen en los ríos, diques o napas subterráneas. El agua proveniente de ríos está expuesta a la incorporación de materiales y microorganismos requiriendo un proceso más complejo para su tratamiento. La turbiedad, el contenido mineral y el grado de contaminación varían según la época del año. La captación de aguas subterráneas se efectúa por medio de pozos de bombeo o perforaciones.
- **CONDUCCIÓN.-** Desde la toma de agua del río hasta los presedimentadores, el agua se conduce por medio de canales abiertos o simplemente cañerías.
- **SEDIMENTACION.-** Es el asentamiento por gravedad de las partículas sólidas contenidas en el agua. Se realiza en depósitos anchos y de poca profundidad. La sedimentación puede ser simple o secundaria. La simple se emplea para eliminar los sólidos más pesados sin necesidad de tratamiento especial mientras mayor sea el tiempo de reposo, mayor será el asentamiento y consecuentemente la turbiedad será menor haciendo el agua más transparente. El reposo prolongado natural también ayuda a mejorar la calidad del agua debido a la acción del aire y los rayos solares; mejor sabor y el olor, oxida el hierro y elimina algunas sustancias.
- **FILTRACIÓN.-** Se emplea para obtener una mayor clarificación y generalmente se aplica después de la sedimentación. Hay muchos tipos de

filtros con características que varían de acuerdo con su empleo. La filtración más usual se realiza con un lecho arenoso. En esta capa actúan bacterias inofensivas que descomponen la materia orgánica presente en el agua en sustancias inorgánicas inocuas.

- **AIREACIÓN.-** Se efectúa haciendo caer el agua sobre una cascada para incrementar la proporción de oxígeno disuelto en el agua. Se reduce de este modo el contenido de dióxido de carbono hasta un 60% y mejora la purificación con bacteria aeróbicas.
- **MÉTODOS QUÍMICOS¹.-** El tratamiento corrector químico se refiere a la corrección del pH del agua, a la reducción de la dureza, a la eliminación de los elementos nocivos o al agregado de ciertos productos químicos, buscando siempre mejorar la calidad del agua
- **LA CORRECCIÓN DEL PH.-** Puede hacerse agregando cal o carbonato de sodio, antes o después de la filtración. La reducción de la dureza, puede hacerse por métodos simples (cal, soda, Zeolita o resinas) o métodos compuestos (cal-soda; cal zeolita, cal-resinas).
- **OZONO.-** Es un oxidante poderoso. No deja olor pero sí sabor, aunque no desagradable. Es difícil regular su aplicación. No tiene acción residual.
- **YODO.-** Muy buen desinfectante, necesita un tiempo de contacto de media hora. Es muy costoso para emplearse en abastecimientos públicos.
- **PLATA. -**En forma coloidal o iónica es bastante efectiva; no da sabor ni olor al agua, tiene una acción residual muy conveniente. Su efectividad

¹www.construsur.com.ar/News-sid-109-file-article-pageid-1.htm

disminuye con la presencia de ciertas sustancias, como cloruros, que se encuentran a veces en exceso en el agua.

- **CLORO.** El cloro es efectivamente el elemento más importante que existe para la desinfección del agua. Se suele usar en una dosis de 0,0001% que destruye todos los microbios en cuatro minutos. Además se usa para: eliminar olores y sabores, decolorar, ayudar a evitar la formación de algas, ayudar a quitar el hierro y manganeso, ayudar a la coagulación de materias orgánicas.

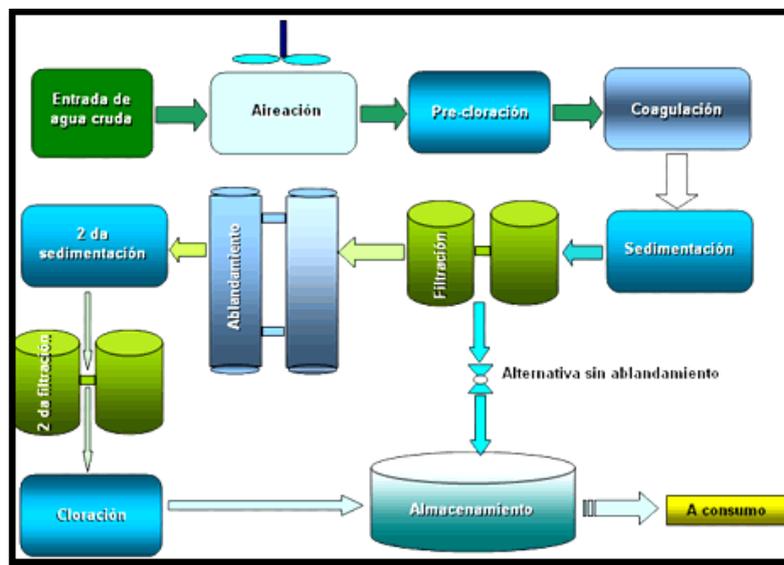


Figura 1.1: Diagrama de bloques de un proceso de potabilización de agua.

1.1.4 DESINFECCIÓN DEL AGUA²

La desinfección del agua para uso humano tiene por finalidad la eliminación de los microorganismos patógenos contenidos en el agua que no han sido eliminados

² www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/historia/historia-desinfeccion-agua.htm
 Center for Disease Control and Prevention (CDC). 1999. Achievements in Public Health, 1900-1999: Control of Infectious Diseases. CDC, Atlanta, EE.UU., Morbidity and Mortality Weekly Report, 30 de julio, 1999

en las fases iniciales del tratamiento del agua, siendo necesaria como uno de los últimos pasos en la planta de tratamiento de agua potable, para prevenir que esta sea dañina para nuestra salud. Muchas veces, tratándose de agua de manantiales naturales o de pozo, la desinfección es el único tratamiento que se le da al agua para obtener agua potable.

- a. CLORACIÓN.-** El cloro es una opción de tratamiento de bajo costo que se utiliza para mejorar el sabor y la claridad del agua a la vez que se eliminan muchos microorganismos como bacterias y virus. Sin embargo, el proceso tiene sus limitaciones, Giardia y Criptosporidium son usualmente resistentes al cloro a menos que éste se use en dosis más elevadas que aquéllas preferidas usualmente para el tratamiento. El cloro elimina además sustancias como el manganeso, hierro y ácido sulfhídrico, el cual puede alterar el sabor del agua.

VENTAJAS

- En la actualidad la cloración es más eficiente en términos de costo que la radiación UV o la desinfección con ozono.
- El cloro residual que permanece en el efluente del agua residual puede prolongar el efecto de desinfección aún después del tratamiento inicial, y puede ser medido para evaluar su efectividad.
- La desinfección con cloro es confiable y efectiva para un amplio espectro de organismos patógenos.
- El cloro es efectivo en la oxidación de ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos.
- La cloración permite un control flexible de la dosificación.
- El cloro puede eliminar ciertos olores molestos durante la desinfección.
- La cloración en el agua potable elimina micro partículas presentes en las vertientes de agua potable para que sea apta para el consumo humano.

Tabla 1.1: Agentes Potencialmente Infecciosos Presentes en el Agua.

Organismo - Bacterias	Enfermedad Causada
Escherichia coli	Gastroenteritis
Leptospira (spp.)	Leptospirosis
Salmonella typhi	Fiebre tifoidea
Salmonella (2,100 serotipos)	Salmonelosis
Shigella (4 spp.)	Shigelosis (disentería bacilar)
Vibrio cholerae	Cólera
Balantidium coli	Balantidiasis
Cryptosporidium parvum	Cryptosporidiasis
Entamoeba histolytica	Amebiasis (disentería amoébrica)
Giardia lamblia	Giardiasis
Helmintos	
Ascaris lumbricoides	Ascariasis
T. solium	Teniasis
Trichuris trichiura	Tricuriasis
Virus	
Virus entéricos (72 tipos, por ejemplo los virus echo y coxsackie del polio)	Gastroenteritis, anomalías del corazón y meningitis.
Hepatitis A	Hepatitis de tipo infeccioso
Agente de Norwalk	Gastroenteritis
Rotavirus	Gastroenteritis

DESVENTAJAS

- Todas las formas de cloro son muy corrosivas y tóxicas. Como consecuencia, el almacenamiento, el transporte y el manejo presentan riesgos cuya prevención requiere normas más exigentes de seguridad industrial.
- El cloro oxida ciertos tipos de materiales orgánicos del agua residual generando compuestos más peligrosos.
- El nivel total de sólidos disueltos se incrementa en el agua efluente.
- El cloro residual es inestable en presencia de altas concentraciones de materiales con demanda de cloro, por lo cual pueden requerirse mayores dosis para lograr una desinfección adecuada.
- Algunas especies parásitas han mostrado resistencia a dosis bajas de cloro, incluyendo los oocistos de *Cryptosporidium parvum*, los quistes de *Entamoeba histolytica* y *Giardia lamblia*, y los huevos de gusanos parásitos.

1.1.5 IMPORTANCIA DEL MONITOREO DE LA CLORACIÓN

Las estadísticas de la Organización Mundial de la Salud muestran que cada año mueren en el mundo más de tres millones de niños menores de cinco años víctimas de enteritis, causadas por beber agua en mal estado que no ha sido tratada.

Desde hace muchos años el cloro, el hipoclorito de sodio, y el dióxido de cloro, son las sustancias que se usan para la cloración. Este método es el único que garantiza que el agua potable llegue hasta los grifos de las casas en perfectas condiciones. La cloración impide además que proliferen las algas y los hongos en el interior de los tubos de suministro y en los depósitos de almacenamiento.

Por lo contrario al potabilizar el agua con un exceso de cloro las personas pueden estar induciendo en enfermedades de alto riesgo como el cáncer pues está científicamente comprobado que el exceso de cloro en el agua ocasiona cáncer de hígado, estomago, riñón, colon, recto, así también como enfermedades del corazón, anemia, presión alta, y alergias. El agua con exceso de cloro tiene compuestos carcinógenos estos químicos son conocidos como órganos clorados y se acumulan en el tejido adiposo del cuerpo destruye las proteínas en el cuerpo humano causando efectos en la piel y el cabello, compromete el equilibrio de la flora intestinal, acné, seborrea, piorrea entre otras.

Debido a estas consecuencias se ha comprobado que el cloro es beneficioso para la desinfección del agua y para el consumo humano siempre y cuando se mantenga entre los límites permisibles por lo que es importante revisar frecuentemente el cloro residual en el sitio de entrega al público más cercano al punto de cloración, para verificar que los niveles de cloro estén dentro de los límites establecidos.

1.1.6 LÍMITES DE CLORO Y PH

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radioactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor.

El control de alcalinidad, pH y cloro es determinante para tener un agua de buena calidad. Tener estos valores dentro de los límites sugeridos significa que el agua está en balance. Un agua balanceada y un buen sistema de filtración y limpieza garantizan un agua segura y de excelente calidad para comodidad y agrado de los usuarios.

Por tales razones la Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de la Ciudad de Latacunga (EPMAPAL), se apega la Norma del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) 1108, con la finalidad de establecer un eficaz control sanitario del agua que se somete a tratamientos de potabilización a efecto de hacerla apta para uso y consumo humano, acorde a las necesidades actuales.

1.1.7 NORMA INEN 1108

Esta norma establece los requisitos indispensables que debe cumplir una empresa de potabilización de agua para entregar líquido apto para el consumo humano sistemas de abastecimiento públicos y privados a través de redes de distribución y tanqueros.

Tabla 1.2: Límites de cloro residual y alcalinidad según la norma INEN1108.

PARAMETRO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		
Color	Unidades de color verdadero (UTC)	5
Turbiedad	NTU	no objetable
Olor	--	no objetable
Sabor	--	
Ph	--	6,5 - 8,5
Sólidos totales disueltos	mg/l	1 000

INORGÁNICOS		
Aluminio, Al	mg/l	0,25
Amonio, (N-NH3)	mg/l	1,0
Antimonio, Sb	mg/l	0,005
Arsénico, As	mg/l	0,01
Bario, Ba	mg/l	0,7
Boro, B	mg/l	0,3
Cadmio, Cd	mg/l	0,003
Cianuros, CN	mg/l	0,0
Cloro libre residual*	mg/l	0,3 – 1,5
Cloruros, Cl	mg/l	250
Cobalto, Co	mg/l	0,2
Cobre, Cu	mg/l	1,0
Cromo, Cr (cromo hexavalente)	mg/l	0,05
Dureza total, CaCO3	mg/l	300
Estaño, Sn	mg/l	0,1
Flúor, F	mg/l	1,5
Fósforo, (P-PO4)	mg/l	0,1
Hierro, Fe	mg/l	0,3
Litio, Li	mg/l	0,2

Níquel, Ni	mg/l	0,02
Nitratos, N-NO3	mg/l	10
Nitritos, N-NO2	mg/l	0,0
Plata, Ag	mg/l	0,05
Plomo, Pb	mg/l	0,01
Potasio, K	mg/l	20
Selenio, Se	mg/l	0,01
Sodio, Na	mg/l	200
Sulfatos, SO4	mg/l	200
Vanadio, V	mg/l	6
Zinc, Zn	mg/l	3
RADIATIVOS		
Radiación total **	Bq/l	0,1
Radiación total ***	Bq/l	1,0
* Cuando se utiliza cloro como desinfectante y luego de un tiempo mínimo de contacto de 30 minutos		
** Corresponde a la radiación emitida por los siguientes radionucleidos: 210Po, 224Ra, 226Ra, 232Th, 234U, 238U, 239Pu		
ORGÁNICOS		
Tensoactivos ABS (MBAS)	mg/l	0,0
Fenoles	mg/l	0,0

SUSTANCIAS ORGÁNICAS	Límite máximo µg/l
- tetracloruro de carbono	2
- diclorometano	20
- 1,2dicloroetano	30
- 1,1,1-tricloroetano	2000
- cloruro de vinilo	5
- 1,1dicloroetano	30
- 1,2dicloroetano	50
- tricloroetano	70
- tetracloroetano	40
HIDROCARBUROS AROMÁTICOS	Límite máximo µg/l
- benceno	10
- tolueno	170
- xileno	500
- etilbenceno	200
- estireno	20
Hidrocarburos totales de petróleo (HTP)	0,3
- benzo [a]pireno	0,01
- benzo [a]fluoranteno	0,03
- benzo [k]fluoranteno	0,03

- benzo [ghi]pirileno	0,03
- indeno [1,2,3-cd]pireno	0,03
- monoclorobenceno	300
- 1,2-diclorobenceno	1000
- 1,4-diclorobenceno	300
- triclorobencenos (total)	20
di(2-etilhexil) adipato	80
di(2-etilhexil) ftalato	8
acrylamida	0,5
epiclorohidrin	0,4
Ácido etilendiaminatetracético EDTA	200
ácido nitrotriacético	200
óxido tributiltin	2
PESTICIDAS	Límite máximo µg/l
Isoproturon	2
Lindano	2
Ácido 4-cloro-2-metilfenoxiacético MCPA	10
Metoxyclo	6
Molinato	20
Pentaclorofenol	20

Permetrin	20
Propanil	100
Piridato	2
Simazina	20
Trifluralin	90
Ácido 4-cloro-2-metilfenoxibutírico MCPB	10
Mecoprop	9
2,4,5-T	2
RESIDUOS DE DESINFECTANTES	Límite máximo µg/l
Monocloramina, di- y tricloramina	3
Cloro	5
SUBPRODUCTOS DE DESINFECCIÓN	Límite máximo µg/l
Bromato	25
Clorito	200
- 2,4,6-triclorofenol	200
Formaldeído	900
- bromoformo	100
- diclorometano	100
- bromodiclorometano	60
- cloroformo	200

- ácido dicloroacético	50
- ácido tricloroacético	100
- tricloroacetaldeído	10
- dicloroacetoniitrilo	90
- dibromoacetoniitrilo	100
- tricloroacetoniitrilo	1
Cianógeno clorado (como CN)	70
REQUISITOS MICROBIOLÓGICOS	Máximo
Coliformes totales (1)NMP/100ml	< 2 *
Coliformes Fecales NMP/100ml	< 2 *

1.2 INSTRUMENTACIÓN EN ES SISTEMA DE AGUA POTABLE

1.2.1 SENSOR³

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc. Una magnitud eléctrica puede ser una resistencia eléctrica, una capacidad eléctrica, una corriente eléctrica, etc.

Un sensor diferencia de un transductor en que el sensor está siempre en contacto con la variable de instrumentación con lo que puede decirse también que es un

³ Ramón Pallás Areny. (2003). Sensores y Acondicionadores de Señal (4ª Ed.). Gran vía de los Corts Catalanes. Barcelona España. MARCOMBO.

dispositivo que aprovecha una de sus propiedades con el fin de adaptar la señal que mide para que la pueda interpretar otro dispositivo. Un sensor también puede decirse que es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra. Los sensores pueden estar conectados a un computador para obtener ventajas como son el acceso a una base de datos, la toma de valores desde el sensor.

a. CARACTERÍSTICAS DE UN SENSOR

- Rango de medida: dominio en la magnitud medida en el que puede aplicarse el sensor.
- Precisión: es el error de medida máximo esperado.
- Offset o desviación de cero: valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula. Si el rango de medida no llega a valores nulos de la variable de entrada, habitualmente se establece otro punto de referencia para definir el offset.
- Linealidad o correlación lineal.
- Sensibilidad de un sensor: es la variación de la magnitud de entrada.
- Resolución: mínima variación de la magnitud de entrada que puede apreciarse a la salida.
- Rapidez de respuesta: puede ser un tiempo fijo o depender de cuánto varíe la magnitud a medir. Depende de la capacidad del sistema para seguir las variaciones de la magnitud de entrada.
- Derivas: son otras magnitudes, aparte de la medida como magnitud de entrada, que influyen en la variable de salida.
- Repetibilidad: error esperado al repetir varias veces la misma medida.

Por lo general, la señal de salida de estos sensores no es apta para su lectura directa y a veces tampoco para su procesado, por lo que se usa un circuito de acondicionamiento de señales.

1.2.2 SENSOR DE CLORO⁴

Diseñado específicamente para determinar el nivel residual de cloro inorgánico en el agua, el Sensor de cloro utiliza una reacción electroquímica, facilitando así las tareas de instalación y mantenimiento.

Al tratarse de un sensor abierto puede ser usado en aplicaciones a presión y con sólidos en suspensión. Se desempeña en aplicaciones de Desinfección de agua potable, Procesos industriales, Torres de refrigeración, Reutilización de aguas residuales.

El análisis consiste en la medida de la intensidad de corriente generada en la reacción de reducción u oxidación de un analito al aplicar un potencial eléctrico adecuado.



Figura 1.2: Sensor de Cloro

En el caso del análisis de cloro libre, la intensidad de corriente es proporcional a la cantidad de ácido hipocloroso presente en la solución.

La reducción del cloro tiene lugar en el electrodo de trabajo, en el que se está aplicando el potencial adecuado a partir de la lectura de electrodo de referencia. El circuito eléctrico para la lectura de la intensidad se cierra con un electrodo auxiliar.

⁴ www.itc.es/pdf/Manuals/44CL-Es.pdf

Finalmente, como que las intensidades de corriente generadas son muy bajas, con el fin de mantener una señal lo más estable posible se incluye un cuarto electrodo, actúa como toma de tierra para eliminar cualquier corriente residual que pueda hallarse presente en el agua.

Conviene tener en cuenta que el ácido hipocloroso es un ácido débil y como tal, la distribución de sus especies depende del pH del medio. Al potencial de trabajo del sensor amperométrico no sólo da respuesta el ácido hipocloroso, sino que también el hipoclorito reacciona. Por este motivo es fundamental realizar una compensación de la respuesta del sensor en función del valor de pH en el medio.

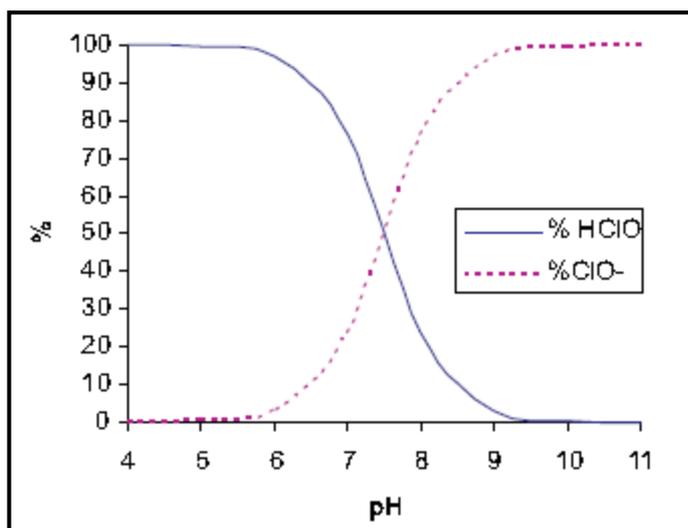


Figura 1.3: Respuesta del PH en función del HCL.

1.2.3 SENSOR DE PH

Las tecnologías disponibles para la medición de pH pueden clasificarse en dos grandes grupos: Electroquímicos y Ópticos.

a. SENSORES ELECTROQUÍMICOS

Son aquellos que utilizan dispositivos que transducen la actividad química del ión de hidrógeno en una señal eléctrica. En esta categoría se destacan aquellos sensores que cuentan con Electroodos de Ion Selectivo (ISE): de vidrio, de membrana líquida y de metal-óxido. Una sección aparte merecen los ISFET (Ion Selective Field Effect Transistor).

Los ISE pueden pensarse como una “celda electroquímica”, donde uno de sus electrodos es la referencia y el otro se inserta en la solución a la cual se le quiere medir el pH. Este segundo electrodo cuenta con una membrana, que para el caso del pH, es sensible al ión hidrógeno. Como cualquier celda electroquímica, entre los electrodos se genera una diferencia de potencial según la ecuación de Nernst, que es lo que efectivamente se mide y que está relacionada directamente con la medida de pH de la solución.

El modelo de sensor, basado en el electrodo de vidrio formando parte de una celda electroquímica, es el más ampliamente difundido. Debido a la complejidad del funcionamiento de otros dispositivos que miden los niveles de alcalinidad de agua en base a otras funciones especificadas se deja de precedente que trabajan basados en la ecuación de Boltzman que parecerían modelar de forma más adecuada el funcionamiento del sensor.

En la realización de estudios prologados, la deriva de los sensores es el parámetro más relevante. Como la característica pH-Voltaje va variando con el tiempo es necesario calibrar, y por lo tanto suspender el estudio, para mantener las medidas dentro de un precisión aceptable.

b. SENSOR PH DE VIDRIO

Es un estándar a nivel industrial y de laboratorio. Su principio de funcionamiento se conoce desde principios de siglo XX y su uso está ampliamente generalizado y sus resultados ampliamente validados, al punto que el patrón de la medida de pH se basa en un electrodo de vidrio. El electrodo entra en contacto con el analito a través de una membrana de vidrio sensible al ión hidrógeno. Las características de esta membrana hacen que el sensor tenga una resistencia de salida muy grande (decenas o centenas de $M\Omega$) y sea necesario mantenerlo húmedo. Logran una precisión muy buena y tienen tiempos de vidas relativamente cortos.

c. SENSORES ÓPTICOS

Estos sensores se basan en “indicadores ópticos” de pH que cambian sus propiedades ópticas en función del analito. Dependiendo de la propiedad óptica que cambia, los sensores pueden clasificarse en: sensores de absorbancia o luminiscencia.

1.2.4 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

Un contador lógico programable (PLC⁵) se define como un dispositivo electrónico digital que tiene memoria programable para guardar instrucciones y llevar a cabo funciones lógicas de configuración y de secuencia, de sincronización, de conteo y aritméticas, para el control de maquinaria y procesos.

Los PLC tienen la gran ventaja de que permiten modificar un sistema de control sin tener que volver a alambrar las conexiones de los dispositivos de entrada y salida; basta con que el operador digite en un teclado las instrucciones correspondientes.

⁵ www.mecatronicatip.com/e107_files/downloads/cursobasmtiptoshi.pdf

Los PLC cuentan con características específicas que los diferencian de las computadoras y microcontroladores, Son robustos y están diseñados para resistir vibraciones, temperaturas, humedad y ruido, la interfaz para las entradas y las salidas está dentro del controlador.

Es muy sencilla tanto la programación como el entendimiento del lenguaje de programación que implementa, el cual se basa en operaciones de lógica y conmutación.



Figura 1.4: PLC

a. CONFORMACIÓN INTERNA DE UN PLC.- Los elementos principales que forman parte de la estructura de un PLC son:

- **CPU (UNIDAD CENTRAL DE PROCESAMIENTO).-** Controla y procesa todas las operaciones realizadas dentro del PLC.
- **RELOJ.-** Es la fuente de temporización y sincronización de todos los elementos del sistema. Su frecuencia típica ronda entre 1 y 8MHZ.
- **SISTEMA DE BUS.-** Lleva información y datos desde y hacia el CPU, la memoria y las unidades de entrada/salida.
- **MEMORIA ROM.-** Almacena de forma permanente la información del sistema operativo y datos corregidos.
- **MEMORIA RAM.-** Almacena el programa del usuario.

- **BATERÍA.-** Se encarga de mantener el contenido de la RAM por un determinado tiempo, en caso de que se corte el suministro de energía eléctrica.
- **UNIDAD DE ENTRADA/SALIDA.-** Es la interfaz entre el sistema y el mundo externo. Para introducir programas en esta unidad se usa un tablero, el cual puede variar de una sencilla configuración de teclado con pantalla de cristal líquido, o bien llegar a tener incluso unidades de presentación visual con teclado y pantalla.
- **CANALES DE ENTRADA/SALIDA.-** Proporcionan funciones para el acondicionamiento y aislamiento de señales, lo que permite conectarlos directamente a sensores y actuadores, sin depender del uso de otros circuitos.
- **COMUNICACIONES⁶.-** El PLC, es un sistema autónomo, sin embargo, no puede programarse solito. Para ello es necesaria una interfaz con el humano, y esa la provee el puerto RS232, un cable serial y un computador o un programador portátil. En un proceso industrial, muchas veces es necesario utilizar más de un PLC o establecer comunicación con diferentes dispositivos inteligentes como termostatos, captadores de radiación solar, sistemas de control de fluidos (agua, gas, aire), motores, detectores de intrusión, cámaras frigoríficas, sistemas de ascensores, calefacción, etc. Para ello se inventaron el Bus de campo o de terreno dedicado a la GTB (gestión técnica del edificio) lo cual ofrece la posibilidad de cablear o pre cablear números equipos inteligentes a bajo costo.
- **SOFTWARE.-** Indispensable tanto para programarlo, como para monitorearlo. Aquí es el punto cuando se unen la informática, las redes y los PLC. Sistemas SCADA.

⁶ www.ingeniaste.com/ingenias/telecom/tutorial-plc.html

b. TIPOS DE PLC

Debido a la gran variedad de tipos distintos de PLC, tanto en sus funciones, en su capacidad, en su aspecto físico y otros, es que es posible clasificar los distintos tipos en varias categorías.

- **PLC TIPO NANO.-** Generalmente PLC de tipo compacto (Fuente, CPU e I/O integradas) que puede manejar un conjunto reducido de I/O, generalmente en un número inferior a 100. Permiten manejar entradas y salidas digitales y algunos módulos especiales.
- **PLC TIPO COMPACTOS.-** Estos PLC tienen incorporado la Fuente de Alimentación, su CPU y módulos de I/O en un solo módulo principal y permiten manejar desde unas pocas I/O hasta varios cientos (alrededor de 500 I/O), su tamaño es superior a los Nano PLC y soportan una gran variedad de módulos especiales, tales como: entradas y salidas análogas, módulos contadores rápidos, módulos de comunicaciones, interfaces de operador.

c. PROGRAMACIÓN DE UN PLC

Programación de PLC se formuló por primera vez durante la década de 1960 con el fin de responder a las necesidades de las empresas manufactureras estadounidenses cuando se trata de un relé más eficiente de las tareas y pedidos. En ese momento, el uso de controles de lógica cableada se convirtió en demasiado costoso tanto en términos de costos de operación y mantenimiento y revisión de software se convirtió en la clave para una respuesta más asequible y, al mismo tiempo mucho más rápido de la actividad de la máquina, mientras que en la operación. En la actualidad existen tres técnicas diferentes en las que la programación de PLC opera: lógica de escalera, la lógica estatal y la programación tradicional.

- **KOP** a mayoría de PLC procesos básicos de programación se basan en la lógica de escalera, que tiene por objeto sustituir a los sistemas de retransmisión de la lógica. Este tipo de programación se compone de un software que los programas de la dirección de los diagramas de circuitos de la lógica de hardware basado en relés. Se utiliza para reducir la carga de trabajo de los técnicos, como los comandos adecuados son enviados a la maquinaria de hardware para su funcionamiento a través de dos carriles verticales y una serie de peldaños horizontales enrollados alrededor de ellos.

- **PROGRAMACIÓN TRADICIONAL.**-otro tipo de programación de PLC , en este enfoque, los equipos utilizados en la maquinaria del PLC aplicar protocolos de ordenador lenguaje como BASIC y C con el fin de proporcionar los comandos y señales para los componentes de la maquinaria de línea de montaje.

- **LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN**⁷.- Existen dos tipos de lenguaje de programación, la selección del tipo de lenguaje va a depender de la experiencia del programador, del nivel de definición, del tipo de aplicación de la estructura del sistema de control y los grados de comunicación, de esta manera existen dos tipos de lenguaje de programación:
 - ✓ Lenguajes gráficos
 - Diagrama de Escalera (“Ladder Diagram”, **LD**)
 - Diagrama de Bloques Funcionales (“Function Blocks Diagram”,**FBD**)

 - ✓ Lenguajes literales
 - Lista de Instrucciones (“Instruction List”,**IL**)
 - Testo estructurado (“Structured Text”,**ST**)

⁷ www.isa.uniovi.es/docencia/iea/teoria/plc.pdf

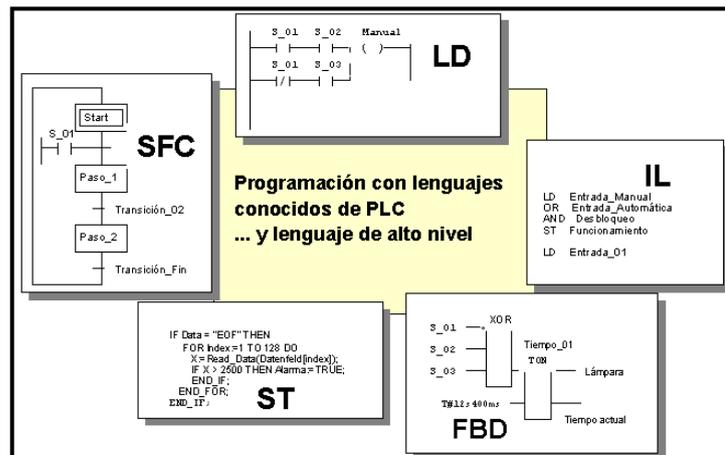


Figura 1.5: Lenguaje de Programación PLC

d. INSTRUCCIONES BÁSICAS DE PROGRAMACIÓN

La nomenclatura y operativos varían ampliamente entre los fabricantes de PLC, y, a menudo los detalles de implementación evolucionan de generación en generación.

- Lógica positiva
True = 1 lógico = entrada energizada.
Falso = 0 lógico = La entrada no energizada.
- Lógica negativa
True = 0 lógico = entrada no energizada
Falso = 1 lógico = entrada de energía.
- Normalmente abierto (XIC) Examinar si está cerrada. - Esta instrucción es verdad (lógica 1) cuando la entrada de hardware (o equivalente relé interno) se activa.

- Normalmente cerrado (XIO) Examinar si está abierto.- Esta instrucción es verdad (lógica 1) cuando la entrada de hardware (o equivalente relé interno) no está activada.
- De habilitación de salida (OTE). - Esta instrucción imita la acción de una bobina de relé convencional.
- Temporizador de encendido (TON). - Por lo general, en los temporizadores empezar a cronometrar cuando la entrada se hace verdadero, y restablecer, si la línea de habilitación se hace falso antes de consigna se ha alcanzado. Si se activa hasta el punto de consigna se alcanza, la salida del temporizador se hace verdadero, y se mantiene fiel hasta que la entrada (habilitar) la línea se hace falso.
- Temporizador retardo al apagado (TOF).- Generalmente, OFF temporizadores comenzar el tiempo en una verdadera transición a falso, y continuar el cronometraje siempre y cuando la lógica precedente permanece falsa. Cuando el tiempo acumulado es igual a la salida de consigna TOF continúa y se mantiene hasta que el renglón se hace verdadero.
- Temporizador retentivo (RTO).- Este tipo de temporizador no se reinicia el tiempo acumulado cuando la condición de entrada se hace falsa.
- Líneas subterráneas
(OTL) - Cierre de salida.
(UTO) - Desenganche de salida.
- Saltar a subrutina (JSR).- Se una para saltar de un escalón a otro.

1.2.5 SERVOVÁLVULAS⁸

La servoválvula es una válvula direccional de más de una vía que en función de su señal de realimentación realiza funciones de regulación de caudal o de presión con gran sensibilidad. En una servoválvula el desplazamiento de la corredera se realiza por medio de un motor eléctrico (motor par) que regula con precisión el posicionamiento de la misma, controlando con ello el caudal que pasa a través de la superficie liberada por la corredera en su desplazamiento. La figura 1.6 muestra esquemáticamente el área de paso entre el cuerpo de una válvula y una corredera en movimiento; además, la compara con la liberada si el orificio interno de la válvula fuese rectangular. Las gráficas de la figura muestran la diferencia de superficie en ambos casos (sombreada para un desplazamiento del 75% de la corredera).

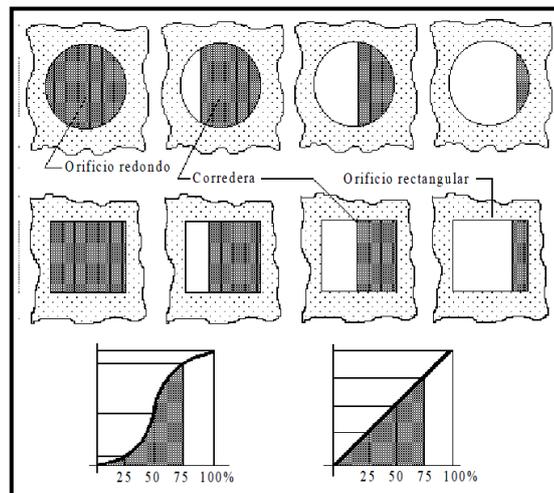


Figura 1.6: Diferencia de caudal en orificios redondos y rectangulares.

La servoválvula desplaza la corredera liberando una superficie de paso con la misma precisión que se haría si el orificio interno de la válvula fuese rectangular,

⁸www.ives.edu.mx/bibliodigital/Ingenierias/Libros%20Ingenieria/Mecanica%20de%20los%20fluidos/Oleohidraulica%20basica%20y%20diseno%20de%20circuitos/EM00202C.pdf

además corrige la posición de la corredera en función de una toma de datos que realiza en la línea de salida (*feed-back*).

Existen diversos tipos de servoválvulas, si bien su funcionamiento es similar en todas ellas: en una primera fase el motor par es activado electrónicamente y en una segunda fase la corredera hidráulica se desplaza en función de la señal recibida en la primera fase. Las servoválvulas suelen ser de dos fases, aunque también las hay de una sola fase y, en raras ocasiones, de tres fases. En las de una fase la corredera principal de la válvula es movida directamente por el motor lineal. Los caudales en este tipo de servoválvulas están limitados a tan sólo unos 10-12 l/min., y su resolución no es tan buena como la de las de dos fases.

En los modelos de dos fases, el piloto, o primera fase, recibe una señal electromecánica, la amplifica, produce el movimiento de las bobinas, y éstas desplazan la lengüeta que controlará la posición de la segunda fase. Las figuras 1.7 y 1.8 muestran una sección de la primera fase en una servoválvula de dos fases: en la primera la lengüeta y el muelle de realimentación están centrados; en la siguiente están desplazadas por la acción de la señal recibida y transformada por las bobinas.

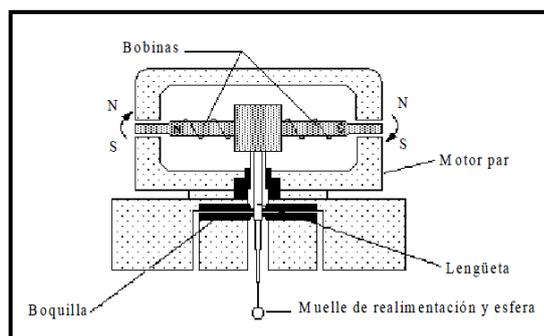


Figura 1.7: Servocontrol en reposo.

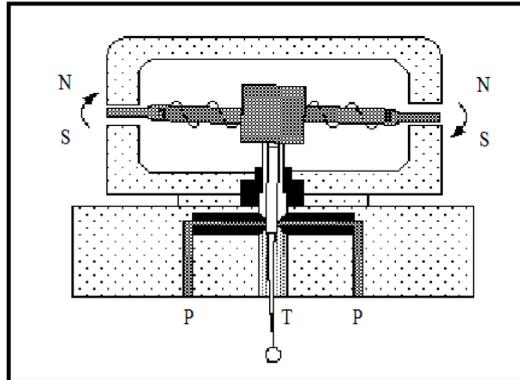


Figura 1.8: Servocontrol activado.

Existen diversos tipos de pilotajes y muchos tipos de realimentación (*feed-back*), en función del tipo de realimentación de la servoválvula, ésta se usará para:

a. CONTROL DE POSICIÓN

Para el control de posición de un cilindro la realimentación se realizará mediante la señal que emita un transductor de posición del cilindro.

b. CONTROL DE LA VELOCIDAD

Para el control de la velocidad la realimentación se realizará mediante la señal que emita un tacómetro instalado en el actuador rotativo del sistema.

c. CONTROL DE LA FUERZA

Para el control de la fuerza o presión la realimentación se realizará mediante la señal que emita un transductor de fuerza o de presión instalado en el actuador o en la línea respectivamente.

Casi todas las servoválvulas están equipadas con un filtro de presión en la entrada de la línea de pilotaje. Normalmente este filtro es de malla metálica de acero

inoxidable o de metal sinterizado, con grados de filtración entre 10 y 20 mm. Este filtro protege la línea de pilotaje pero no a la segunda fase de la válvula (el conjunto camisa - corredera).

La figura 1.9 muestra la sección completa de una servoválvula de dos fases, con la corredera centrada todas las vías cerradas (por el diseño de la corredera).

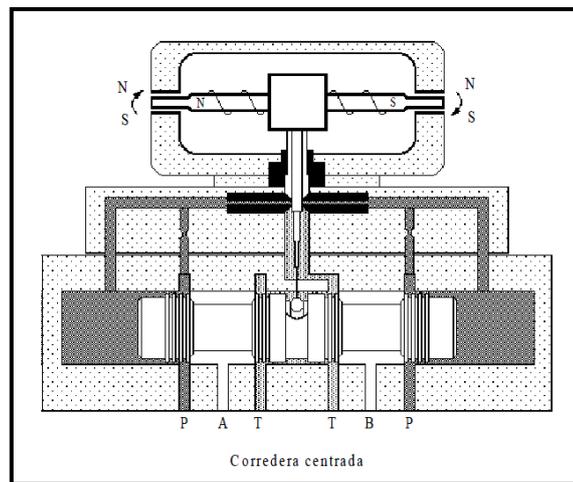


Figura 1.9: Servoválvula en reposo (todas las vías cerradas).

La eficacia y precisión hidráulica de una servoválvula se basa en lo ajustado de las tolerancias entre la camisa y la corredera.⁹ Para mantener estas tolerancias se ha de evitar el desgaste de estos componentes, y para ello la mayoría de fabricantes recomiendan la inclusión de un filtro de 3 mm (absolutas) en la línea de entrada de presión. La figura 1.10 muestra una sección de la misma servoválvula con la corredera desplazada y con la línea de presión conectada a la vía A, y la vía B conectada al tanque.

⁹ www.eximtec.cl/oleohidraulica/servo-valvulas-controles/02.php

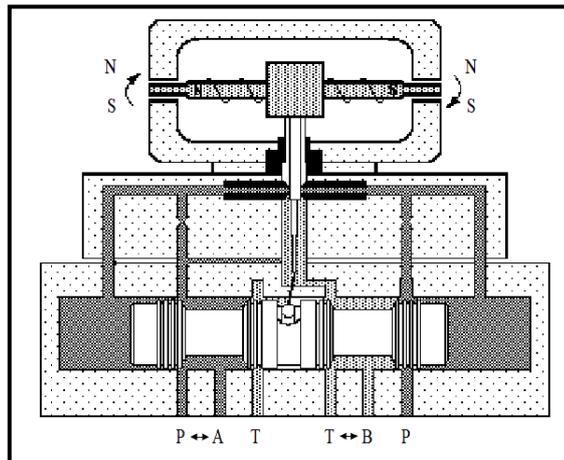


Figura 1.10: Servoválvula activada.

d. CAMPOS DE APLICACIÓN

Las servoválvulas son accionadores de tipo neumático o hidráulico que conectan dos o más vías por las que circula un fluido.¹⁰ La diferencia con las válvulas es que estas son de tipo todo o nada, mientras que las servoválvulas tienen la posibilidad de controlar la presión o el caudal. Debido a los grandes avances tecnológicos de la maquinaria actualmente usada, las servoválvulas son componentes cada día más frecuentes en aplicaciones como:

- Instalaciones de embotellado y de irrigación
- Técnica de pozos
- Técnica sanitaria
- Depuración de aguas
- Neumática
- Instalaciones mezcladoras
- Montaje de tuberías
- Abastecimiento de agua potable

¹⁰ www.mitecnologico.com/im/Main/Servoalvulas

1.3 CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO

1.3.1 INTRODUCCIÓN

Un PID es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo.¹¹ El valor Proporcional determina la reacción del error actual. El Integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. El Derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce.

Ajustando estas tres variables en el algoritmo de control del PID, el controlador puede proveer un control diseñado para lo que requiera el proceso a realizar. La respuesta del controlador puede ser descrita en términos de respuesta del control ante un error, el grado el cual el controlador llega al "set point", y el grado de oscilación del sistema.

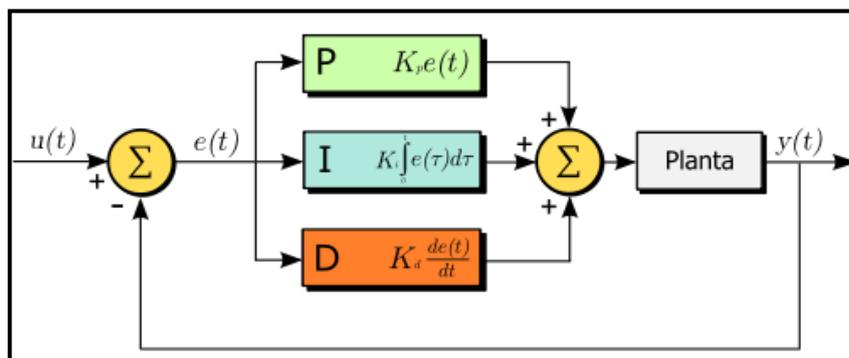


Figura 1.11: Diagrama en bloques de un control PID.

¹¹ www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf

Para el correcto funcionamiento de un controlador PID que regule un proceso o sistema se necesita, al menos:

1. Un sensor, que determine el estado del sistema (termómetro, caudalímetro, manómetro, etc).
2. Un controlador, que genere la señal que gobierna al actuador.
3. Un actuador, que modifique al sistema de manera controlada (resistencia eléctrica, motor, válvula, bomba, etc).

El sensor proporciona una señal analógica o digital al controlador, la cual representa el punto actual en el que se encuentra el proceso o sistema.¹² La señal puede representar ese valor en tensión eléctrica, intensidad de corriente eléctrica o frecuencia.

El controlador lee una señal externa que representa el valor que se desea alcanzar, esta señal recibe el nombre de punto de consigna (o punto de referencia), la cual es de la misma naturaleza y tiene el mismo rango de valores que la señal que proporciona el sensor. Para hacer posible esta compatibilidad y que, a su vez, la señal pueda ser entendida por un humano, habrá que establecer algún tipo de interfaz (HMI - Human Machine Interface), son pantallas de gran valor visual y fácil manejo que se usan para hacer más intuitivo el control de un proceso.

El controlador resta la señal de punto actual a la señal de punto de consigna, obteniendo así la señal de error, que determina en cada instante la diferencia que hay entre el valor deseado (consigna) y el valor medido. La señal de error es utilizada por cada uno de los 3 componentes del controlador PID. Las 3 señales sumadas, componen la señal de salida que el controlador va a utilizar para gobernar al actuador. La señal resultante de la suma de estas tres se llama variable manipulada y no se aplica directamente sobre el actuador, sino que debe ser

¹² www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf

transformada para ser compatible con el actuador utilizado. El peso de la influencia que cada una de estas partes tiene en la suma final, viene dado por la constante proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo, respectivamente, permitiendo que el bucle de control corrija eficazmente y en el mínimo tiempo posible los efectos de las perturbaciones.

1.3.2 CONTROL PROPORCIONAL¹³

La parte proporcional consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional como para que hagan que el error en estado estacionario sea casi nulo, pero en la mayoría de los casos, estos valores solo serán óptimos en una determinada porción del rango total de control, siendo distintos los valores óptimos para cada porción del rango. Sin embargo, existe también un valor límite en la constante proporcional a partir del cual, en algunos casos, el sistema alcanza valores superiores a los deseados. Este fenómeno se llama sobreoscilación y, por razones de seguridad, no debe sobrepasar el 30%, aunque es conveniente que la parte proporcional ni siquiera produzca sobreoscilación.

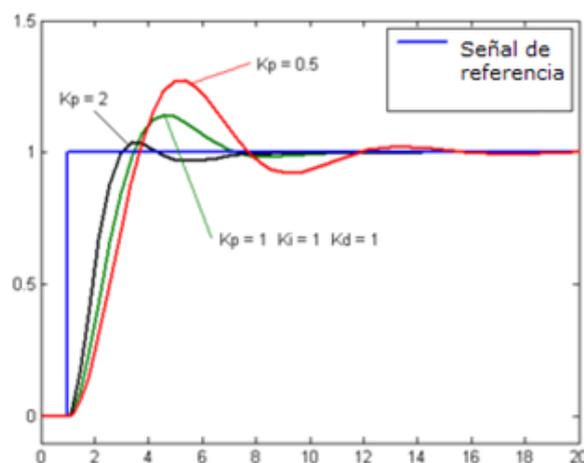


Figura 1.12: Control proporcional.

¹³ www.automatas.org/hardware/teoria_pid.htm

La parte proporcional no considera el tiempo, por lo tanto, la mejor manera de solucionar el error permanente y hacer que el sistema contenga alguna componente que tenga en cuenta la variación respecto al tiempo, es incluyendo y configurando las acciones integral y derivativa. La fórmula del proporcional está dada por:

$$P_{sal} = K_p e(t) \quad \text{EC. 1.1}$$

El error, la banda proporcional y la posición inicial del elemento final de control se expresan en tanto por uno. Nos indicará la posición que pasará a ocupar el elemento final de control

Ejemplo: Cambiar la posición de una válvula (elemento final de control) proporcionalmente a la desviación de la temperatura (variable) respecto al punto de consigna (valor deseado).

1.3.3 CONTROL INTEGRAL

El modo de control Integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional. El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un período determinado; luego es multiplicado por una constante **I**. Posteriormente, la respuesta integral es adicionada al modo Proporcional para formar el control P + I con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario.

El modo integral presenta un desfaseamiento en la respuesta de 90° que sumados a los 180° de la retroalimentación (negativa) acercan al proceso a tener un retraso

de 270° , luego entonces solo será necesario que el tiempo muerto contribuya con 90° de retardo para provocar la oscilación del proceso. La ganancia total del lazo de control debe ser menor a 1, y así inducir una atenuación en la salida del controlador para conducir el proceso a estabilidad del mismo. Se caracteriza por el tiempo de acción integral en minutos por repetición. Es el tiempo en que delante una señal en escalón, el elemento final de control repite el mismo movimiento correspondiente a la acción proporcional.

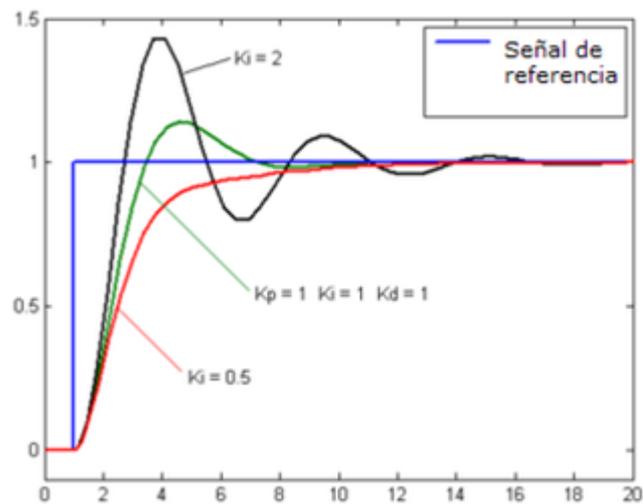


Figura 1.13: Control Integral.

El control integral se utiliza para obviar el inconveniente del offset (desviación permanente de la variable con respecto al punto de consigna) de la banda proporcional. La fórmula del integral está dada por:

$$I_{sal} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad \text{EC.1.2}$$

Ejemplo: Mover la válvula (elemento final de control) a una velocidad proporcional a la desviación respecto al punto de consigna (variable deseada).

1.3.4 CONTROL DERIVATIVO

La acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; (si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral). El error es la desviación existente entre el punto de medida y el valor consigna, o "Set Point". La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error se incremente.

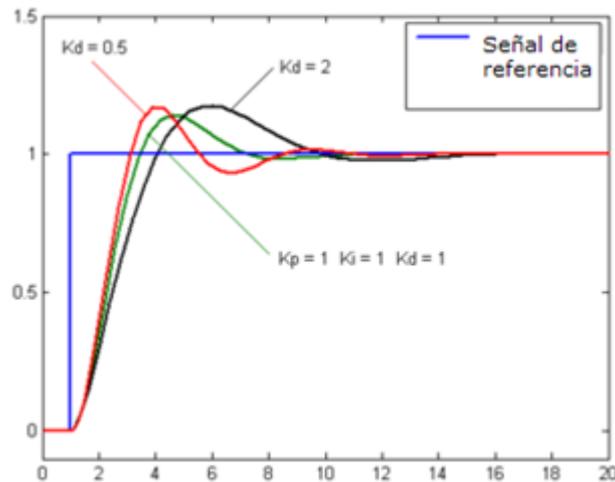


Figura 1.14: Control derivativo.

Se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante **D** y luego se suma a las señales anteriores (P+I). Es importante adaptar la respuesta de control a los cambios en el sistema ya que una mayor derivativa corresponde a un cambio más rápido y el controlador puede responder acordeamente. La fórmula del derivativo está dada por:

$$D_{\text{sal}} = K_d \frac{de}{dt} \quad \text{EC. 1.3}$$

El control derivativo se caracteriza por el tiempo de acción derivada en minutos de anticipo. La acción derivada es adecuada cuando hay retraso entre el movimiento de la válvula de control y su repercusión a la variable controlada.

Cuando el tiempo de acción derivada es grande, hay inestabilidad en el proceso, cuando el tiempo de acción derivada es pequeño la variable oscila demasiado con relación al punto de consigna. Suele ser poco utilizada debido a la sensibilidad al ruido que manifiesta y a las complicaciones que ello conlleva. El tiempo óptimo de acción derivativa es el que retorna la variable al punto de consigna con las mínimas oscilaciones

Ejemplo: Corrige la posición de la válvula (elemento final de control) proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada.

1.3.5 SIGNIFICADO DE LAS CONSTANTES¹⁴

- **(P) CONSTANTE DE PROPORCIONALIDAD.-** Se puede ajustar como el valor de la ganancia del controlador o el porcentaje de banda proporcional. Ejemplo: Cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable respecto al punto de consigna. La señal P mueve la válvula siguiendo fielmente los cambios de temperatura multiplicados por la ganancia.
- **(I) CONSTANTE DE INTEGRACIÓN.-** Indica la velocidad con la que se repite la acción proporcional.
- **(D) CONSTANTE DE DERIVACIÓN.-** Hace presente la respuesta de la acción proporcional duplicándola, sin esperar a que el error se duplique. El valor indicado por la constante de derivación es el lapso de tiempo durante el

¹⁴ www.lra.unileon.es/es/book/export/html/268

cual se manifestará la acción proporcional correspondiente a 2 veces el error y después desaparecerá. Ejemplo: Mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación respecto al punto de consigna. La señal I va sumando las áreas diferentes entre la variable y el punto de consigna repitiendo la señal proporcional según el tiempo de acción derivada (minutos/repetición).

Tanto la acción Integral como la acción Derivativa, afectan a la ganancia dinámica del proceso. La acción integral sirve para reducir el error estacionario, que existiría siempre si la constante K_i fuera nula. Ejemplo: Corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada. La señal D es la pendiente (tangente) por la curva descrita por la variable.

La salida de estos tres términos, el proporcional, el integral, y el derivativo son sumados para calcular la salida del controlador PID. Definiendo $u(t)$ como la salida del controlador, la forma final del algoritmo del PID es:

1.3.6 APLICACIONES

La razón por la cual los lazos PID fueron inventados es para simplificar las labores de los operadores y ejercer un mejor control sobre las operaciones. Algunas de las aplicaciones más comunes son:

- Lazos de Temperatura (Aire acondicionado, Calentadores, Refrigeradores, etc.)
- Lazos de Nivel (Nivel en tanques de líquidos como agua, lácteos, mezclas, crudo, etc.)
- Lazos de Presión (para mantener una presión predeterminada en tanques, tubos, recipientes, etc.)
- Lazos de Flujo (mantienen la cantidad de flujo dentro de una línea o tubo).

1.4 COMUNICACIÓN INALÁMBRICA ZIGBEE¹⁵

1.4.1 INTRODUCCIÓN

ZigBee es un estándar de comunicaciones inalámbricas diseñado por la ZigBee Alliance, basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (wireless personal area network, WPAN) y tiene como objetivo las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. No es una tecnología, sino un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas por cualquier fabricante.

La idea de ZigBee empezó a finales de los 90 cuando muchos ingenieros se planteaban que Wi-Fi y Bluetooth dejaban un hueco vacío para cierto tipo de aplicaciones. En particular muchos grupos de ingenieros tenían la necesidad de diseñar redes ad-hoc de interfaz radio digital que pudieran organizarse automáticamente sin la necesidad de configuración externa o administración de la red. El estándar IEEE 802.15.4 se completó en 2003 y fue ratificado a finales de 2004 por la ZigBee Alliance, la cual es una comunidad internacional de más de 100 compañías como Motorola, Mitsubishi, Philips, Samsung, Honeywell, Siemens, entre otras; cuyo objetivo es habilitar redes inalámbricas con capacidades de control y monitoreo que sean confiables, de bajo consumo energético y de bajo costo, que funcione vía radio y de modo bidireccional; todo basado en un estándar público global que permita a cualquier fabricante crear productos que sean compatibles entre ellos.

¹⁵ www.upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3581/1/53948-1.pdf

1.4.2 CÓMO FUNCIONA

Tabla 1.3: Propiedades del IEEE 802.15.4 ZigBee.

Propiedades del IEEE 802.15.4 ZigBee	
Bandas de frecuencia y Tasa de transferencia	868 MHz: 200Kbps 915 MHz: 40Kbps 2.4 GHz: 250Kbps
Alcance	50 – 10 m
Canales	868/915 MHz: 11 canales 2.4 GHz : 16 canales
Red	Hasta 2^{64} dispositivos
Rango de temperatura	- 40 °C a +85 °C

El estándar IEEE 802.15.4 define 27 canales de frecuencia entre las tres bandas. La capa física a 868/915 MHz soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6 MHz, y diez canales entre los 902.0 y 928.0 MHz. Debido al soporte regional de esas dos bandas de frecuencias, es muy improbable que una sola red utilice los 11 canales. Sin embargo, las dos bandas se consideran lo suficientemente cercanas en frecuencia para que se puedan utilizar con el mismo hardware para ambas y así reducir costes de manufacturación. La capa física a 2.4 GHz soporta 16 canales entre los 2.4 y los 2.4835 GHz con un amplio espacio entre canales (5 MHz), con el objetivo de facilitar los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción.

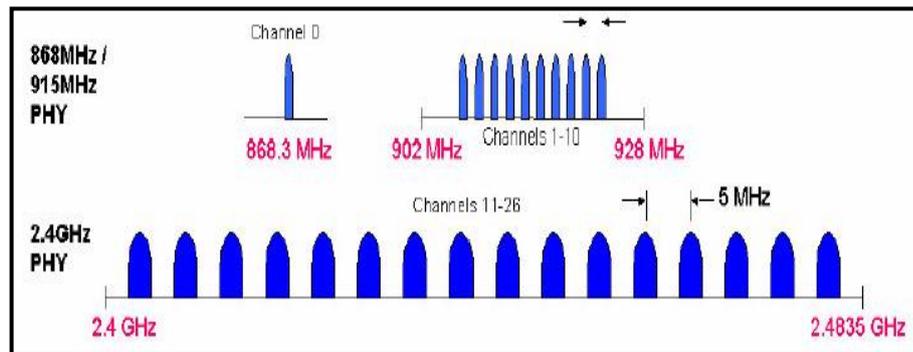


Figura 1.15: Estructura de canales ZigBee.

Dado que en el hogar es propenso a tener múltiples redes inalámbricas trabajando en las mismas bandas de frecuencias, así como una interferencia no intencionada de las diferentes aplicaciones, la capacidad de relocalización dentro del espectro será un factor importante en el éxito de las redes inalámbricas dentro del hogar.

El estándar fue diseñado para implementar una selección dinámica de canales, a través de una selección específica de algoritmos la cual es responsabilidad de la capa de red.

La capa MAC (Media Access Control en español Control de Acceso al Medio) incluye funciones de búsqueda que sigue paso a paso a través de una lista de canales permitidos en busca de una señal de guía, mientras que la capa física contiene varias funciones de bajo nivel, tales como la detección de los niveles de energía recibidos, indicadores de calidad en el enlace, así como de conmutación de canales, lo que permite asignación de canales y agilidad en la selección de frecuencias. Esas funciones son utilizadas por la red para establecer su canal inicial de operación y para cambiar los canales en respuesta a una pausa muy prolongada.

1.4.3 CARACTERÍSTICAS DEL ZIGBEE¹⁶

- ZigBee opera en las bandas libres ISM (Industrial, Scientific & Medical) de 2.4 GHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (Estados Unidos).
- A pesar de coexistir en la misma frecuencia con otro tipo de redes como WiFi o Bluetooth su desempeño no se ve afectado, esto debido a su baja tasa de transmisión y a características propias del estándar IEEE 802.15.4.
- Capacidad de operar en redes de gran densidad, esta característica ayuda a aumentar la confiabilidad de la comunicación, ya que entre más nodos existan dentro de una red, entonces, mayor número de rutas alternas existirán para garantizar que un paquete llegue a su destino.
- Cada red ZigBee tiene un identificador de red único, lo que permita que coexistan varias redes en un mismo canal de comunicación sin ningún problema.
- Teóricamente pueden existir hasta 16 000 redes diferentes en un mismo canal y cada red puede estar constituida por hasta 65 000 nodos, obviamente estos límites se ven truncados por algunas restricciones físicas (memoria disponible, ancho de banda).
- Se puede establecer comunicación entre dos nodos aun cuando estos se encuentren fuera del rango de transmisión, siempre y cuando existan otros nodos intermedios que los interconecten, de esta manera, se incrementa el área de cobertura de la red.

¹⁶www.dea.icaei.upco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/Zigbee%20y%20sus%20aplicaciones.pdf

- Su topología de malla (MESH) permite a la red auto recuperarse de problemas en la comunicación aumentando su confiabilidad.
- Agilidad de frecuencia permite que las redes cambien los canales en forma dinámica en caso que ocurran interferencias.

1.4.4 ARQUITECTURA¹⁷

ZigBee es una pila de protocolos, que de manera similar al modelo OSI está constituido por diferentes capas, las cuales son independientes una de la otra.

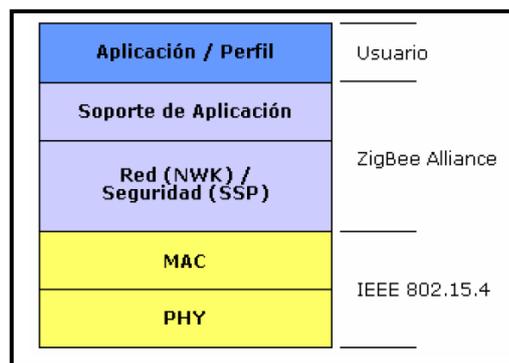


Figura 1.16: Capas que conforman la pila de protocolos para ZigBee.

- La capa de más bajo nivel es la capa física (PHY - Physical Layer), que en conjunto con la capa de acceso al medio (MAC), brindan los servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto. Estas dos capas están descritas en el estándar IEEE 802.15.4–2003, el estándar trabaja sobre las bandas de acceso libre ISM de uso no regulado, donde se definen hasta 16 canales en el rango de 2.4 GHz, cada una de ellas con un ancho de banda de 5 MHz. Se utilizan radios con un espectro de dispersión de secuencia directa, lográndose tasas de transmisión en el aire de hasta 250 Kbps en rangos que oscilan entre los 10 y 75 m, los cuales dependen del entorno.

¹⁷ www.upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3581/1/53948-1.pdf

- La capa de red (NWK - Network Layer) tiene como objetivo principal permitir el correcto uso del subnivel MAC y ofrecer una interfaz adecuada para su uso por parte de la capa de aplicación. En esta capa se brindan los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a la red, enrutar paquetes dirigidos a otros nodos en la red, proporcionar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autentificarlos. Cuando esta capa se encuentra cumpliendo la función de unir o separar dispositivos a través del controlador de red, implementa seguridad, y encamina tramas a sus respectivos destinos; además, la capa de red del controlador de red es responsable de crear una nueva red y asignar direcciones a los dispositivos de la misma, es en esta capa en donde se implementan las distintas topologías de red que ZigBee soporta.
- La siguiente capa es la de soporte a la aplicación que es el responsable de mantener el rol que el nodo juega en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red. La capa de Red y de soporte a la aplicación son definidas por la ZigBee Alliance.
- En el nivel conceptual más alto se encuentra la capa de aplicación que no es otra cosa que la aplicación misma y de la que se encargan los fabricantes. Es en esta capa donde se encuentran los Objetos de Dispositivos ZigBee (ZDO ZigBee Device Objects) que se encargan de definir el papel del dispositivo en la red, si actuará como coordinador, ruteador o dispositivo final; la Subcapa de Soporte de Aplicación (APS - Application Support Sublayer) y los objetos de aplicación definidos por cada uno de los fabricantes.

Cada capa se comunica con sus capas subyacentes a través de una interface de datos y otra de control, las capas superiores solicitan servicios a las capas

inferiores, y éstas reportan sus resultados a las superiores. Además de las capas mencionadas, a la arquitectura se integran otro par de módulos: módulo de seguridad, que es quien provee los servicios para cifrar y autenticar los paquetes, y el módulo de administración del dispositivo ZigBee, que es quien se encarga de administrar los recursos de red del dispositivo local, además de proporcionar a la aplicación funciones de administración remota de red.

1.4.5 EMPAQUETAMIENTO Y DIRECCIONAMIENTO

En ZigBee, el empaquetamiento se realiza en cuatro tipos diferentes de paquetes básicos, los cuales son: datos, ACK, MAC y baliza.

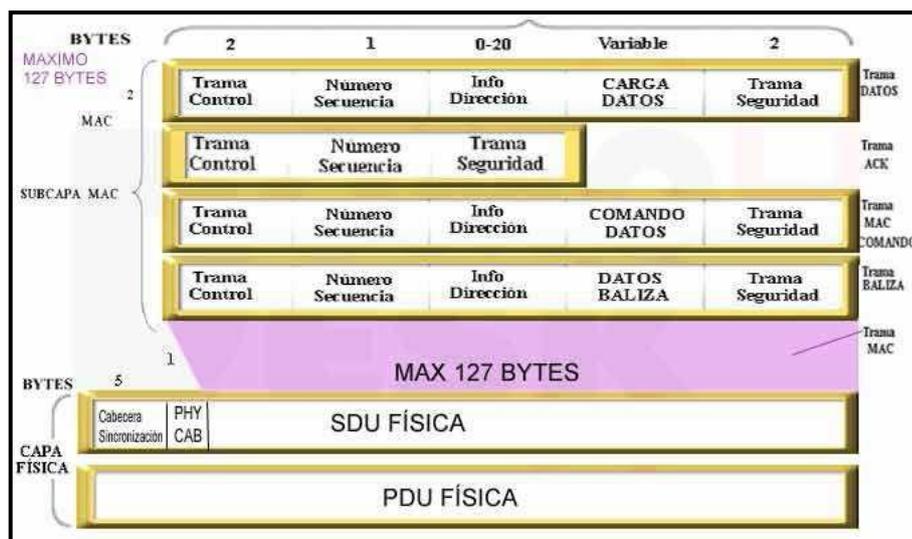


Figura 1.17: Campos de los cuatro tipos de paquetes básicos de ZigBee.

- El paquete de datos tiene una carga de datos de hasta 104 bytes. La trama esta numerada para asegurar que todos los paquetes lleguen a su destino. Un campo nos asegura que el paquete se ha recibido sin errores.
- La estructura del paquete de Reconocimiento (ACK - Acknowledgment), es donde se realiza una realimentación desde el receptor al emisor, de esta manera se confirma que el paquete se ha recibido sin errores. Se puede

incluir un tiempo de silencio entre tramas, para enviar un pequeño paquete después de la transmisión de cada paquete.

- El paquete MAC, se utiliza para el control remoto y la configuración de dispositivos/nodos, una red centralizada utiliza este tipo de paquetes para configurar la red a distancia.
- El paquete baliza se encarga de “despertar” los dispositivos que “escuchan” y luego vuelven a “dormirse” si no reciben nada más. Estos paquetes son importantes para mantener todos los dispositivos y los nodos sincronizados, sin tener que gastar una gran cantidad de batería estando todo el tiempo encendidos.

Por otra parte, el direccionamiento es, a su vez, parte del nivel de aplicación. Un nodo está formado por un transceptor de radio compatible con el estándar 802.15.4 dónde se implementan dos mecanismos de acceso al canal y una o más descripciones de dispositivo. El transceptor es la base del direccionamiento, mientras que los dispositivos dentro de un nodo se identifican por medio de un end point numerado entre 1 y 240. Los dispositivos se direccionan empleando 64-bits y un direccionamiento corto opcional de 16 bits.

1.4.6 ESTRATEGIAS DE CONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS EN UNA RED ZIGBEE¹⁸

Las redes ZigBee han sido diseñadas para conservar la potencia en los nodos esclavos. La estrategia consiste en que, durante mucho tiempo, un dispositivo esclavo está en modo dormido, de tal forma que solo se despierta por una fracción

¹⁸ www.sase.com.ar/2012/files/2012/09/SASE-2012-Digi-RF-y-Zigbee.pdf

de segundo para confirmar que está vivo en la red de dispositivos de la que forma parte. Esta transición del modo dormido al modo despierto, dura unos 15ms, y la enumeración de esclavos dura alrededor de 30ms. En las redes Zigbee, se pueden usar dos tipos de entornos o sistemas:

- **CON BALIZAS.-** Es un mecanismo de control del consumo de potencia en la red. Permite a todos los dispositivos saber cuándo pueden transmitir. En este modelo, los dos caminos de la red tienen un distribuidor que se encarga de controlar el canal y dirigir las transmisiones. Las balizas que dan nombre a este tipo de entorno, se usan para poder sincronizar todos los dispositivos que conforman la red, y los intervalos de las balizas son asignados por el coordinador de red y pueden variar desde los 15ms hasta los 4 minutos. Los dispositivos que conforman la red, escuchan a dicho coordinador durante el balizamiento (envío de mensajes a todos los dispositivos entre 0,015 y 252 segundos). Un dispositivo que quiera intervenir, lo primero que tendrá que hacer es registrarse para el coordinador, y es entonces cuando mira si hay mensajes para él. En el caso de que no haya mensajes, este dispositivo vuelve a dormir, y se despierta de acuerdo a un horario que ha establecido previamente el coordinador. En cuanto el coordinador termina el balizamiento, vuelve a dormirse.
- **SIN BALIZAS.-** Se usa el acceso múltiple al sistema Zigbee en una red punto a punto cercano. En este tipo, cada dispositivo es autónomo, pudiendo iniciar una conversación, en la cual los otros pueden interferir. A veces, puede ocurrir que el dispositivo destino puede no oír la petición, o que el canal esté ocupado. Este sistema se usa típicamente en los sistemas de seguridad, en los cuales sus dispositivos, duermen prácticamente todo el tiempo (99,999%). Para que se les tenga en cuenta, estos elementos se despiertan de forma regular para anunciar que siguen en la red. Cuando se produce un evento, el sensor despierta instantáneamente y transmite la alarma correspondiente. Es en ese momento cuando el coordinador de red, recibe el mensaje enviado por

el sensor, y activa la alarma correspondiente. En este caso, el coordinador de red se alimenta de la red principal durante todo el tiempo.

1.4.7 SEGURIDAD¹⁹

ZigBee utiliza el modelo de seguridad de la subcapa MAC IEEE 802.15.4, la cual especifica 4 servicios de seguridad.

- **CONTROL DE ACCESOS.-** El dispositivo mantiene una lista de los dispositivos comprobados en la red.
- **DATOS ENCRIPADOS.-** Los cuales usan una encriptación con un código de 128 bits.
- **INTEGRACIÓN DE TRAMAS.-** Protegen los datos de ser modificados por otros.
- **SECUENCIAS DE REFRESCO.-** Comprueban que las tramas no han sido reemplazadas por otras. El controlador de red comprueba estas tramas de refresco y su valor, para ver si son las esperadas.
- a. **MODELO BÁSICO DE SEGURIDAD.-** Las claves son la base de la arquitectura de seguridad y, como tal, su protección es fundamental para la integridad del sistema. Las claves nunca deben transportarse utilizando un canal inseguro, si bien existe una excepción momentánea que se da en la fase inicial de la unión de un dispositivo desconfigurado a una red. La red ZigBee debe tener particular cuidado, pues una red ad hoc puede ser accesible físicamente a cualquier dispositivo externo y el entorno de trabajo no se

¹⁹ www.sx-de-tx.wikispaces.com/ZIGBEE

puede conocer de antemano. Las aplicaciones que se ejecutan en concurrencia utilizando el mismo transceptor deben, así mismo, confiar entre sí, ya que por motivos de coste no se asume la existencia de un cortafuegos entre las distintas entidades del nivel de aplicación.

Los distintos niveles definidos dentro de la pila de protocolos no están separados criptográficamente, por lo se necesitan políticas de acceso, que se asumen correctas en su diseño. Este modelo de confianza abierta (open trust) posibilita la compartición de claves disminuyendo el coste de forma significativa. No obstante, el nivel que genera una trama es siempre el responsable de su seguridad. Todos los datos de las tramas del nivel de red han de estar cifradas, ya que podría haber dispositivos maliciosos, de forma que el tráfico no autorizado se previene de raíz. De nuevo, la excepción es la transmisión de la clave de red a un dispositivo nuevo, lo que dota a toda la red de un nivel de seguridad único. También es posible utilizar criptografía en enlaces punto a punto.

b. ARQUITECTURA DE SEGURIDAD.- ZigBee utiliza claves de 128 bits en sus mecanismos de seguridad. Una clave puede asociarse a una red (utilizable por los niveles de ZigBee y el subnivel MAC) o a un enlace. Las claves de enlace se establecen en base a una clave maestra que controla la correspondencia entre claves de enlace. Los distintos servicios usarán variaciones unidireccionales (one-way) de la clave de enlace para evitar riesgos de seguridad.

Es claro que la distribución de claves es una de las funciones de seguridad más importantes. Una red segura encarga a un dispositivo especial la distribución de claves: el denominado centro de confianza (trust center). En un caso ideal los dispositivos llevarán precargados de fábrica la dirección del centro de confianza y la clave maestra inicial. Si se permiten vulnerabilidades momentáneas, se puede realizar el transporte como se ha descrito. Las aplicaciones que no requieran un nivel especialmente alto de seguridad

utilizarán una clave enviada por el centro de confianza a través del canal inseguro transitorio.

Por tanto, el centro de confianza controla la clave de red y la seguridad punto a punto. Un dispositivo sólo aceptará conexiones que se originen con una clave enviada por el centro de confianza, salvo en el caso de la clave maestra inicial. La arquitectura de seguridad está distribuida entre los distintos niveles de la siguiente manera:

- El subnivel MAC puede llevar a cabo comunicaciones fiables de un solo salto. En general, utiliza el nivel de seguridad indicado por los niveles superiores.
- El nivel de red gestiona el ruteo, procesando los mensajes recibidos y pudiendo hacer broadcast de peticiones. Las tramas salientes usarán la clave de enlace correspondiente al ruteo realizado, si está disponible; en otro caso, se usará la clave de red.
- El nivel de aplicación ofrece servicios de establecimiento de claves al ZDO y las aplicaciones, y es responsable de la difusión de los cambios que se produzcan en sus dispositivos a la red. Estos cambios podrían estar provocados por los propios dispositivos o en el centro de confianza, que puede ordenar la eliminación de un dispositivo de la red.

1.4.8 TIPOS DE DISPOSITIVOS²⁰

Se definen tres tipos distintos de dispositivo ZigBee según su papel en la red:

²⁰www.sx-de-tx.wikispaces.com/ZIGBEE

- **COORDINADOR ZIGBEE (ZIGBEE COORDINATOR, ZC).**- El tipo de dispositivo más completo. Debe existir uno por red. Sus funciones son las de encargarse de controlar la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para conectarse entre ellos, requiere memoria y capacidad de computación.
- **ROUTER ZIGBEE (ZIGBEE ROUTER, ZR).**- Interconecta dispositivos separados en la topología de la red, además de ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario.
- **DISPOSITIVO FINAL (ZIGBEE END DEVICE, ZED).**- Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. De esta forma, este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías.

Basándose en su funcionalidad, puede plantearse una segunda clasificación:

- **DISPOSITIVO DE FUNCIONALIDAD COMPLETA (FFD).**- También conocidos como nodo activo. Es capaz de recibir mensajes en formato 802.15.4, puede funcionar como Coordinador o Router, o puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interfaces con los usuarios.
- **DISPOSITIVO DE FUNCIONALIDAD REDUCIDA (RFD).**- También conocido como nodo pasivo. Tiene capacidad y funcionalidad limitadas con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.
- **UN NODO ZIGBEE (TANTO ACTIVO COMO PASIVO).**- Reduce su consumo gracias a que puede permanecer dormido la mayor parte del tiempo, cuando se requiere su uso, el nodo ZigBee es capaz de despertar en un tiempo ínfimo, para volverse a dormir cuando deje de ser requerido. Un nodo

cualquiera despierta en aproximadamente 15 ms. Además de este tiempo, se muestran otras medidas de tiempo de funciones comunes:

- Nueva enumeración de los nodos esclavo (por parte del coordinador): aproximadamente 30 ms.
- Acceso al canal entre un nodo activo y uno pasivo: aproximadamente 15 ms.

1.4.9 TOPOLOGÍAS DE RED ZIGBEE

ZigBee permite tres topologías de red:

- **TOPOLOGÍA EN ESTRELLA.**- El coordinador se sitúa en el centro.
- **TOPOLOGÍA EN ÁRBOL.**- El coordinador será la raíz del árbol.
- **TOPOLOGÍA DE MALLA.**- Al menos uno de los nodos tendrá más de dos conexiones.

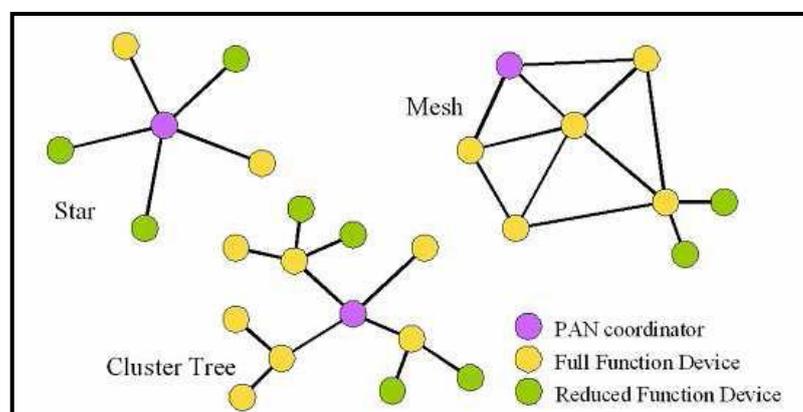


Figura 1.18: Diferentes topologías de red disponibles en ZigBee.

PAN coordinator (Coordinador de Red de Área Personal)

(FFD Full Function Device) Dispositivo de Funcionalidad Completa

(RFD Reduced Function Device) Dispositivo de Funcionalidad Reducida

Sin lugar a dudas, una de las mayores aportaciones del ZigBee y el que mayor interés está despertando a las empresas desarrolladoras de productos, es la topología malla o mesh network por el que cualquier dispositivo ZigBee puede conectarse con otro dispositivo usando a varios de sus compañeros como repetidores. A este se le conoce como enrutado multisalto, primero hace llegar la información al nodo ZigBee vecino, el cual puede además ser coordinador de la red, para así llegar al nodo destino, pasando por todos los que sean necesarios. De esta manera cualquier nodo ZigBee puede hacer llegar los datos a cualquier parte de la red inalámbrica siempre y cuando todos los dispositivos tengan un vecino dentro de su rango de cobertura.

1.4.10 COMPARATIVAS ZIGBEE – BLUETOOTH – WLAN

- **BLUETOOTH.-** Es un popular sistema de comunicación inalámbrico basado en el estándar IEEE 802.15.1. Bluetooth trabaja a una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps. Se puede ver que Bluetooth y ZigBee tienen similares corrientes en transmisión, pero ZigBee tiene un recurso mejor, más baja corriente en modo espera (standby). Esto es debido a que los dispositivos en redes Bluetooth deben dar información a la red frecuentemente para mantener la sincronización, así que no pueden ir fácilmente a modo dormido (sleep).

Tabla 1.4: Comparativas Zigbee – Bluetooth – WLAN.

Zigbee	Bluetooth	WLAN
<ul style="list-style-type: none"> • Estándar 802.15.4 • 250 Kbps • TX: 35 mA • Standby: 3uA 	<ul style="list-style-type: none"> • Estándar 802.15.1 • 1 Mbps • TX: 40 mA • Standby: 200 	<ul style="list-style-type: none"> • Estándar 802.11 • Hasta 54 Mbps • TX: Mayor a 400 mA

<ul style="list-style-type: none"> • 32 – 60 Kb memoria • Iluminación, sensores, control remoto • Red en malla, punto a punto, punto a punto multipunto 	<ul style="list-style-type: none"> • uA • Mayor a 100 Kb memoria • Telecomunicaciones, Audio • Punto a punto multipunto 	<ul style="list-style-type: none"> • Standby: 20 mA • Mayor a 100 Kb memoria • Internet, etc. • Punto a punto multipunto
--	---	--

- **Wi-Fi o WLAN (Wireless Local Area Network).**- Es una red que requiere la actividad casi ininterrumpida de los dispositivos en la red. La ventaja de este estándar es la cantidad tremenda de datos que se pueden transferir de un punto a multipuntos, pero se puede ver que la corriente en transmisión es alta, solamente ZigBee brinda la flexibilidad de la conexión de redes en malla. Las aplicaciones ZigBee son típicamente muy simples. La potencia está en la conexión de redes y el hecho de que los dispositivos end point de ZigBee puedan dormir.

1.4.11 APLICACIONES²¹

El estándar ZigBee puede ser implementado para la monitorización y para aplicaciones de control. Por lo tanto, los mercados como la automatización de edificios y hogares, la atención sanitaria, control industrial, control de alumbrado y control comercial, son los principales campos de aplicación.

²¹ www.seccperu.org/files/ZigBee.pdf



Figura 1.19: Aplicaciones de Zigbee.

- **AUTOMATIZACIÓN DE EDIFICIOS Y HOGARES.-** Seguridad, alarmas, control del aire acondicionado, lectura de contadores de agua, gas, electricidad, control de iluminación, control de accesos, control de riego, etc.
- **CONTROL INDUSTRIAL:** Control de procesos, sensores de temperatura, instrumentación remota, etc.

Además, debido a su baja velocidad de transmisión de datos y su naturaleza de bajo consumo, también entra en los mercados del control remoto para la electrónica de consumo y lo que se llaman Dispositivos para la Interfaz Humana (HID), como teclados, ratones y joysticks.

Como características deseables de sistemas basados en ZigBee, la instalación debe ser automática o semiautomática, con el propósito de que los consumidores puedan poner redes inalámbricas fácilmente. Además, añadir nuevo hardware a un sistema existente debe ser sencillo, debido a que ZigBee reemplaza cables y otros sistemas inalámbricos, el coste debe ser bajo para hacer el cambio a ZigBee más ventajoso. Esto se asegura teniendo en cuenta que se pueden poner hasta 100 redes de ZigBee y todavía funcionar, ya que los dispositivos “end point” de la red pueden funcionar hasta 2 años con baterías del tipo AA y AAA.

1.5 TRANSCEPTOR

1.5.1 INTRODUCCIÓN

Transceptores son dispositivos de estado sólido que pueden transmitir y recibir datos, que combina las funciones de un receptor y un transmisor, es así que un módulo ZigBee puede cumplir su función como repetidor convirtiéndose en Transceptor.

Los transceptores manejan señales analógicas y digitales usando cables o tecnología inalámbrica.²²Ellos se usan comúnmente en la telefonía, las redes de computadoras, radio y tecnología. Transceptores popularmente también se utiliza en las redes de área local (LAN) y redes de Ethernet. Cuando se utiliza para transmitir señales de radio frecuencia, se realizan con dos vías de radio que transmiten y reciben señales en modo medio dúplex.

1.5.2 TIPOS DE TRANSCEPTORES

- **TRANSCEPTORES DE RED.-** Transceptores de red transmiten y reciben señales en una LAN. Normalmente están incorporados en la tarjeta de interfaz de red del LAN. Algunos modelos pueden ser construidos externamente, estos se utilizan en sistemas de redes que no sean de LAN.
- **TRANSCEPTORES DE RADIO FRECUENCIA.-** Transceptores de la frecuencia de radio son diseñados para transmitir y recibir señales de radiofrecuencia. Están disponibles en celulares y los modelos de dos vías.

²² www.pickyguide.es/ordenador_y_software/transceptores_guia.html

- **TRANSCÉPTORES DE FIBRA ÓPTICA.-** Transceptores de fibra óptica usan cables de fibra óptica para recibir y transmitir señales. Por lo general son diseñados para trabajar con señales digitales. Los cables de fibra óptica pueden funcionar como canales independientes cuando dispuestos en paralelo. Sus transmisores y receptores de cable son independientes para gestionar las transmisiones de dos vías.

1.6 INTERFAZ HUMANO- MÁQUINA

1.6.1 INTRODUCCIÓN

Una interfaz Humano - Máquina o HMI (Human Machine Interface) es el sistema que presenta los datos a un operador y a través del cual se controla un proceso. Los sistemas HMI podemos pensarlos como una ventana de un proceso, que puede estar en dispositivos especiales como paneles de operador o en un ordenador. Los sistemas HMI en ordenadores se los conoce también como software HMI o de monitorización y control de supervisión.

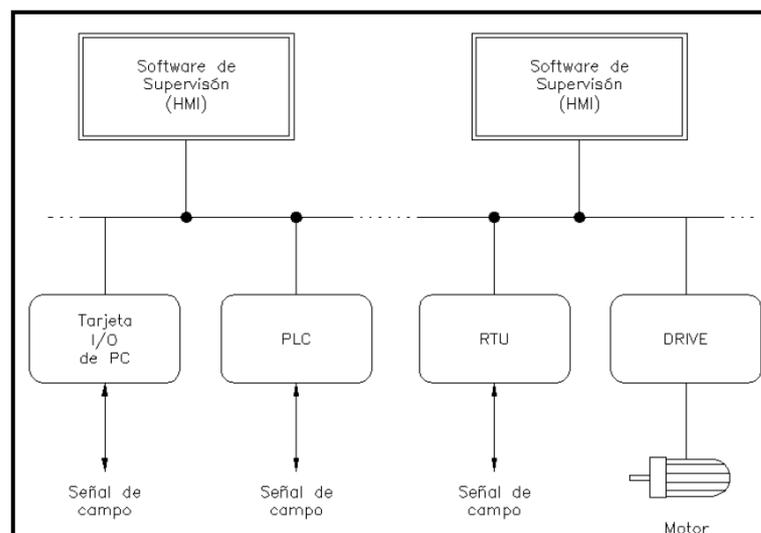


Figura 1.20: Interfaz Humano Máquina.

1.6.2 FUNCIONES DE UN SOFTWARE HMI²³

- **MONITOREO.-** Es la habilidad de obtener y mostrar datos de la planta en tiempo real. Estos datos se pueden mostrar como números, texto o gráficos que permitan una lectura más de interpretar.
- **SUPERVISIÓN.-** Es la función que permite junto con el monitoreo la posibilidad de ajustar las condiciones de trabajo del proceso directamente desde la computadora.
- **ALARMAS.-** Es la capacidad de reconocer eventos excepcionales dentro del proceso y reportarlos. Las alarmas son reportadas basadas en límites de control pre-establecidos.
- **CONTROL.-** Es la capacidad de aplicar algoritmos que ajustan los valores del proceso y así mantener estos valores dentro de ciertos límites. Control va más allá del control de supervisión removiendo la necesidad de la interacción humana. Sin embargo la aplicación de esta función desde un software corriendo en un PC puede quedar limitada por la confiabilidad que quiera obtenerse del sistema.
- **HISTÓRICOS.-** Es la capacidad de muestrear y almacenar en archivos, datos del proceso a una determinada frecuencia. Este almacenamiento de datos es una poderosa herramienta para la optimización y corrección de procesos.

²³ www.iaci.unq.edu.ar/materias/laboratorio2/HMI%5CIntroduccion%20HMI.pdf

1.6.3 TAREAS DE UN SOFTWARE DE SUPERVISIÓN Y CONTROL

- Permitir la comunicación con dispositivos de campo.
- Actualizar una base de datos dinámica con las variables del proceso.
- Visualizar las variables mediante pantallas con objetos animados.
- Permitir al operador enviar señales al proceso, mediante botones, controles ON/OFF, ajustes continuos con el mouse o teclado.
- Supervisar niveles de alarma y alertar/actuar en caso de que las variables excedan los límites normales.
- Almacenar los valores de las variables para análisis estadístico y/o control.
- Controlar en forma limitada ciertas variables de proceso.

1.6.4 TIPOS DE SOFTWARE DE SUPERVISIÓN Y CONTROL PARA PC

- Lenguajes de programación visual como Visual C++ o Visual Basic. Se utilizan para desarrollar software HMI a medida del usuario, Una vez generado el software el usuario no tiene posibilidad de re-programarlo.
- Paquetes de desarrollo que están orientados a tareas HMI. Pueden ser utilizados para desarrollar un HMI a medida del usuario y/o para ejecutar un HMI desarrollado para el usuario. EL usuario podrá re-programarlo si tiene la llave(software), por ejemplo FIX Dynamics, Wonderware, PCIM, Fcatory Link, WinCC.

Los paquetes orientados a HMI facilitan las tareas de diseño de la siguiente manera:

- Incorporan protocolos para comunicarse con los dispositivos de campo más conocidos, Drivers, OPC.

- Tienen herramientas para crear bases de datos dinámicas.
- Permiten crear y animar pantallas en forma sencilla.
- Incluyen gran cantidad de librería de objetos para representar los dispositivos de uso en la industria como: motores, tanques, indicadores, interruptores, etc.

1.6.5 ESTRUCTURA GENERAL DE UN HMI²⁴

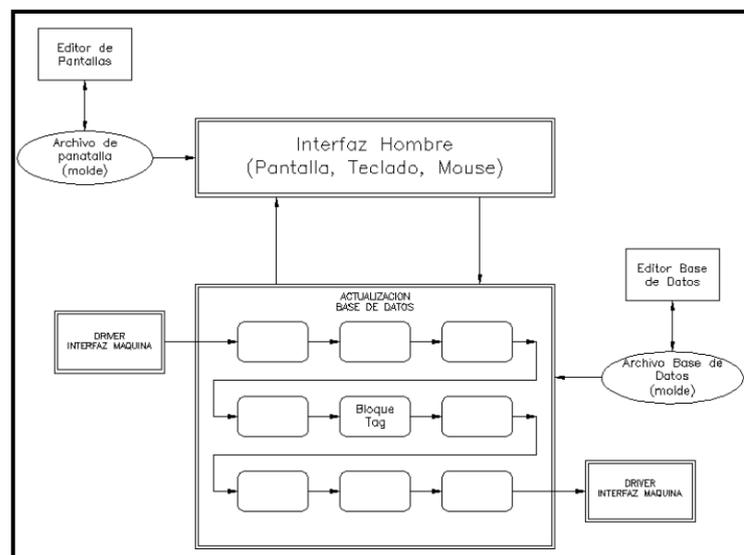


Figura 1.21: Funcionamiento de programas y archivos

Los software HMI están compuestos por un conjunto de programas y archivos. Existen programas para diseño y configuración del sistema y otros que son el motor mismo del sistema. En la figura 1.21 se muestra cómo funcionan algunos programas y archivos importantes. Los rectángulos representan programas y las elipses representan archivos. Los programas que están con recuadro simple representan programas de diseño o configuración del sistema, los que tienen doble recuadro representan programas que son el motor del HMI.

²⁴ www.iaci.unq.edu.ar/materias/laboratorio2/HMI%5CIntroduccion%20HMI.pdf

Con los programas de diseño, como el editor de pantalla se crea moldes de pantalla para la visualización de datos del proceso. Estos moldes son guardados en archivos y almacenan la forma como serán visualizados los datos en las pantallas²⁵.

- **INTERFAZ HUMANO.-** Podemos referirlo a un programa que se encarga de refrescar las variables de la base de datos en la pantalla, y actualizarla, si corresponde, por entradas del teclado o mouse. Este programa realiza la interfaz entre la base de datos y el hombre. El diseño de esta interfaz está establecido en el archivo molde archivo de pantalla que debe estar previamente creado.
- **BASE DE DATOS.-** Es el lugar de la memoria de la computadora donde se almacenan los datos requeridos del proceso. Estos datos varían en el tiempo según cambien los datos del proceso, por esta razón se denomina base de datos dinámica. La base de datos está formada por bloques que pueden estar interconectados. La creación de la base de datos, sus bloques y la relación entre ellos se realiza a través del editor de base de datos.
- **DRIVER.-** La conexión entre los bloques de la base de datos y las señales del proceso se realiza por medio de drivers. Estos drivers manejan los protocolos de comunicación entre el HMI y los distintos dispositivos de campo, siendo entonces la interfaz hacia la máquina.
- **BLOQUES (TAGS).-** La base de datos está compuesta por bloques. Para agregar o modificar las características de cada bloque se utiliza el editor de la base de datos. Los bloques pueden recibir información de los drivers u otros bloques y enviar información hacia los drivers u otros bloques.

²⁵ www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/hmi.pdf

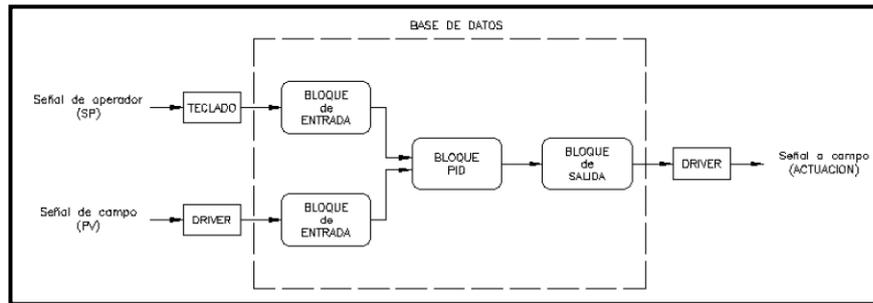


Figura 1.22: Bloques estructurados en cadenas para procesar una señal

Las funciones principales de los bloques son:

- Recibir datos de otros bloques o al driver.
- Enviar datos a otros bloques o al driver.
- Establecer enlaces (links) a la pantalla (visualización, teclado, mouse).
- Realizar cálculos de acuerdo a instrucciones del bloque.
- Comparar los valores con umbrales de alarmas
- Escalar los datos del driver a unidades de ingeniería.

CAPÍTULO II

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

2.1 ESPECIFICACIONES DE LOS REQUISITOS DEL SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DE CLORACIÓN EN FORMA REMOTA CON TECNOLOGÍA ZIGBEE.

Los sistemas y dispositivos que integren el sistema de cloración de agua en forma remota deben constar de requerimientos mínimos, basados principalmente en el protocolo de comunicación zigbee para formar una red con topología tipo malla que permita la comunicación en forma de repetidores para la manipulación de datos de forma inalámbrica con el mínimo consumo de energía.

2.1.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DE CLORACIÓN EN FORMA REMOTA CON TECNOLOGÍA ZIGBEE.

El sistema de control y monitoreo de cloración de agua en forma remota con tecnología zigbee debe constar de los siguientes requerimientos:

- Funcionalidad de los dispositivos zigbee para que trabajen a largas distancias en forma de repetidores con una red con topología tipo malla.
- Constatar de un coordinador para recepción de datos de los módulos repetidores y comunicación serial con el PLC.
- Monitoreo de los niveles de baterías de cada una de las estaciones repetidoras.

- Monitoreo de los niveles de alcalinidad del agua de forma remota.
- HMI para el monitoreo de las baterías y control de la cloración en el agua.

2.2 DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CLORACIÓN DE AGUA CON TECNOLOGÍA ZIGBEE.

Este sistema permite controlar los niveles de cloro residual situados en el agua permisibles para el consumo humano, está compuesto de cuatro módulos repetidores, un módulo coordinador y un sistema de control a cargo de un controlador lógico programable.

Los cuatro módulos repetidores se encuentran distribuidos en tres estaciones dedicados a una función específica.

La primera estación denominada estación PH está conformada por dos baterías de alimentación, dos paneles solares, un sensor de PH, un circuito acondicionador de señales, y un módulo xbee. Esta estación está dedicada a la toma de los niveles de alcalinidad presentes en el agua extendida hacia la parte sur de la ciudad de Latacunga, debido a la carencia de suministro de energía eléctrica se incorporo dos baterías de 12 voltios en corriente continua para la alimentación del sensor de PH, el circuito acondicionador de señal y módulo xbee además las baterías serán recargadas permanentemente mediante el uso de paneles solares.

El módulo xbee se encarga de recibir la señal del circuito acondicionador para transmitir en forma inalámbrica mediante protocolo de comunicación zigbee los niveles de alcalinidad proporcionados por el sensor de PH y los niveles de baterías.

La segunda estación denominada ERPM²⁶ se creó debido a la dificultad de transmitir las señales de la estación PH a la estación El Calzado de manera directa por causa de la irregularidad en el terreno y está dedicada a repetir la señal enviada por la primera estación y los niveles de sus baterías mediante el protocolo de comunicación zigbee.

Esta estación consta de dos módulos xbee colocados de manera independiente cada uno de estos con su batería de alimentación, un panel solar y su circuito acondicionador de señales.

Los circuitos acondicionadores de señales sirven para acoplar las señales enviadas por las baterías a los módulos xbee para enviar los niveles de voltaje de cada una de estas estaciones repetidoras a la estación de control El Calzado.

La tercera estación denominada estación el calzado se ubica en la planta de potabilización del mismo nombre, se la creó para la recepción de datos de las estaciones repetidoras, control y monitoreo del sistema de cloración, consta de dos módulos xbee, un PLC, una pantalla LCD, un sensor de cloro, una bomba de agua y una servoválvulas proporcional.

Esta estación se encarga de recibir la señal enviada por protocolo de comunicación zigbee de las estaciones de PH y ERPM a través de los dos módulos xbee, el primero trabaja como repetidor para recibir la señal proveniente de la estación ERPM y repetirla al segundo módulo que trabaja como un coordinador.

El PLC²⁷ y segundo módulo xbee se comunica por medio de comunicación serial para la recepción de datos entre las estaciones y el controlador, este a su vez se encarga de recibir las señales emitidas por el sensor de cloro mediante el uso de

²⁶ Estación Repetidora Posicionada en la Montaña

²⁷ Controlador Lógico Programable

un módulo análogo para conocer los niveles de cloro en el agua, con el uso de un control PID²⁸ se controla la apertura y cierre de las servoválvula proporcional para dosificar los niveles de cloro permisible para el consumo humano.

El PLC se encarga del encendido de la bomba de agua que proporciona la alimentación de agua para que el sensor de cloro pueda recolectar datos.

Los datos que adquiere el PLC son visualizados en una pantalla de visualización LCD para el monitoreo de los niveles de alcalinidad, cloro y baterías que posee el sistema de cloración.

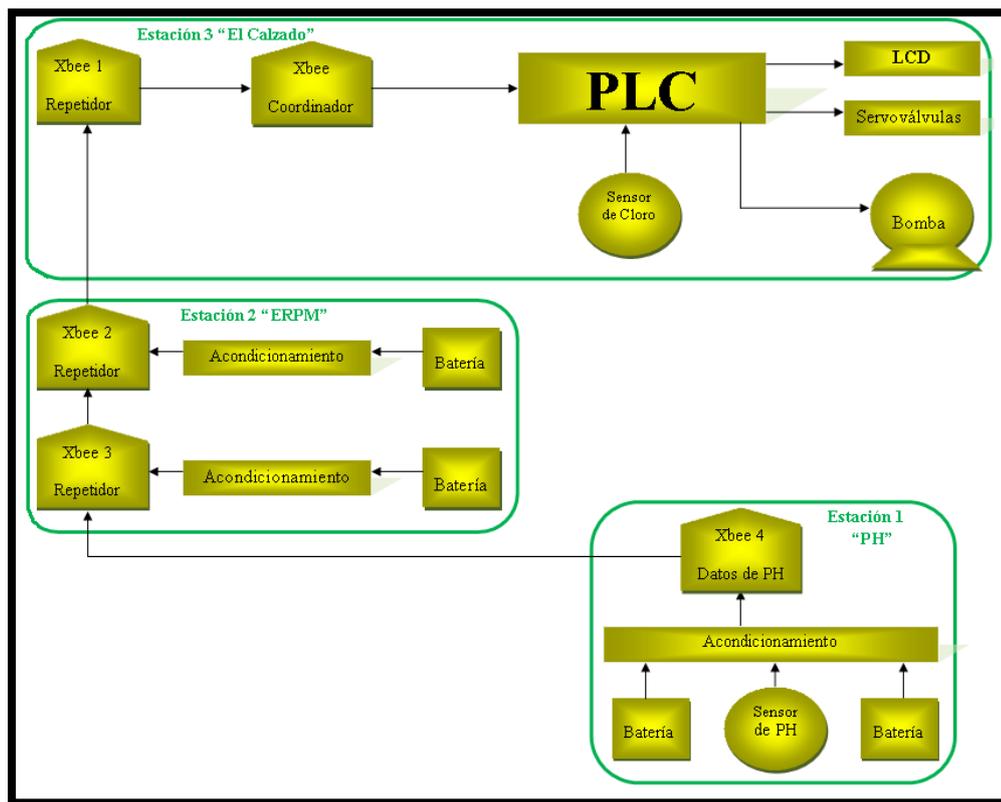


Figura 2.1: Diagrama de Bloques del Sistema

²⁸ Control Proporcional Integral Derivativo

2.3 SELECCIÓN DE COMPONENTES

El sistema elaborado utiliza los siguientes componentes.

2.3.1. SENSOR DE PH S8000²⁹

Para la medición de los niveles de alcalinidad del agua se ha tomado en consideración la robustez del instrumento, fabricante, rango mínimo de PH de 0 – 14 y que posea la facultad de realizar mediciones en línea.

Por estos motivos se ha seleccionado el sensor de PH S8000 de la marca SENSOREX que incluye las siguientes características:

a. Especificaciones del Electrodo

- Rango de PH: 0-14
- Rango de temperatura: 0-100°C
- Gama de presión: 0-100 psi
- Velocidad de respuesta: 95% en 5 segundos

b. Especificaciones Eléctricas

- Voltaje de alimentación: 12 – 24V DC
- Rango de Salida: 4 – 20 mA

²⁹ www.sensorex.com/docs/InstrS8000.pdf

c. Estructura

El sensor consta de un electrodo de PH de modelo S8000CD⁴ que mide los niveles alcalinidad del agua en línea mediante un mini proceso de electrolisis, este electrodo se conecta al módulo EA899-TC⁴ que incorpora una conexión a tierra de acero inoxidable que se alimenta con el módulo EM802PH⁴ que es un transmisor de 4-20mA alimentado en bucle ciego que está calibrado de fábrica y no es ajustable. Se requiere una fuente de alimentación externa de 12-24V en DC, La salida de 4-20mA del módulo EM802PH⁴ será compensado por temperatura a través de la RTD PT1000 que estará en el módulo EA899-TC⁴ para al final del mismo conectar el cable S853⁴ transmitirá la señal de salida del electrodo.



Figura 2.2: Sensor de PH

2.3.2. MÓDULO XBEE XBP24-DM³⁰

Debido a la necesidad de elaborar una comunicación inalámbrica a larga distancia de manera segura y económica se escogió el protocolo de comunicación zigbee capaz de establecer redes tipo malla para que la señal de origen pueda encontrar su destino final superando el problema de la irregularidad del terreno, debido a ello se escogió el módulo XBP24-DM de la marca DIGI que posee las siguientes características:

³⁰ www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf

a. Especificaciones Técnicas

- Voltaje de alimentación: 2.8 – 3.4 V
- Frecuencia de Operación: 2.4Ghz
- Tasa de transferencia: 250 Kbps
- Corriente de Transmisión: 45 mA
- Corriente de Recepción: 50 mA
- Temperatura de operación: -40°C a +85°C
- Distancia de transmisión exterior con línea de vista: 1500m
- Conector de antena: RP SMA³¹

b. Distribución de Pines

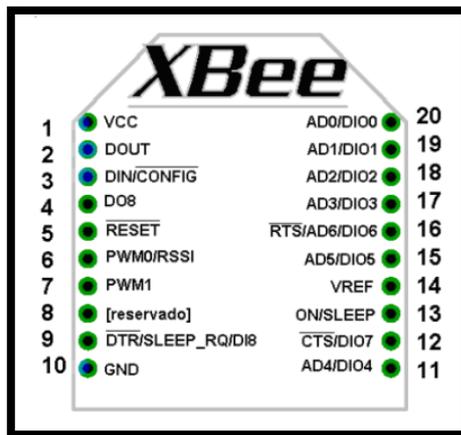


Figura 2.3: Distribución de Pines módulo Xbee

³¹ www.muchotrasto.com/Diferencia%20entre%20conectores%20SMA%20y%20RP-SMA%20de%20RF.php

Tabla 2.1 Descripción de Pines necesarios para el funcionamiento

Pin	Descripción
1	Alimentación 3.3V
2	Salida de datos UART
3	Entrada de datos UART
10	Tierra
11,12 15,16,17,18,19,20	Entradas/salidas: digitales y analógicas
14	Referencia

2.3.3. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE XC3-24RT-E³²

Para el monitoreo y control de las variables generadas por el sistema se necesitó de un dispositivo robusto que se encuentre en la capacidad de manipular señales de entrada y salida análogas así como también la incorporación comunicación serial para la recepción de información emitida por los módulos xbee.

En base a los parámetros controlados se incorporó al proyecto un PLC de marca XINJE de la serie XC3-24RT-E el mismo que posee las siguientes características:



Figura 2.4: PLC XINJE XC3-24RT-E

³² www.oceancontrols.com.au/datasheet/xin/manual-XC.pdf

a. Características Técnicas

- Forma de Programación: Instrucción / Escalera
- Alimentación AC: 110 V
- Fuente de Alimentación: 24V DC
- Entradas: 14
- Salidas: 10
- Marcas: 8000
- Marcas Especiales: 768
- Temporizadores: 640
- Contadores: 640
- Registros: 8000
- Registros Especiales:1024

2.3.4. MÓDULO DE EXPANSIÓN DE E/S ANÁLOGAS XC-E4AD2DA

De toda la gama de los módulos de expansión para señales analógicas que poseen los controladores lógicos programables de la marca XINJE se escogió este debido a que se necesitó manipular tan solo una señal de entrada análoga y otra a la salida.



Figura 2.5: Módulos de E/S Análogas

a. Especificaciones Técnicas

Tabla2.2 Características técnicas módulo de Expansión E/S análogas

Detalles	Características
Voltaje de Alimentación	24V DC
Voltaje de Entrada	0-5v / 0-10v DC
Voltaje de Salida	0-5v / 0-10v DC
Corriente de entrada	0-20mA / 4-20mA
Corriente de Salida	0-20mA / 4-20mA
Vínculo de entrada digital	12 bits binario (0-4095)
Vínculo de salida digital	14 bits binario (0-16383)
Valor de Control PID	0-4095
Precisión	0.8%
Velocidad de conversión en la	15ms por canal

entrada	
Velocidad de conversión a la salida	2ms por canal

2.3.5. SENSOR DE CLORO FCL410D³³

Para la medición de las partes por millón del cloro disuelto en el agua se ha tomado en consideración rango mínimo de cloro residual de 0 – 10 PPM³⁴ y que posea la facultad de realizar mediciones en línea.

Por estos motivos se ha seleccionado el sensor de cloro FCL410D de la marca SENSOREX que incluye las siguientes características:

a. Especificaciones del Electrodo

- Rango de Cloro: 0-10 PPM
- Rango de temperatura: 0-45°C
- Gama de presión: 0-14,7 psi

b. Especificaciones Eléctricas

- Voltaje de alimentación: 12 – 24V DC
- Rango de Salida: 4 – 20 mA

³³ www.midstream.com.au/database/datasheets/SS_C.pdf

³⁴ Partes Por Millón

c. Funcionamiento

El ácido hipocloroso HOCl se difunde a través de la membrana entre el cátodo y solución de la muestra. En el potencial aplicado, sólo ácido hipocloroso se encuentra electroquímicamente reducido.

HOCl se reduce a ion cloruro en el cátodo de oro. Al mismo tiempo, el ánodo de plata se oxida para formar cloruro de plata (AgCl). Cuando la concentración de HOCl en el cátodo se redujo drásticamente por reducción electroquímica, ion hipoclorito se transforma en ácido hipocloroso, y en cierta medida, por transferencia de protones.

La liberación de electrones en el cátodo y la aceptación en el ánodo crea un flujo de corriente, que bajo condiciones normales, es proporcional a la concentración de cloro libre en el medio exterior del sensor. La corriente resultante de baja salida es entonces condicionada a 4-20mA corriente por los circuitos electrónicos a bordo del sensor.



Figura 2.6: Sensor de Cloro

2.3.6. SERVOVÁLVULA PROPORCIONAL SD8203G002³⁵

Debido a que el control de la dosificación de cloro en el agua varia proporcionalmente de acuerdo a la concentración de cloro presente en la misma y dependiendo de la robustez necesaria para un correcto funcionamiento se escogió una servoválvula proporcional con serie SD8203G002 de la marca ASCO.



Figura 2.6: Servoválvula SD8203G002

a. Características Técnicas

Tabla 2.3 Características técnicas módulo de Expansión E/S análogas

Detalles	Características Técnicas
Voltaje de alimentación	0 - 24 V DC
Corriente de Operación	100 – 500 mA
Frecuencia de Operación	200Hz agua o aceite / 300Hz aire o gas
Repetitividad	<3%
Sensibilidad	<2%
Material	Bronce

³⁵www.controlandpower.com/catalog/PDFs/ASCO/ASCO%20355%20Special%20Service%20Valves.pdf

2.3.7. BOMBA DE AGUA QB-70³⁶

Con la necesidad tener un suministro de agua para el sensor de cloro se requirió una bomba de baja potencia para que lleve un bajo caudal de agua mezclada con cloro hacia la membrana del sensor, por tal motivo se eligió una bomba de agua periférica QB-70 de marca MILANO.

a. Características Técnicas

Tabla2.4 Características técnicas Bomba QB-70

Detalles	Características Técnicas
Voltaje de alimentación	110 V AC
Potencia	0.5 hp
Temperatura del Agua	40 °C
Q/max	40 l/min
H/max	40 m
Grado de Protección	IP 44

b. Funcionamiento

La bomba periférica QB70 ha sido diseñada para bombear agua limpia. El cuerpo de la bomba está construido en fundición gris y el impulsor en latón, confiriéndole robustez y un buen comportamiento en las presiones bajas desarrolladas por esta clase de bombas.

³⁶www.motoresczerweny.com.ar/documentos/electrobombas/instalacion/manual_bombas_qb.pdf



Figura 2.7: Bomba periférica QB70

2.3.8. VISUALIZADOR OP320S³⁷

Para la visualización y manipulación de las variables de control del PLC², debido a la facilidad de manejo y por su reducido costo se incorporó un visualizador con serie OP320S de la marca TOUCHWIN.



Figura 2.8: Visualizador OP320S

³⁷www.repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3980/1/T-ESPEL-0660.pdf

a. Características Técnicas

Tabla 2.5 Características OP320S

Detalles	Características Técnicas
Voltaje de alimentación	24V DC
Vida útil	2000 horas
Área de la Pantalla	196mm x 64mm
Botones	7
Comunicación	RS232

2.3.9. PANEL SOLAR ZT5P³⁸

Para cada una de las baterías de los módulos repetidores de la estación ERPM así como del módulo de la estación PH se debe escogió paneles solares que permitan mantener las baterías en plena carga y puedan retransmitir la señal de alcalinidad del agua generada por el sensor de PH de manera continua, de esta forma se ha seleccionado un conjunto de paneles solares de la serie ZT5P de marca ZYTECH.



Figura 2.9: Panel Solar ZT5P

³⁸ www.renova-energia.com/pdf/paneles/Zytech%20ZT5P.pdf

a. Características Técnicas

Tabla2.6 Características Panel Solar ZT5P

Detalles	Características Técnicas
Tecnología	Silicio policristalino
Número de células	36
Dimensiones	78 x 10mm
Dimensiones L x W x H	274 x 209 x 18 mm
Peso	1.0 KG
Potencia Máxima Pmax	5W
Tensión de circuito abierto Voc	22.03 V
Tensión punto máx. potencia Vmpp	18.19 V
Intensidad de cortocircuito Isc	0.31 A
Intensidad de punto máx. Potencia Imp	0.27 A

2.4 DISEÑO DE LOS SISTEMAS

2.4.1 SISTEMA ELECTRÓNICO

Una de las partes fundamentales del sistema de cloración es la parte electrónica de los dispositivos debido a que cada uno de los componentes presentes en el sistema trabajan emitiendo sus propias señales estándar de voltaje o corriente dependiendo el caso, cada una de estas señales deben ser acopladas a los voltajes estándar de

trabajo de los módulos xbee para evitar daños por voltajes elevados y para alargar la vida útil de los dispositivos.

De acuerdo al tipo de señal emitida por los componentes y elementos se ha dispuesto dividir las en las siguientes partes:

a. Acondicionamiento de Voltaje para los módulos xbee.

Los módulos xbee trabajan con un voltaje propio establecido por el fabricante con un máximo de 3,3v en corriente directa, por lo que se redujo el voltaje de alimentación de 12v emitidos por las baterías mediante la utilización de un regulador de tensión LM317³⁹, este regulador de tensión es ajustable en su salida dependiendo únicamente de dos resistencias a su pin de ajuste y en base a la siguiente ecuación:

$$V_{out} = 1,25v(1 + \frac{R2}{R1})v$$

Ec. 2.1

La necesidad de obtener un valor estable de 3.3v a la salida del circuito y aplicando la ecuación anterior se establece los valores de resistencias R2=390Ω y R1=240Ω. Para lo cual se aplica el siguiente circuito.

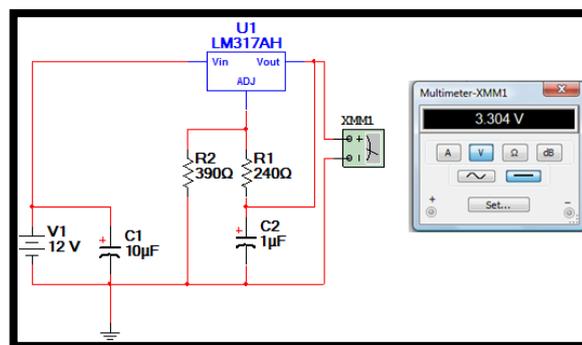


Figura 2.10: Circuito alimentación módulos xbee

³⁹www.tedpavlic.com/teaching/osu/ece327/lab3_vreg/lab3_vreg_lm317_example.pdf

Se coloca los condensadores de 10 μF y 1 μF para atenuar el ruido que puede estar afectando al circuito.

b. Convertidor Corriente(I) Voltaje (V)⁴⁰

El sensor de PH proporciona una señal de salida estándar de 4 a 20mA con una alimentación de 12 a 24v en corriente directa, pero los conversores analógicos digitales de los módulos xbee pueden transmitir únicamente señales de voltaje, existiendo incompatibilidad en el acoplamiento de las señales, para evitar este problema se diseñó un convertidor de corriente a voltaje mediante la utilización del amplificador operacional LM358⁴¹ para generar una tensión constante independiente de la carga y controlado por la corriente emitida por el sensor para ello se aplicó el siguiente circuito:

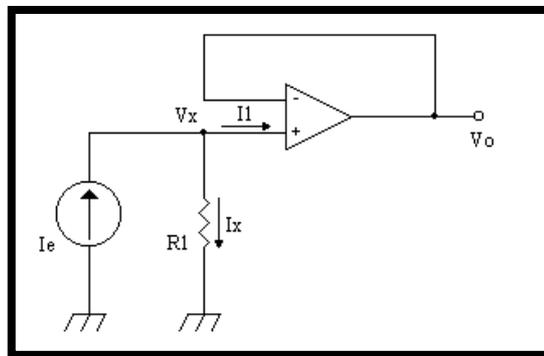


Figura 2.11: Circuito convertidor de corriente a tensión

En función a que la señal de salida del amplificador operacional no debe ser mayor a 3.3v para poder acoplada al módulo xbee y al comportamiento del

⁴⁰ www.electronicafacil.net/tutoriales/CONVERTIDOR-CORRIENTE-A-TENSION.php

¹⁵ Robert F. Coughlin y Frederik F. Driscoll. (1999). Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales (5ª Ed.). Naucalpan de Juárez, Edo México. Prentice Hall.

⁴¹ www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/lm358.pdf

circuito se determina el valor de resistencia a emplear mediante la utilización de la ecuación de tensión de salida del circuito.

$$V_o = I_e \times R_1$$

Ec. 2.2

Obteniendo un valor de resistencia a emplear $R_1=165\Omega$ que sirve para obtener señales de voltaje con un máximo de 3.3v a la salida cuando la corriente máxima del sensor sea de 20 mA, el amplificador operacional está alimentado mediante la tensión estable proporcionada por un regulador de tensión LM7805⁴², se utilizó este regulador debido a que el voltaje de entrada tolerable es de 35v de corriente directa y la alimentación de nuestro circuito es de 24v generados por dos baterías conectadas en serie que sirven de alimentación para el sensor de PH y alimentación para los reguladores de tensión.

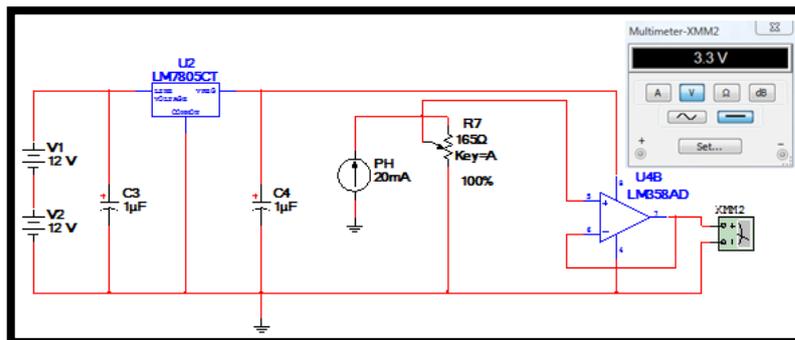


Figura 2.12: Circuito conversor corriente tensión sensor de PH

c. Reductor de los niveles de voltaje de las baterías.

La estación PH así como cada uno de los repetidores ubicados en la estación ERPM¹ no constan de alimentación propia, están alimentadas por baterías aisladas recargables en base a paneles solares, para monitorear los niveles de voltaje proporcionados por las baterías de los repetidores de la estación ERPM¹

⁴² www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf

se elaborará reductores de voltaje en base a un divisor de tensión ajustable entre una resistencia fija $R1= 2.92k\Omega$ conformada por la ubicación en serie de dos resistencias de valor estándar de $2,7k\Omega$ y 220Ω con un potenciómetro lineal de $2k\Omega$, de esta manera se asegura que la caída de tensión sobre el potenciómetro no exceda el valor máximo de $3.3v$ cuando la batería este a la máxima carga y que dicha caída se reduzca linealmente en base a la descarga de la fuente de alimentación, para obtener una tensión de salida independiente a la carga generada por las resistencias del divisor de voltaje se acopla un circuito seguidor de tensión⁴³ mediante la utilización de un amplificador operacional LM358 para obtener un voltaje estable con un máximo $3.3v$ a la salida del circuito cuando la batería este a la máxima carga.

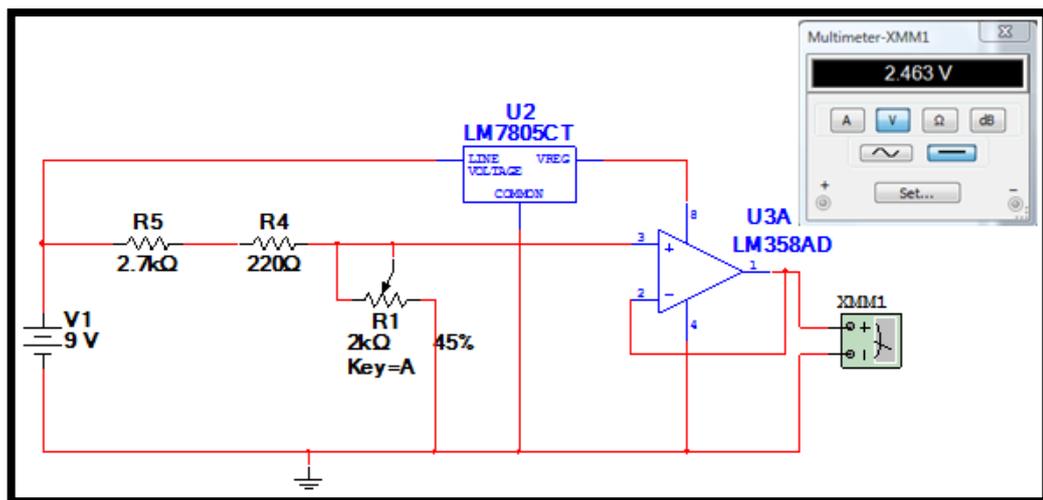


Figura 2.13: Circuito Reductor de Tensión Estación ERPM

En caso de la Estación PH el divisor de tensión ajustable debe estar planteado de manera distinta debido a que posee una alimentación de $24v$ lo que origina que la resistencia fija del divisor sea mayor, en este caso se calculó una resistencia $R1=8.3K\Omega$ conformada por la ubicación en serie de dos resistencias de valor estándar de $1,5k\Omega$ y $6,8k\Omega$ con un potenciómetro lineal de $2k\Omega$ de esta manera se

⁴³ Robert F. Coughlin y Frederik F. Driscoll. (1999). Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales (5ª Ed.). Naucalpan de Juárez, Edo México. Prentice Hall.

asegura que la caída de tensión sobre el potenciómetro no exceda el valor máximo de 3.3v cuando las baterías en serie estén a la máxima carga y que dicha caída reduzca linealmente en base a la descarga de las baterías, al igual que los repetidores de la estación ERPM se debe acoplar al divisor de voltaje un circuito seguidor de tensión para obtener una tensión de salida independiente a la carga generada por las resistencias.

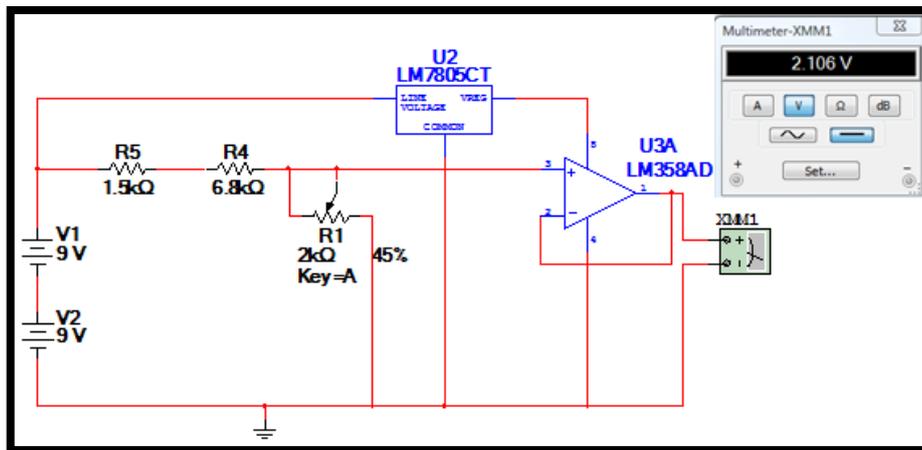


Figura 2.14: Circuito Reductor de Tensión Estación PH

d. Circuito General Repetidores Estación ERPM

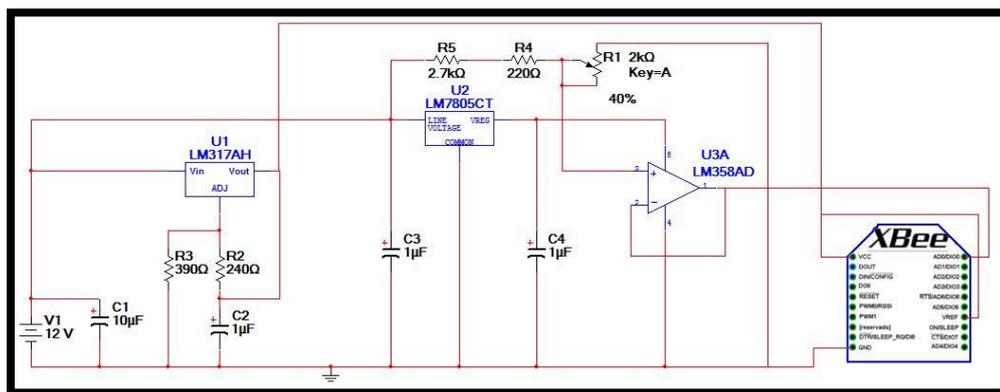


Figura 2.15: Circuito General Repetidores

e. Circuito General Estación PH

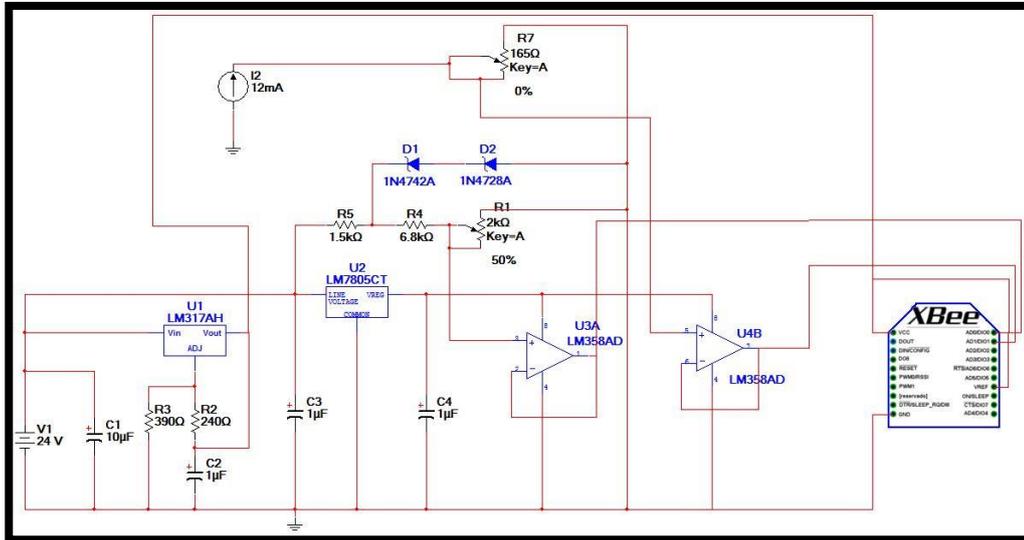


Figura 2.16 Circuito General Estación PH

f. Generador de PWM⁴⁴ para el control de la servoválvula proporcional

Para el control de la servoválvula proporcional se debe variar el voltaje de alimentación de 0 a 24v mediante la utilización de un PID elaborado por el PLC, el problema radicó en que la servoválvula funciona a 300hz de frecuencia y la salida del módulo análogo del PLC establece una señal continua estándar de 4 a 20 mA.

Para ello se diseñó un circuito de control de válvulas para variar el voltaje de alimentación dependiendo de la señal de corriente emitida por el módulo análogo del PLC, mediante la utilización de un PIC⁴⁵ generar un PWM que nos permitiera tener la frecuencia de 300hz necesarios para el correcto funcionamiento de la servoválvula.

⁴⁴ José M. García Iglesias y Emilio J. Pérez Iglesias. (2006). Dispositivos lógicos programables (PLD) México DF, México. Alfaomega grupo editorial S.A de C.V.

⁴⁵ José M. Angulo Usategui, Susana Romeo y Ignacio Angulo. (2003). Microcontroladores PIC diseño práctico de aplicaciones PIC 16F87X, Aravaca, Madrid. McGrawHill.

La alimentación del circuito está determinada por 110V en AC por lo que se elaboró una fuente de alimentación de 24V en DC para poder suministrar de energía a los reguladores de tensión LM7805 para que los amplificadores operacionales y el PIC posean una alimentación constante equivalente a 5V.

Para poder generar un PWM mediante la utilización de un PIC en base a la señal emitida por el PLC se realizó un convertidor de corriente a tensión para cambiar la señal de corriente estándar de 4-20mA emitida por el módulo análogo del PLC a una señal de voltaje en donde se obtuvo una tensión equivalente a 5v cuando la corriente sea de 20mA, con la ecuación del circuito convertidor I/V se obtiene un valor de resistencia $R1=250\Omega$ que se establece con un potenciómetro lineal, surgiendo un inconveniente cuando el valor de corriente es de 4mA se obtiene un valor de tensión equivalente a 1V en lugar de 0V por lo que se requirió acondicionar la señal de salida obtenida por el convertidor I/V de 1-5v a una señal estándar de 0-5v mediante la utilización de un conversor de niveles, obteniendo un valor de resistencias $R1=10K\Omega$ y $R2=13,5K\Omega$.

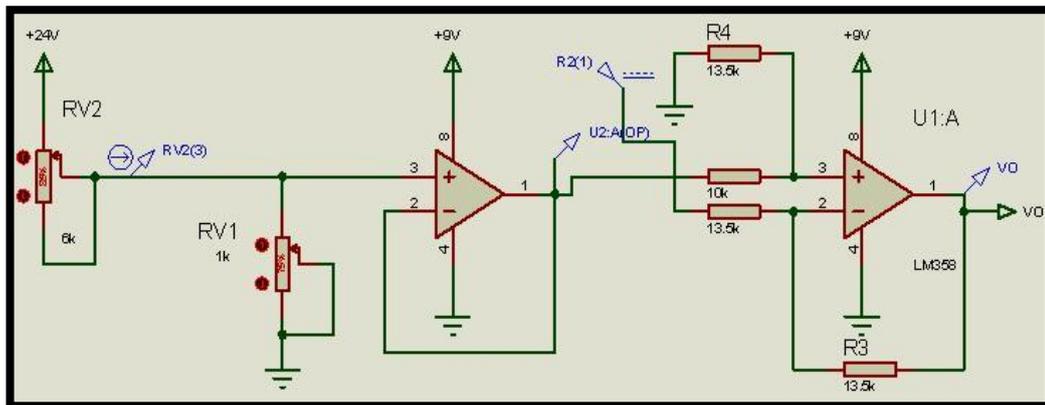


Figura 2.17: Acondicionamiento señal de I/V servoválvulas

Una vez obtenida la señal estándar de 0-5v esta ingresa a la entrada analógica RA0 del PIC16F88⁴⁶ para que en base a la programación genere un PWM con doble selección de frecuencia siendo de 300Hz en caso que la servoválvula

⁴⁶ www.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30487c.pdf

proporcional trabaje con gas o de 200Hz en caso de operar con líquido, ésta selección de frecuencia se la realiza con un pulsador ubicado en la entrada RB7 del PIC, el programa cargado en el microcontrolador se encarga de variar el ancho de banda de acuerdo a la variación de corriente generada por el PLC.

La salida del PWM se encuentra en el puerto RB0 del microcontrolador y va conectado a un transistor de efecto de campo IRZ44N que se encarga de dar variación de alimentación de 0 a 24VDC con la frecuencia establecida a la bobina de la servoválvula proporcional.

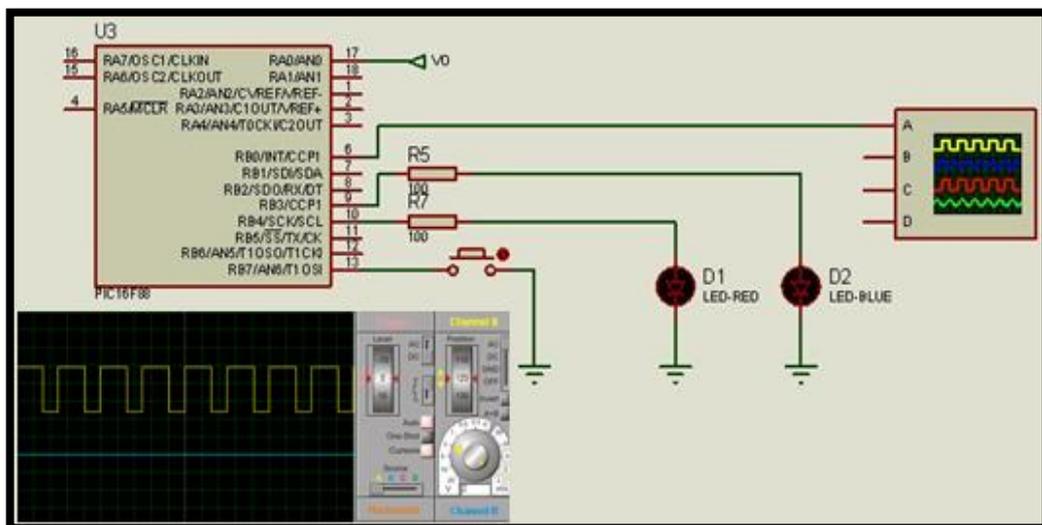


Figura 2.18: Generador de PWM

2.4.2 SISTEMA DE COMUNICACIÓN

a. Comunicación xbee – PLC

Para la comunicación del módulo xbee coordinador con el PLC se utilizó comunicación serial para realizar el intercambio binario de los datos utilizando conectores DB9⁴⁷, para lograr establecer comunicación serial entre el coordinador

⁴⁷ Conector Comunicación Serial de 9 pines

y el PLC se obtuvo una tarjeta XBIB-R-DEV⁴⁸ de marca DIGI propia del fabricante con el propósito de establecer comunicación directa entre los pines 2 y 3 del módulo xbee con el puerto Com2 del PLC, de esta manera y para que puede existir el intercambio de datos lo único que resta por hacer es configurar tanto el módulo xbee coordinador cómo el puerto del PLC a las mismas velocidades de transmisión que en este caso fue de 19200bps.

b. Comunicación Repetidores

Para que los módulos xbee puedan comunicarse entre sí como repetidores, en la configuración de los mismos se los situó como routers y se proporcionó la velocidad de transmisión más baja que poseen para que puedan comunicarse y transmitir a largas distancias sin que exista una pérdida de datos.

2.5 IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE

En esta parte se presenta toda la elaboración de la parte física del sistema de cloración, es decir los diseños y ensamblaje final de los módulos para que cada uno de los módulos tengan un funcionamiento óptimo además de garantizar la vida útil de cada uno de los componentes pertenecientes al sistema de cloración en forma remota.

Una vez diseñados los circuitos, simulados y comprobado el funcionamiento real en un protoboard continua la fase de elaboración de placas electrónicas, ésta fase consiste en elaborar pistas conductoras que sirvan de enlace entre los diversos dispositivos electrónicos que forman parte del circuito.

Cada una de las pistas de las placas fueron diseñadas en Circuit Maker.

⁴⁸ www.ftp1.digi.com/support/documentation/xbibrdev_referenceguide.pdf

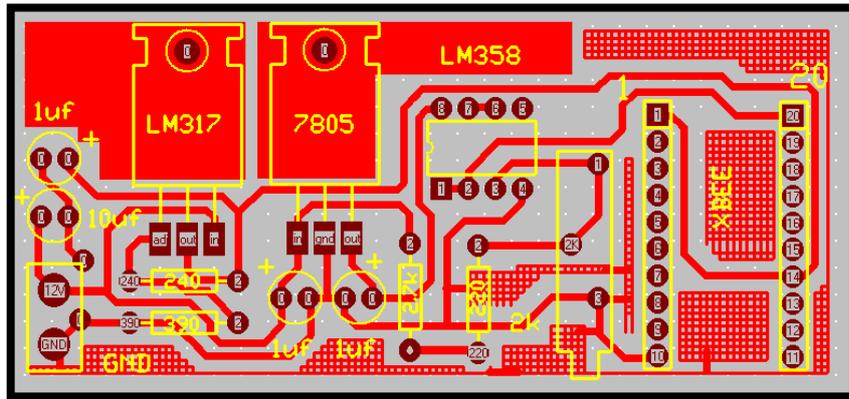


Figura 2.19: Placa Estación Repetidora

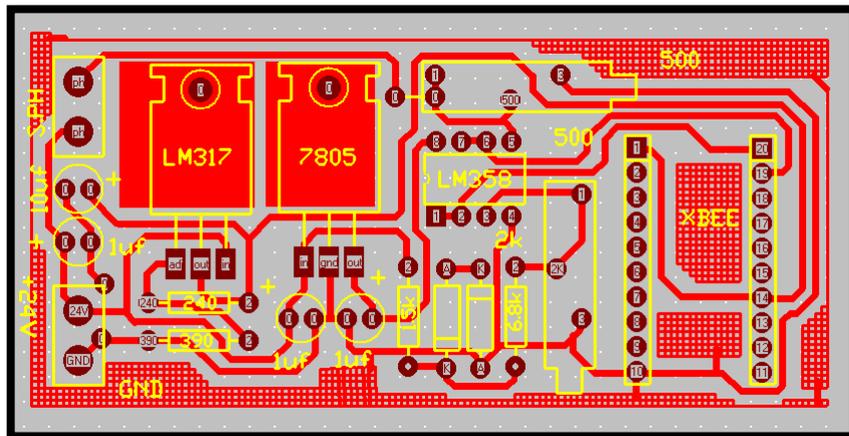


Figura 2.20: Placa Estación PH

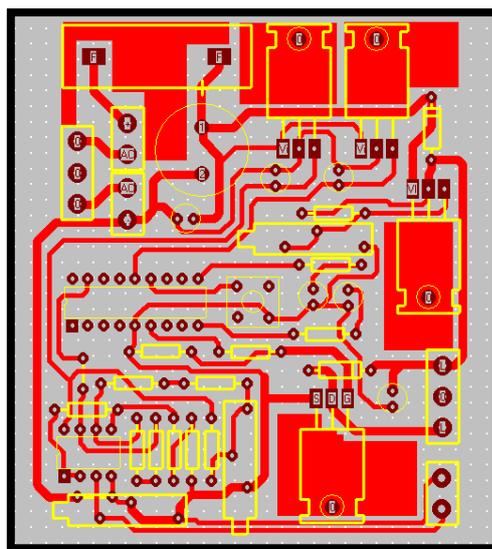


Figura 2.21: Placa Control Servoválvula

De manera continua al diseño y construcción de cada una de las placas, se debe soldar cada uno de los componentes que integran las mismas y revisar su correcto funcionamiento.



Figura 2.22: Placa Repetidores Acoplamiento de Elementos



Figura 2.23: Placa Estación PH Acoplamiento de Elementos

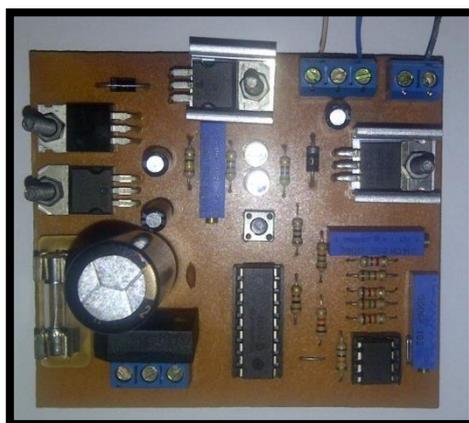


Figura 2.24: Placa Control Servoválvulas Acoplamiento de Elementos

Comprobado el funcionamiento de cada una de las placas se las coloca en las cajas con el resto de componentes que les servirán de protección contra agentes externos.

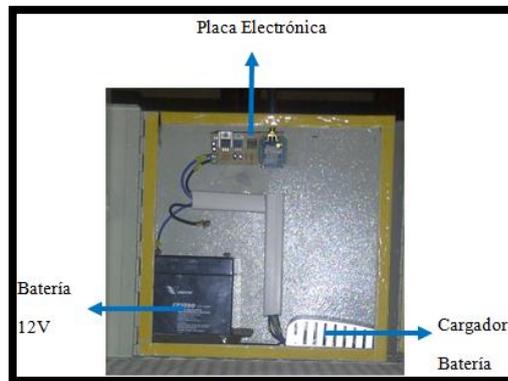


Figura 2.25: Montaje Componentes Caja Repetidores

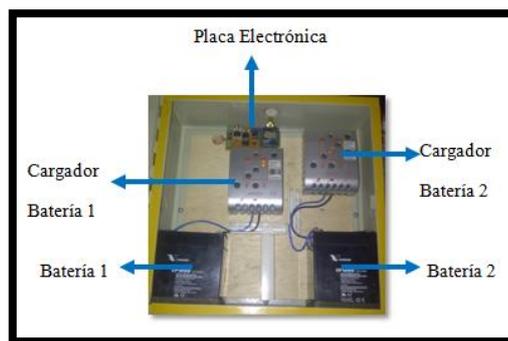


Figura 2.26: Montaje Componentes Caja Estación PH

Una vez implementados los componentes de las cajas se las debe asilar estrictamente para evitar que ingrese el agua al interior de la misma para proteger la vida útil de cada uno de los componentes.



Figura 2.27: Módulos Terminados

Posteriormente se equipó la caja en donde va a estar instalado el PLC, el módulo de expansión de E/S analógicas y la pantalla de visualización además de una caja adicional donde se incorporará el sensor de cloro, éstas cajas de control fueron instaladas en la estación EL CALZADO para que efectúen el monitoreo y control del sistema en el sitio exacto en donde se encuentra la variable de control.

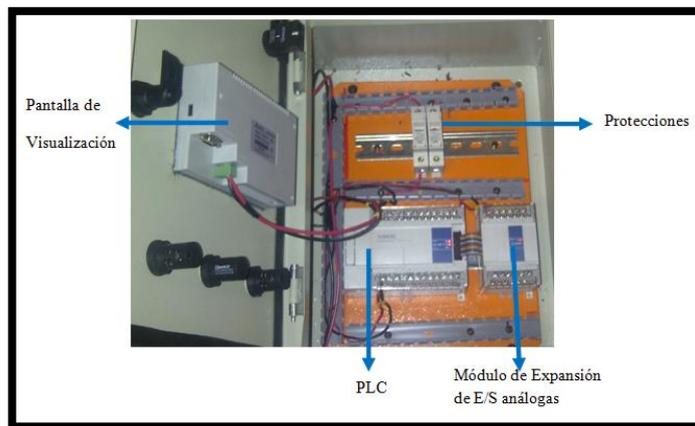


Figura 2.28: Caja Controlador Lógico Programable

En la caja del sensor de cloro se incorporó un Flujómetro porque es necesario enviar niveles de caudal bajo que no excedan los 0.2GPM⁴⁹ para evitar que ingrese burbujas de aire a la membrana del sensor de cloro que trae como consecuencia lecturas de cloro bajas.

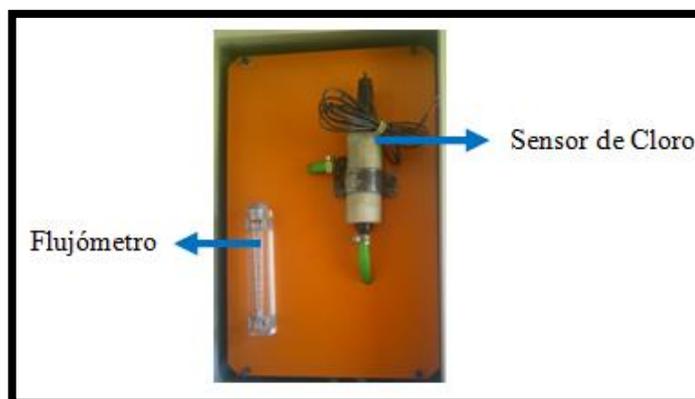


Figura 2.29: Caja Sensor de cloro

⁴⁹ Galones Por Minuto

2.6 IMPLEMENTACIÓN DE LA BOMBA DE AGUA

Para el funcionamiento del sensor de cloro es necesario una alimentación de agua, el principal inconveniente es que en el sitio donde se instaló el sensor no posee una alimentación constante debido a que la planta realiza una conducción de agua por medio de la fuerza de gravedad impidiendo realizar una toma de agua sencilla por motivo que la presión de agua al inicio de la línea es demasiado bajo por ello se necesitó de bomba que sea capaz de suministrar agua al sensor de cloro con un caudal con un rango de 0.2 a 0,8GPM.

El principal dato analizado fue la altura, debido a que la diferencia de altura entre la toma de agua y el sitio donde se instaló la bomba es de 1,5m además que para la instalación de la bomba se utilizó tuberías de media pulgada para llevar el agua desde la toma hasta el sensor de cloro.

2.6.1 CÁLCULOS SELECCIÓN DE LA BOMBA⁵⁰

Diámetro de Succión $D_s = \frac{1}{2}$ in

Diámetro e Descarga $D_d = \frac{1}{2}$ in

$D_s = 0,5$ in = 0,0518 ft; $A = 0,00211$ ft²

$D_d = 0,5$ in = 0,0518 ft; $A = 0,00211$ ft²

$$\mathbf{a.} \quad V_s = \frac{Q}{A} \qquad \qquad \qquad VD = \frac{Q}{A} \qquad \qquad \qquad \text{Ec.2.3}$$

$$V_s = \frac{10,5681 \text{ gal/min}}{0,00211 \text{ ft}^2} \times \frac{1 \text{ ft}^3/\text{s}}{449 \text{ gal/min}} \qquad \text{muestra bomba (Q= 40l =10,5681 gal)}$$

$$V_s = 11,155 \text{ ft/s} = VD$$

b. Succión

$$\text{➤ } NR = \frac{V_s D_s}{\sqrt{\nu}} \left(\sqrt{\text{viscosidad cinemática } \frac{\text{ft}^2}{\text{s}} \text{ a } 60^\circ\text{F}} \right) \qquad \qquad \qquad \text{Ec.2.4}$$

⁵⁰ Mott, Robert L.(2006). Mecánica de Fluidos (6° Ed.). Naucalpan de Juárez Edo. México. Prentice Hall

$$NR = \frac{(11.155 \text{ ft/s})(0.0518 \text{ ft})}{1.21 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{s}}; 60^\circ\text{F} \approx 15.55^\circ\text{C}$$

$$NR = 4.775 \times 10^4$$

$$\text{➤ } \frac{Ds}{E} = \frac{0.0518 \text{ ft}}{1.5 \times 10^{-4} \text{ ft}}$$

$$\frac{Ds}{E} = 345.33 \text{ Rugosidad}$$

➤ Cálculo de la fricción

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(345.33)} + \frac{5.74}{(4.775 \times 10^4)^{0.9}} \right) \right]^2} \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(345.33)} + \frac{5.74}{(4.775 \times 10^4)^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{1277.721} + \frac{5.74}{16258.334} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{[\log(7.82643 \times 10^{-4} + 3.5305 \times 10^{-4})]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{[\log(11.35693 \times 10^{-4})]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{8.67148807}$$

$$f = 0.02883$$

$$f = 0.027$$

$$\text{➤ } K_f = \frac{f L_s}{D_s} \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$\text{➤ } L_s = 0.5 \text{ m} \frac{3.281 \text{ ft}}{\text{m}} = 1.6405 \text{ ft}$$

$$K_f = \frac{(0.02883)(1.6405 \text{ ft})}{(0.0518 \text{ ft})}$$

$$K_f = 0.913$$

$$\text{➤ } k_{pie} = \frac{L_e}{D} \quad f_r \quad \text{Ec. 2.7}$$

$$k_{pie} = 420 f_r$$

$$k_{pie} = 420(0.027)$$

$$k_{pie} = 11.34$$

$k_e = 0.5$ pérdida a la entrada

c. Descarga

$$\text{➤ } Nr = \frac{v_d D_d}{\nu} \quad \text{E.c 2.8}$$

$$Nr = \frac{\left(\frac{11.155 \text{ ft}}{\text{s}} \right) (0.0518 \text{ ft})}{1.21 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{s}}$$

$$Nr = 4.775 \times 10^4$$

$$\begin{aligned} \text{➤ } \frac{Dd}{E} &= \frac{0,0518 \text{ ft}}{1,5 \times 10^{-4} \text{ ft}} \\ \frac{Dd}{E} &= 345,33 \\ \frac{Dd}{E} & \text{ (rugosidad relativa)} \end{aligned}$$

$$\text{➤ } f = 0,02883$$

$$\text{➤ } kf = \frac{fLd}{Dd} \quad \text{E.c 2.9}$$

$$Ld = 1,5\text{m} \times \frac{3,281\text{ft}}{1\text{m}}$$

$$kf = \frac{(0,02883)(5\text{ft})}{(0,0518 \text{ ft})}$$

$$Ld = 4,9215 \approx 5\text{ft}$$

$$kf = 2,728$$

$$\text{➤ } k_{\text{comp}} = 8 \text{ fT} \quad \text{E.c 2.10}$$

$$k_{\text{comp}} = 8(0,027)$$

$$k_{\text{comp}} = 0,216 \text{ (compuerta)}$$

$$\text{➤ } k_{\text{codos}} = \frac{L_e}{D} \text{ fT} \quad \text{E.c 2.11}$$

$$k_{\text{codos}} = 30(0,027)$$

$$k_{\text{codos}} = 0,81$$

$$\text{➤ } k = 1 \quad \text{(depósito)}$$

$$\text{➤ } hL = (K_f + K_{\text{pie}} + K_e) \frac{V_s^2}{2g} + (2k_{\text{comp}} + 5k_{\text{codos}} + K_f) \frac{V_d^2}{2g} \quad \text{Ec 2.12}$$

$$hL = (0,913 + 11,34 + 0,5) \frac{(11,155\text{ft/s})^2}{2(32,2\text{ft/s}^2)}$$

$$+ [2(0,216) + 5(0,81) + 2,7828] \frac{\left(\frac{11,155\text{ft}}{\text{s}}\right)^2}{2(32,3\text{ft/s}^2)}$$

$$hL = 12,753 \frac{(124,434\text{ft/s}^2)}{64,4\text{ft/s}^2} + \frac{(0,432 + 4,05 + 2,7828) \left(\frac{124,434\text{ft}^2}{\text{s}^2}\right)}{64,4\text{ft/s}^2}$$

$$hL = \frac{(1586,906 + 903,988)\text{ft}}{64,4}$$

$$hL = 38,67 \quad \text{ft} \quad \text{lb/lb}$$

$$\text{➤ } h_A = \frac{p_2 - p_1}{\delta} + z_2 - z_1 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + h_L \quad \text{E.c 2.13}$$

$$h_A = \frac{p_2}{\delta} + z_2 + h_L, \delta = 62,4 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}; P_2 = 35 \text{lb/in}^2$$

$$h_A = \frac{35 \text{lb/in}^2 \times 144 \text{in}^2}{62,4 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}} + 5 \text{ft} + 38,67 \text{ft}$$

$$h_A = 124,45 \text{ ft lb/lb}$$

$$Q = 10,5681 \text{ gal/min}$$

$$1 \times 1 \frac{1}{2} - 6$$

Velocidad impulsor = 3 500rpm

$$D_s = 1 \frac{1}{2}$$

$$D_d = 1$$

Dimp mase = 6"

$$\left. \begin{array}{l} \text{➤ } h_A = 124,45 \text{ ft lb/lb} \\ Q = 10,5681 \text{ gal/min} \end{array} \right\} D = 6''$$

$$\text{➤ } \text{Pot} = 0,55 \text{ HP}$$

$$e = 52\%$$

$$\text{NPSHR} = 6,5$$

Datos del fabricante

$$\text{➤ } P_{sp} = 14,7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \times \frac{(12)^2 (\text{in})^2}{1 \text{ft}^2} = 2116,8 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}$$

$$\text{➤ } h_{sp} = \frac{P_{sp}}{\delta}$$

$$h_{sp} = \frac{2116,8 \text{ lb/ft}^2}{62,4 \text{ lb/ft}^3}$$

$$h_{sp} = 33,923 \text{ft}$$

$$h_{vp} = 0,5917 \text{ ft}$$

canga de la presión de vapor @20°C

≈ 60°F

➤ h_s = diferencia de la elevación desde la superficie libre del fluido hasta de la bomba.

Hs= 1,6405 ft≈0,5m

- NPSHa= Cabeza de succión positiva meta disponible.

NPSHa= hsp+hs-hi-hvp

E.c 2.14

NPSHa= (33,923+1,6045-0,95-0,5917)ft

NPSHa= 34,02 ft

NPSHa> 1,1 NPSHR

34,02ft> 1,1(6,5)

34,02ft> 7,15ft ∴ Correctamente seleccionado

2.7 MANIPULACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS XBEE

2.7.1 CONFIGURACIÓN XBEE PRO.

Se utilizó el programa X-CTU para configurar cada uno de los parámetros a utilizar en la comunicación de los módulos en conjunto con la tarjeta XBIB-U-DEV⁵¹ que se enlaza con el computador y se comunica directamente con el programa a través de puerto COM al que se encuentre vinculada.

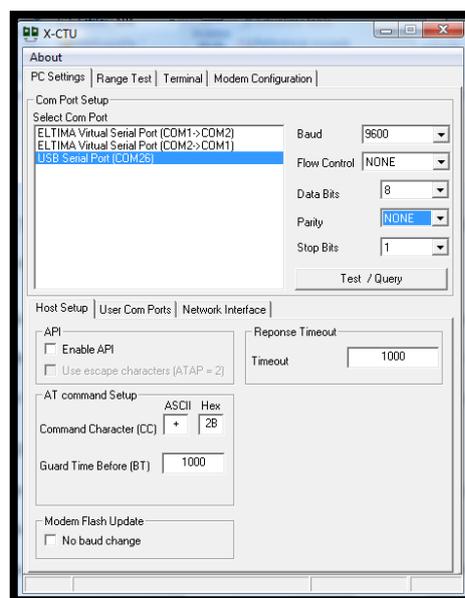


Figura 2.30: Ventana de reconocimiento módulo Xbee

⁵¹ www.ftp1.digi.com/support/documentation/xbibudev_referenceguide.pdf

Para comprobar el correcto funcionamiento del módulo y si la comunicación es efectiva se presiona en la opción Test/Query. Aparece una ventana donde muestra el tipo del módulo la versión del firmware y el número de serie.

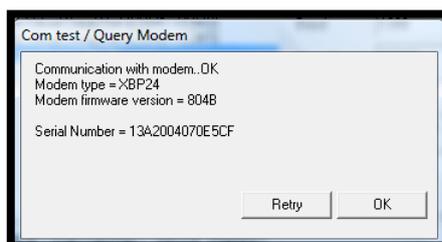


Figura 2.31: Ventana de comunicación

a. Enlace de Comunicación

El requisito indispensable para que los módulos empiecen a transmitir datos es el direccionamiento pero en nuestro caso debido a la irregularidad del terreno y distancia de transmisión los módulos no poseen línea de vista directa entre las estaciones PH y El calzado la solución fue crear la estación ERPM¹ destinada a la repetición de la señal, para montar una red tipo malla de manera que los módulos funcionen como repetidores, es decir, que transmitan la señal desde su emisión propia en la estación PH retransmitan en la estación ERPM¹ para que puedan llegar a la estación el calzado.

El inconveniente principal es que en la ubicación de los módulos se debe determinar lugar y sitio exactos para que la comunicación sea fiable y sobre todo que conserven las antenas línea de vista, la distancia de separación no mayor a los 1500m entre cada una de ellas y que no exista ningún tipo de interferencia, para ello se utilizó antenas con una ganancia de 17dbi⁵² conectados a los módulos xbee digimesh.

⁵² www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl?id=2146

Para garantizar la comunicación entre estaciones se eligió los puntos precisos en donde se colocaron cada una de las estaciones con sus respectivas antenas mediante el apoyo de la aplicación google mapas que nos dotó de las coordenadas de latitud y longitud de cada uno de los puntos de las estaciones.

Tabla2.7 Coordenadas de latitud y longitud para Ubicación de Estaciones

ESTACIONES	LATITUD	LONGITUD
ESTACIÓN PH	-0,92937	-78,59797
ERPM1	-0,92603	-78,59659
ERPM2	-0,92553	-78,59627
EL CALZADO	-0,92554	-78,58934

Para garantizar la comunicación en cada uno de los puntos se utilizó el programa de simulación de radio propagación denominado radio mobile⁵³ que nos ayudó a obtener todos los datos necesario para realizar el radio enlace entre cada uno de los módulos que conforman la red tipo malla.

En el programa Radio mobile se insertó las coordenadas de los puntos establecidos con la aplicación google mapas y se creó lazos de comunicación entre cada una de las estaciones, este programa permitió simular las elevaciones y la irregularidad propia del terreno así como también las pérdidas generadas por la vegetación.

En base a la inserción de las coordenadas se pudo identificar que la comunicación entre las estaciones PH y el calzado resulta imposible debido a la topología irregular del terreno a pesar que se encuentran dentro de una distancia menor a los 1500m, es así como se marca en el mapa con una ruta de color rojo en donde la comunicación resulta imposible y de color verde las rutas en donde la topología del terreno ayuda a tener una comunicación estable.

⁵³ www.ayudaelectronica.com/radio-mobile-software-radio-enlaces/



Figura 2.32: Verificación de la Comunicación entre las Estaciones

Una vez establecidas las estaciones y demostrado que la topología del terreno no interviene en fallas de comunicación entre las estaciones se inserta los datos de potencia de transmisión y sensibilidad de los módulos xbee así como también la ganancia de la antena utilizada y las pérdidas por vegetación estableciendo la simulación de comunicación entre las estaciones, determinando la distancia entre los puntos, los datos de envío y recepción y las pérdidas generadas en la comunicación.

Como punto de partida y considerando que la comunicación de nuestro proyecto es unidireccional desde la estación PH hacia la estación el Calzado pasando por la estación ERP M se elaboró el análisis entre la estación PH y el repetidor ERP M1 obteniendo una comunicación estable a una distancia de 400m aproximadamente además se apreció en los medidores de transmisión y recepción de datos se encuentran al máximo lo que indica que tenemos una comunicación con un bajo nivel de pérdidas y fiable entre estas dos estaciones.

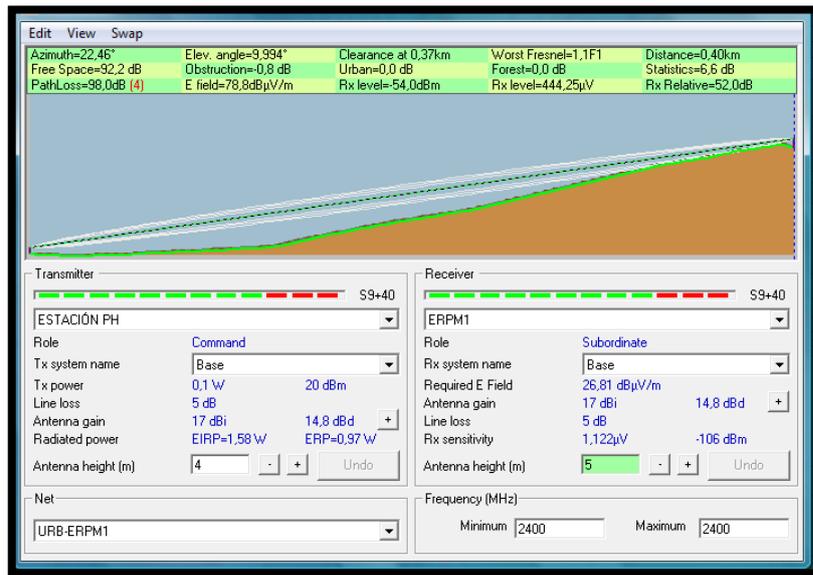


Figura 2.33: Enlace de Comunicación entre Estación PH y ERPM1

Entre las estaciones ERPM 1 y ERPM 2 no existió problemas de comunicación ya que la distancia a la que van a estar ubicadas estas antenas es de 70 m aproximadamente con línea de vista sin ningún tipo de interferencia además que para toda la red se utilizan módulos y antenas de las mismas características presenta en esta parte del enlace de comunicación las menores pérdidas y una comunicación totalmente eficiente.

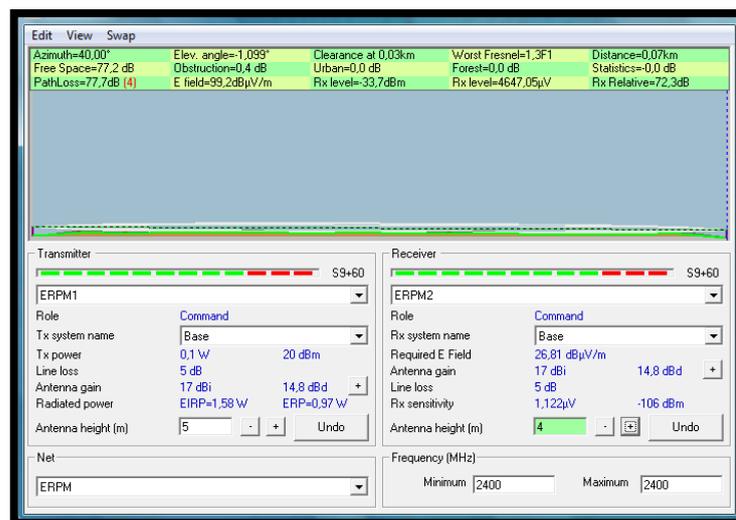


Figura 2.34: Enlace de Comunicación entre Estación ERPM 1 y ERPM 2

En el último tramo de la red se enlazan las estaciones ERPM 2 y el calzado obteniendo una comunicación buena a pesar que estos puntos se encuentra separados a 800 m comprobando que este tramos posee la mayor distancia con respecto a los anteriores pero como poseen una buena línea de vista la comunicación simulada arrojo velocidades de transmisión y recepción similares a las del primer tramo así como las perdidas establecidas se encuentran en niveles bajos llegando a la conclusión que la red se puede instalar en los puntos seleccionados sin tener ningún tipo de inconvenientes entre cada una de las estaciones.

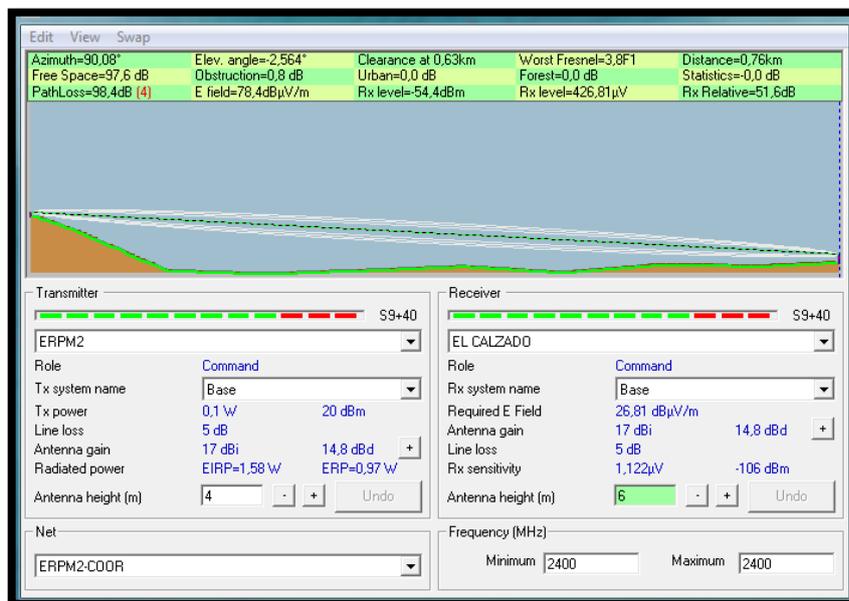


Figura 2.35: Enlace de Comunicación entre Estación ERPM 2 y El calzado

En la figura 2.36 muestra en vista satelital del sitio donde están colocados cada uno de los módulos distribuidos en cada una de las estaciones además se incorpora el sentido del envío de los datos desde la estación PH hasta la estación el calzado pasando por la estación ERPM.

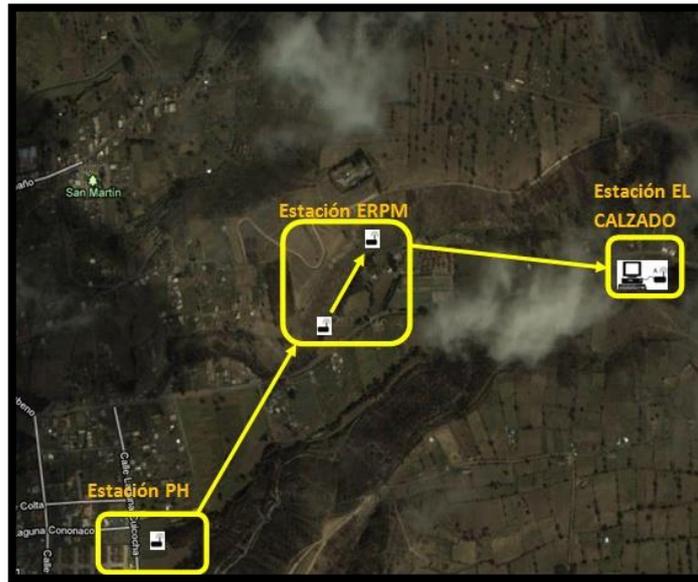


Figura 2.36: Transmisión de Datos módulos xbee

b. Direccionamiento de los Módulos.

La manera de conseguirlo es direccionar todos los módulos que servirán de repetidores como routers y el módulo que recogerá la señal del sensor de PH como end device, en la configuración de todos estos dispositivos anteriormente citados se debe colocar la dirección de destino en bajo (DL) correspondiente a la del módulo coordinador debido a que ésta dirección es propia e independiente de cada módulo, de esta manera los módulos routers y el módulo end device buscaran el camino más corto de la transmitir información al coordinador.

Estación PH	Estación ERP		Estación El calzado
			
M1	M2	M3	M4
DH:13A200	DH:13A200	DH:13A200	DH:13A200
DL:4069142D	DL:4069142D	DL:4069142D	DL:4069142D

Figura 2.37: Direcciones Destino de los módulos xbee routers y end device

Para que el coordinador pueda recibir información de todos los módulos que intervienen en la red se debe colocar la dirección de destino en alto DH=0 y la dirección de destino en bajo DL=FFFF

c. Configuración como End Device

Para la configuración de los módulos en el programa X-CTU se debe ir a la pestaña de Modem configuration y seleccionar la opción read para leer el firmware del módulo xbee al que se realizará los cambios.

Se despliega la lista de parámetros configurables del módulo, en este caso se configuró en la carpeta de Networking la opción coordinador enable y colocar un número 2 que indica que el módulo se lo establecerá como end device, es decir, este módulo únicamente recogerá los datos que entren por sus entradas análogas digitales y las enviará al destino que se crea colocando la dirección propia del módulo coordinador en la carpeta Addressing en la opción de destination address low.

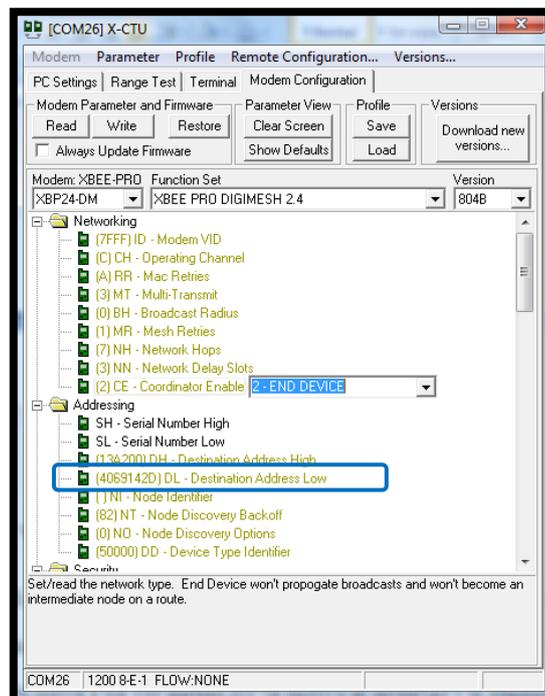


Figura 2.38: Direccionamiento y configuración del módulo con End Device

Además de ello este módulo va a estar instalado en la estación PH, los parámetros que debe transmitir son los niveles de baterías por la entrada D0 y la señal emitida por el sensor de PH por la entrada D1, esto se consigue ubicando a dichas entradas el número 2 que indica que trabajaran como conversores análogo/digitales, igualmente se debe habilitar el modo API⁵⁴ para que la trama de datos enviados por el módulo sean almacenados en un frame con estructura definida para poder descifrar los datos al momento de recibirlos, esto se consigue ubicando un número 1 en la carpeta de Serial interfacing en la opción API Enable.

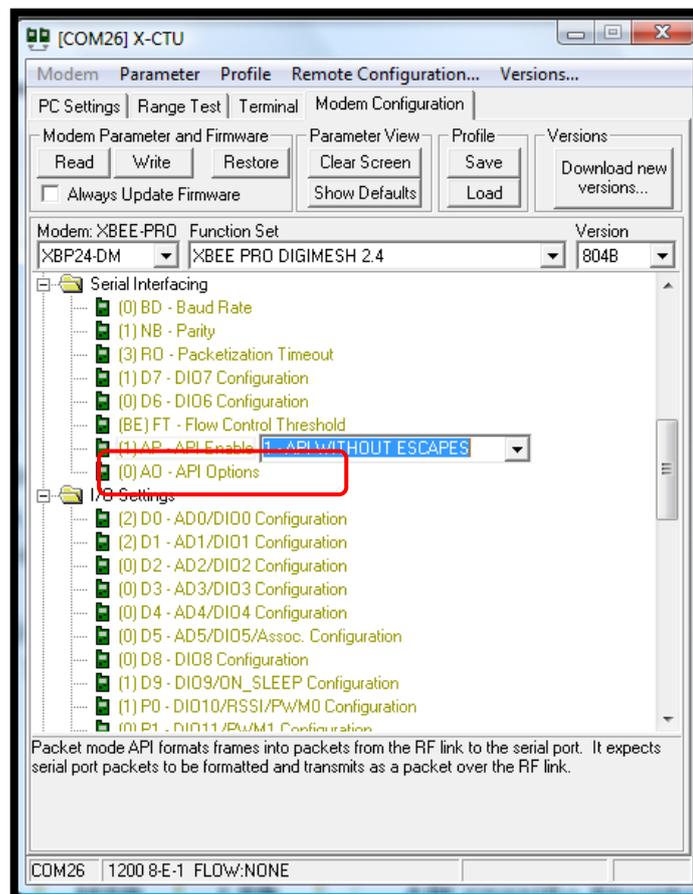


Figura 2.39: Habilitación modo API y entradas D0 y D1 como ADC

⁵⁴www.didacticaselctronicas.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=1352&category_id=150&option=com_virtuemart&Itemid=71&vmcc hk=1&Itemid=7

d. Configuración como Router

En esta configuración se debe colocar en la carpeta de Networking la opción coordinador enable un número 0 que indica que el módulo se lo establecerá como standar router.

Los routers están instalados en la estación ERPM y se los colocan para que sirvan de repetidores de señal, al igual que la configuración end device se habilita el modo API, la entrada DO que servirá para transmitir los niveles de batería del módulo repetidor y se coloca la dirección del coordinador en la opción de destino en bajo para que los repetidores envíen la señal de datos recibida de la estación PH hacia el coordinador y al mismo tiempo envíen la señal generada por cada uno de los repetidores hacia la dirección de destino.

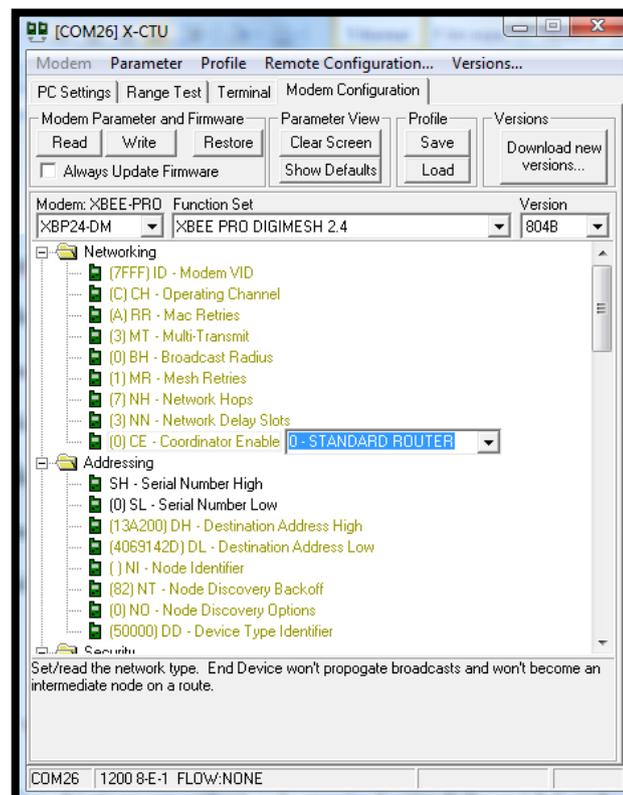


Figura 2.40 Configuración del módulo como Router.

e. Configuración como Coordinador

Para configurar el módulo como coordinador colocar en la carpeta de Networking la opción coordinador enable un número 0 que indica que el módulo se lo establecerá como standar router.

El coordinador está instalado en la estación El calzado y se lo colocó para que reciba señal de las estaciones PH , ERPM y se comunique con el PLC, para conseguir que el módulo trabaje como coordinador se debe colocar en la carpeta de addressing en la opción de destination address high un número 0 y en la opción destination address low un número en hexadecimal FFFF que indica que éste módulo recibe la señales de datos de todos los módulos que intervienen en red. A la par se debe habilitar el modo API para que la trama de datos recibidos tenga una estructura definida.

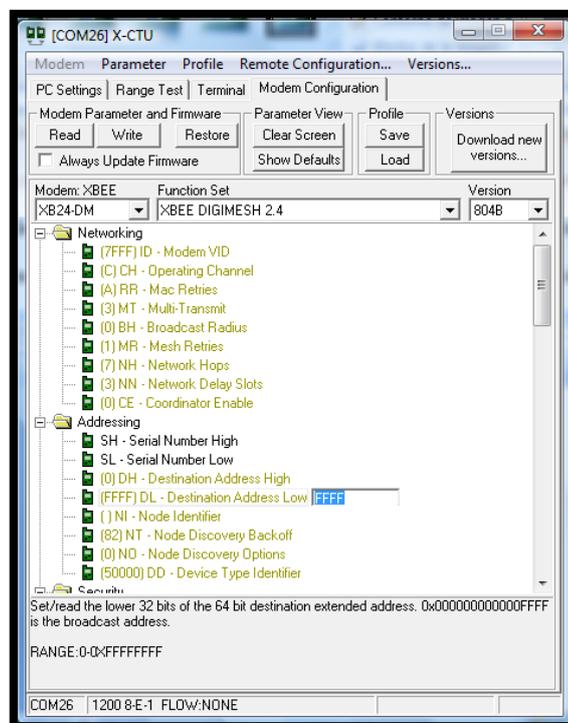


Figura 2.41: Configuración del módulo como Coordinador.

f. Velocidad de Transmisión

Para la manipulación módulos xbee a largas distancias se debe establecer a la más baja velocidad de transmisión que nos facilite el fabricante debido a que a más longitud existe pérdida en la transmisión de datos cuando la velocidad es elevada. Por esto se debe configurar a los módulos de la estación PH, estación ERPM y el Calzado con una velocidad de transmisión de 1200bps, esta configuración se la debe realizar en la carpeta de serial interfacing en la opción de Baud Rate.

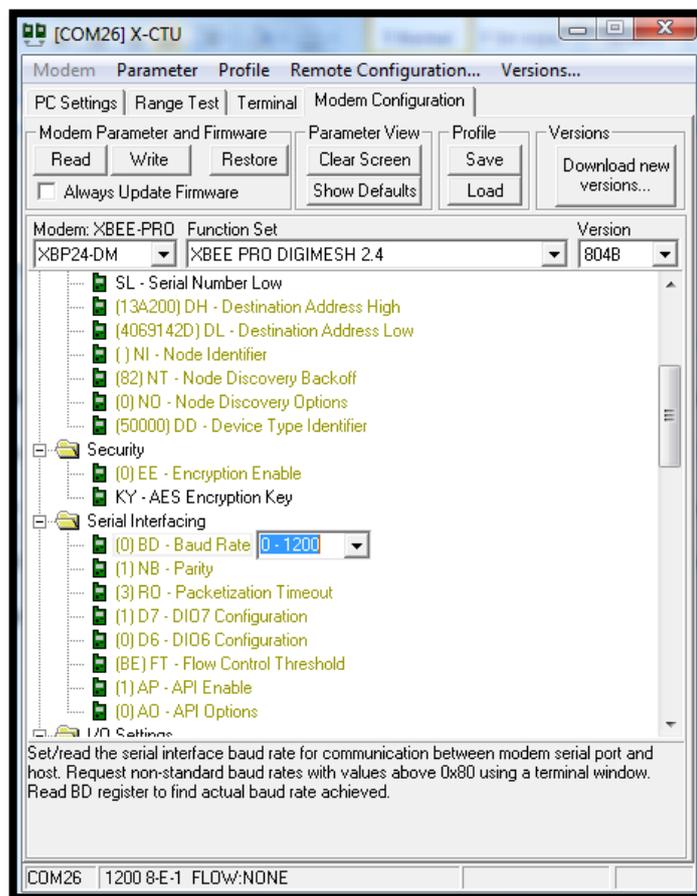


Figura 2.42: Configuración Velocidad de Transmisión.

g. Potencia de Transmisión

Los módulos Xbee Pro en ambiente externo y con línea de vista se pueden comunicar a una distancia equivalente a 1500m, esto se consigue colocando la potencia máxima que pueden entregar los módulos en la carpeta de RF interfacing en la opción power level seleccionando la opción highest y con la ayuda de antenas de alta potencia.

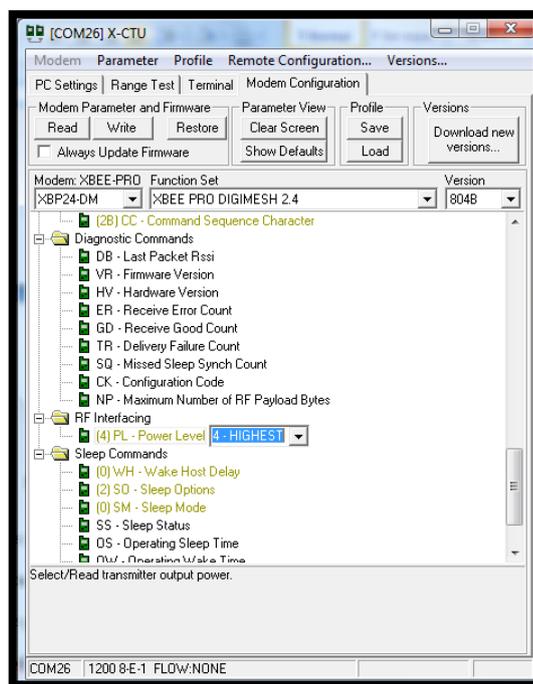


Figura 2.43: Configuración Potencia de Transmisión.

2.8 DISEÑO DE SOFTWARE

El diseño del software de control del sistema de cloración está diseñado en programación tipo escalera en el programa XCPPro propio de la marca XINJE, su diseño central de funcionamiento está dividido en tres ejes fundamentales como son: el funcionamiento del reloj, la recepción de datos mediante el puerto común 2 y el control y diseño del PID mediante la utilización del módulo de extensión analógica.

2.8.1 IMPLEMENTACIÓN RELOJ DEL SISTEMA.

Debido al inconveniente que el PLC no posee un reloj propio listo de calibrar se creó un reloj propio para el sistema mediante un temporizador que sirva de segundero y dos contadores para el minuterero y el horero respectivamente, el mismo que es eje fundamental del sistema de cloración puesto que al reloj están ligadas todas las funciones internas del programa.

La finalidad del reloj es hacer funcionar al programa en horas exactas debido a que la toma de lecturas de cloro se las realiza exclusivamente en los primeros 15 minutos de una nueva hora, además regula la ubicación de los registros de la trama de datos enviados por los módulos xbee y se encarga de mandar las órdenes para la recepción y envío de registros para el funcionamiento del PID.

2.8.2 FORMATO DE COMUNICACIÓN LIBRE.

Para establecer comunicación entre los módulos xbee y el PLC se utilizó el formato en modo de comunicación libre en donde se habilita al puerto común dos del PLC para la recepción de datos.

- Para habilitar el modo de comunicación libre se selecciona en el entorno gráfico del programa la pestaña que nos manifiesta el free communication config para acceder a la configuración de recepción de datos como se especifica en la figura 2.44.

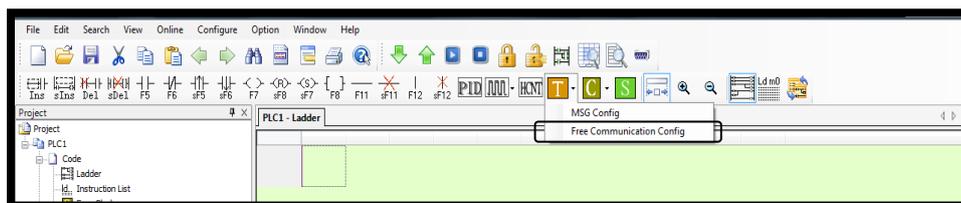


Figura 2.44: Acceso a la configuración de modo de comunicación libre.

- Para la recepción de datos se establece el modo en recepción seleccionando Recv, elegir el registro inicial en donde se almacenan los datos que para la base del programa es el registro D80 y por último se establece el puerto de comunicación dos del PLC como se indica en la figura 2.45.

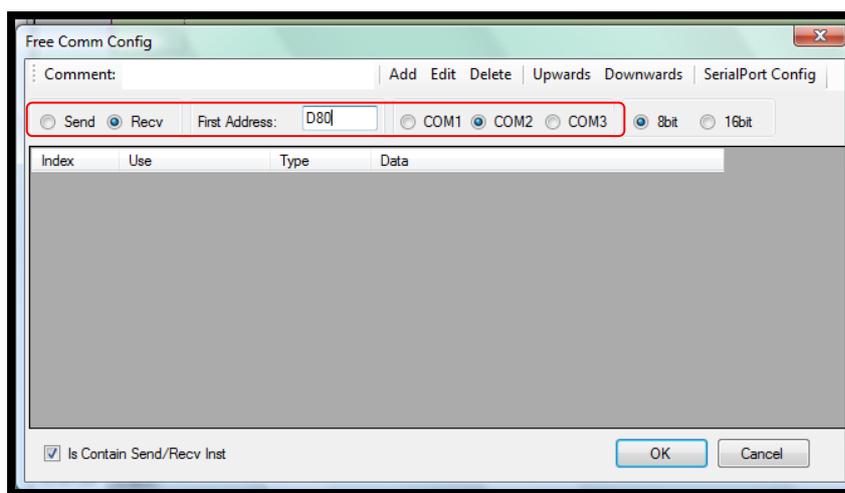


Figura 2.45: Configuración parámetros de recepción de datos.

- De manera posterior se debe acceder a la pestaña de edit para establecer la marca M8226 que es la habilita la recepción de datos de comunicación y libre y configurar la extensión de la trama de 26 bytes puesto que esta es la trama más grande que está llegando de los módulos xbee

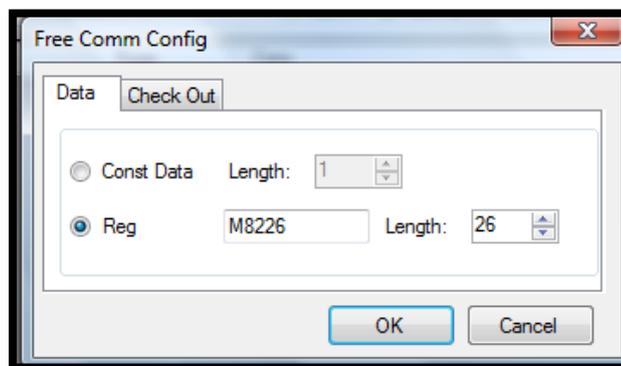


Figura 2.46: Colocación Marca Especial y longitud de la trama

- Una vez configurados estos parámetros se debe dejar los parámetros de comunicación del puerto dos del PLC con una velocidad de 19200BPS similares a los del módulo xbee coordinador para poder establecer la comunicación entre los dos dispositivos

2.8.3 ESTRUCTURACIÓN DEL PID

Para la estructuración del control de dosificación de cloro nos basamos en el control proporcional integral derivativo con autoajuste, lo que realiza este método es una calibración automática de las constantes K_p , K_i , K_d , a medida que la variable de control se va acercando al punto de comprobación que es de 0.5ppm.

Este método se calcula de acuerdo a la siguiente función de transferencia propia del módulo PID integrada en el PLC.

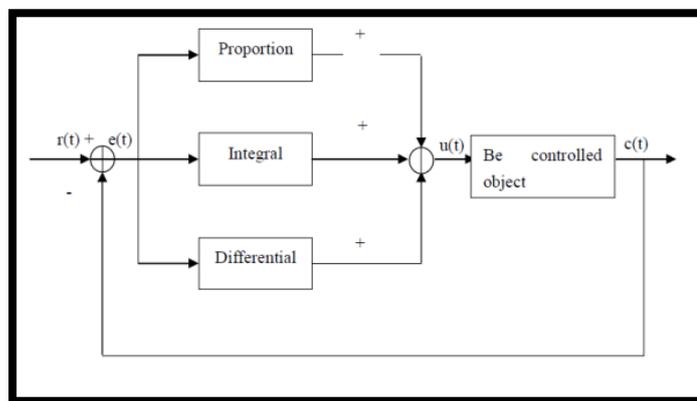


Figura 2.47: Diagrama de control PID

Este diagrama de control establece la siguiente función de transferencia

$$e(t) = r(t) - c(t)$$

$$u(t) = K_p [e(t) + 1/T_i \int e(t) dt + T_D de(t)/dt]$$

Ec. 2.15

El modo de autoajuste va calibrando de manera automática las variables que intervienen en la función de transferencia de acuerdo al tiempo de muestreo de los datos.

- Para establecer el PID en el entorno gráfico del programa se selecciona la pestaña del link de PID.

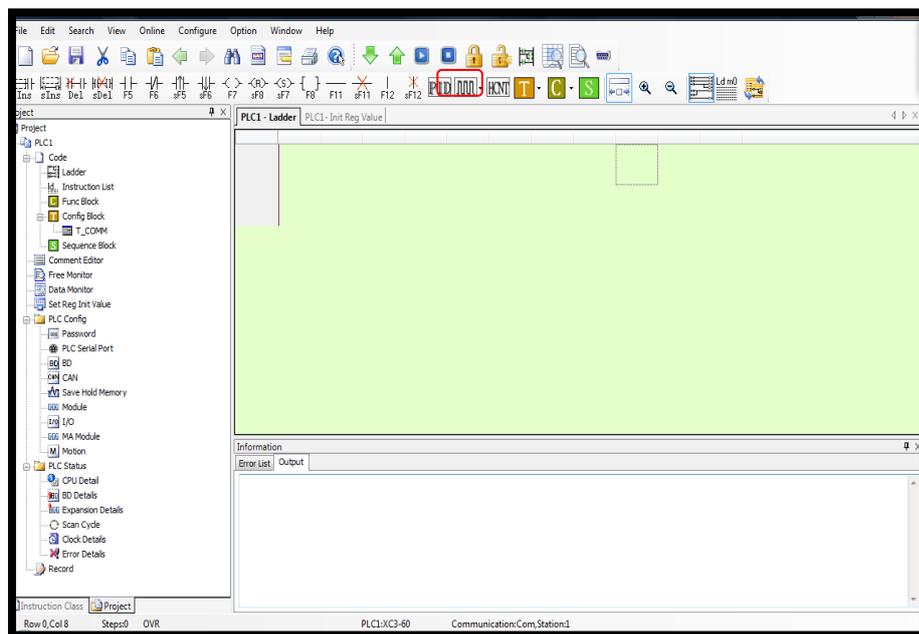


Figura 2.48: Selección PID

- La función de PID ayuda al control de la servoválvula de manera proporcional para controlar la dosificación de los niveles de cloro que van a ser enviados hacia los tanques de captación, esta función va a fichar cuanta es la corriente que se debe enviar hacia la tarjeta electrónica para que la servoválvula realice su apertura proporcional de acuerdo a los niveles de cloro se encuentren en la variable de entrada para ello en la ventana de PID especificada en la figura 2.49 se debe colocar los registros en orden de izquierda a derecha primero el registro que servirá como set point para nuestro programa es el registro D711 a continuación el registro que será la variable de control que está almacenada en el registro D706 el tercer registro se configura por defecto en donde se

especifica el tiempo de muestreo que también es calculado automáticamente por el programa para que en la parte final del estado se coloque la salida por donde estará efectuando el control que es la Y100. En esta ventana se debe seleccionar también el modo automático para que el PID entre en su proceso de autoajuste.

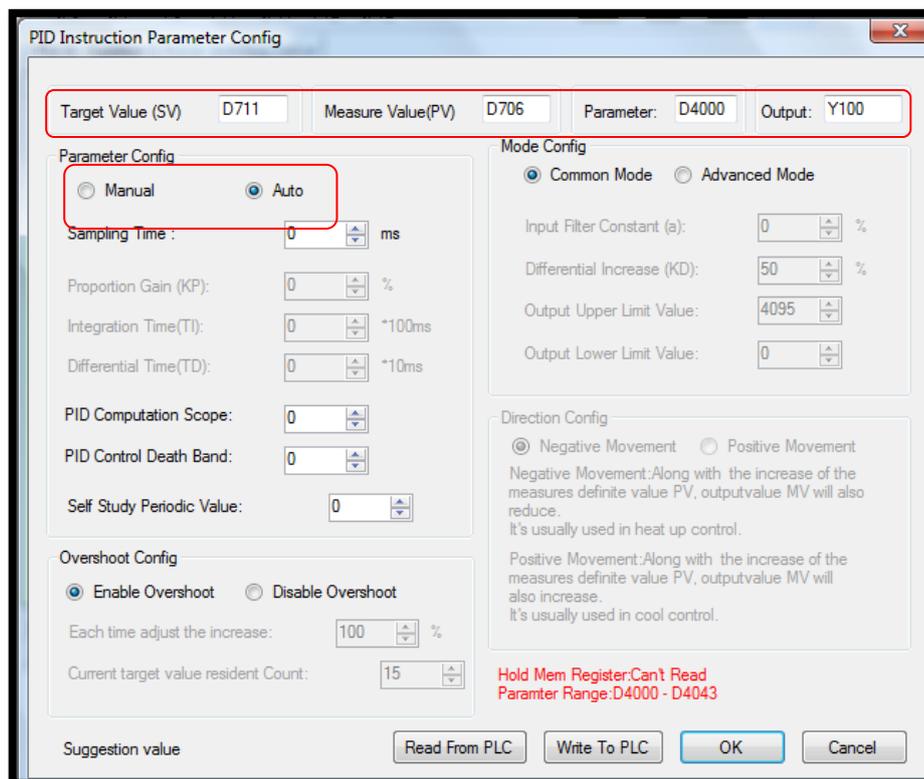


Figura 2.49: Configuración PID

2.8.4 DIAGRAMAS DE FLUJO DEL SISTEMA

Con los parámetros de entrada tanto de los niveles de cloro presente en los tanques de captación así como también las variables enviadas por las estaciones repetidoras de PH y baterías, situado el PID en modo de autoconfiguración e instalada la servoválvula del control de paso de cloro se establece el diagrama de flujo que explica la funcionalidad lógica del programa para que el sistema posea un proceso estable y efectivo.

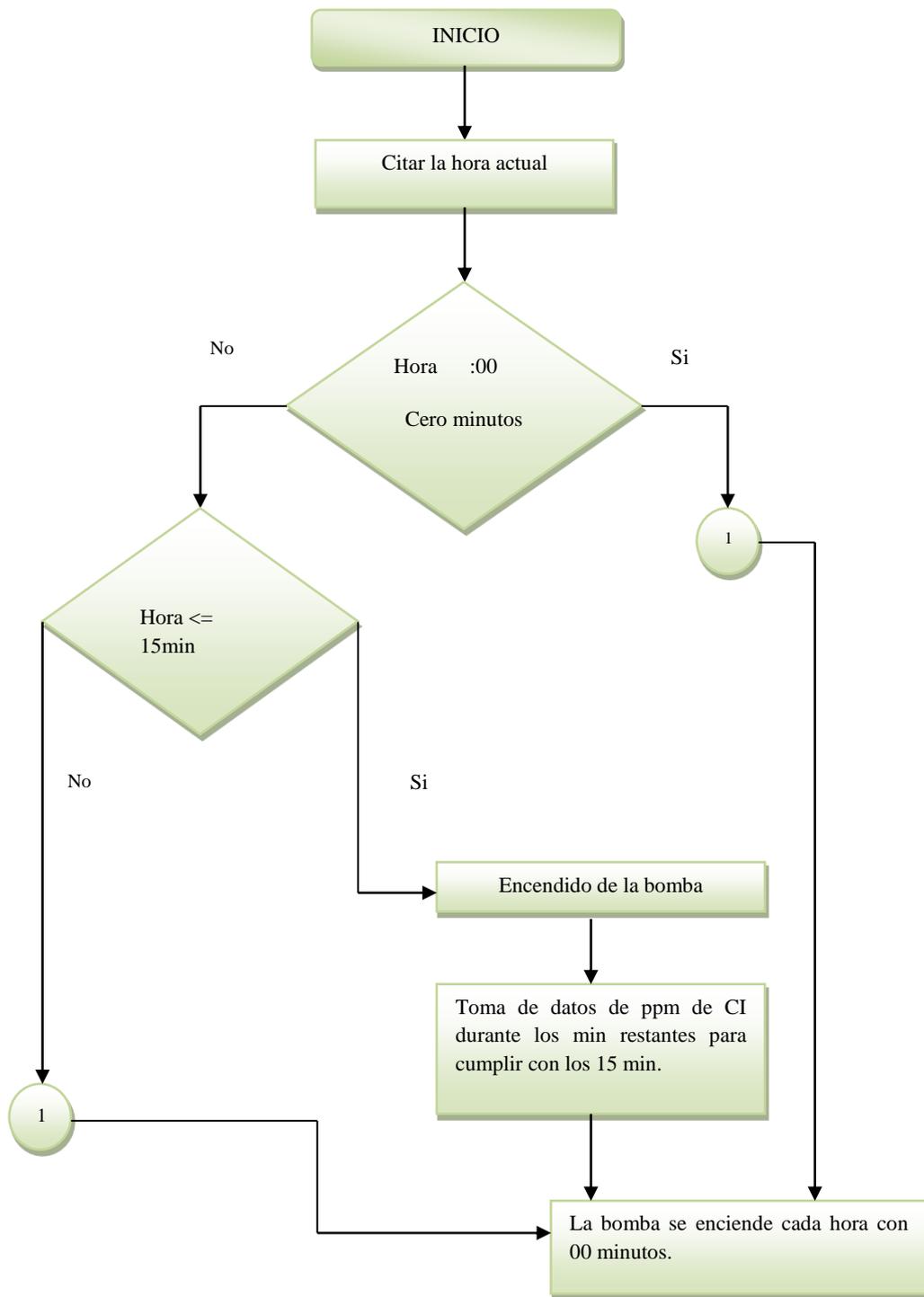


Figura 2.50: Diagrama de Flujo funcionamiento Horas Exactas

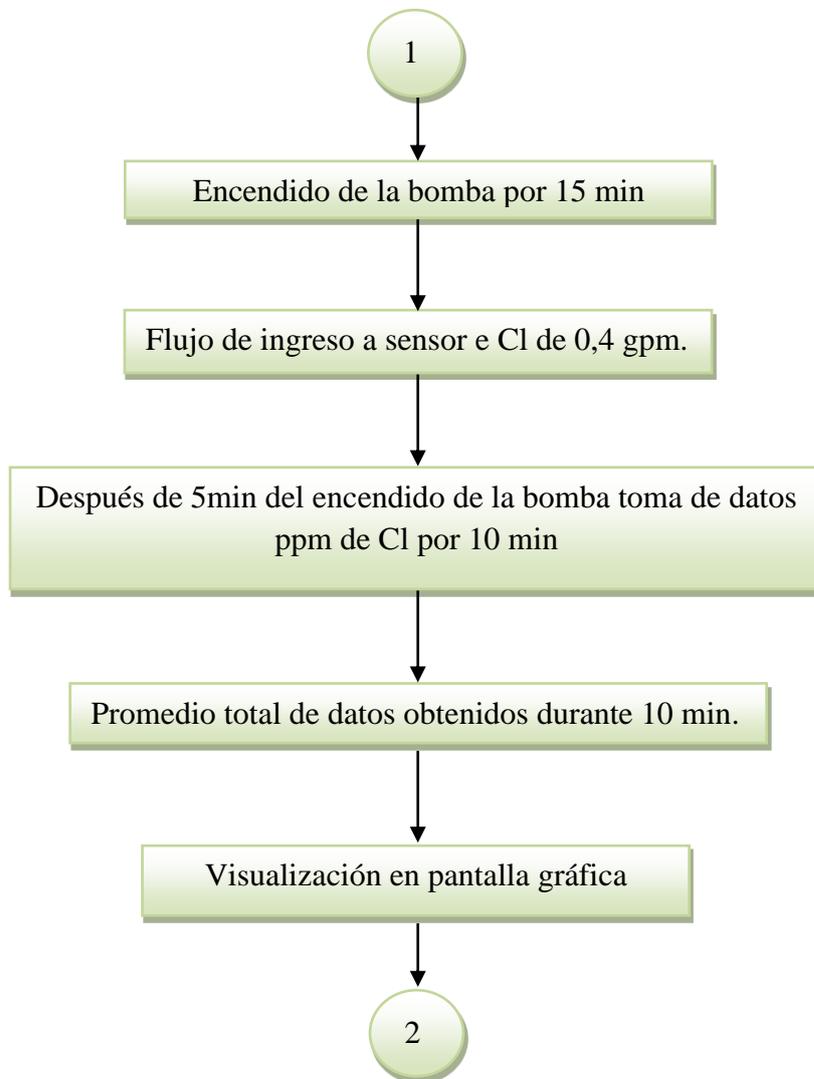


Figura 2.51: Diagrama de Flujo Tiempo de Recopilación de datos del Sensor de Cloro.

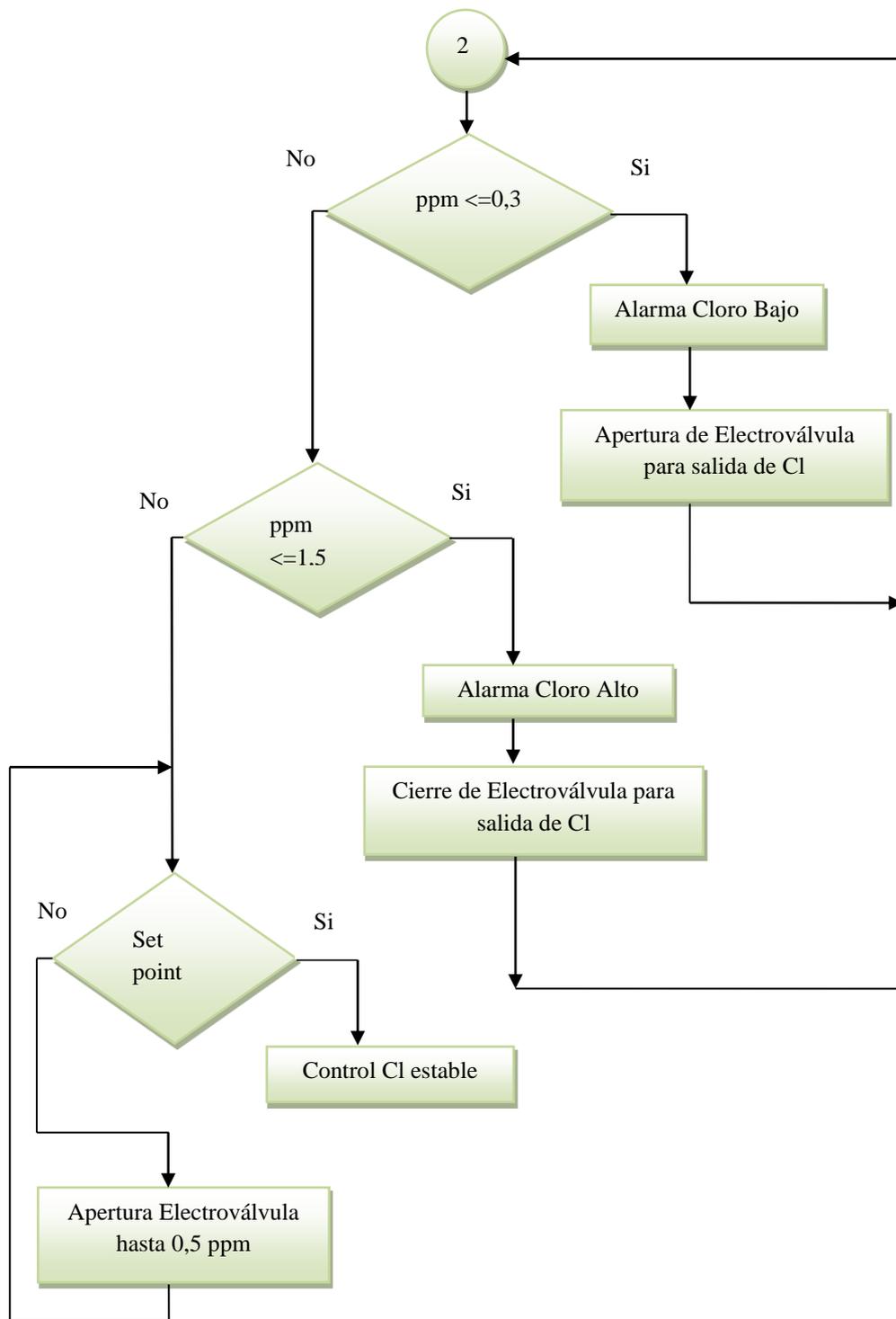


Figura 2.52: Diagrama de Flujo Set point y limites de ppm cloro.

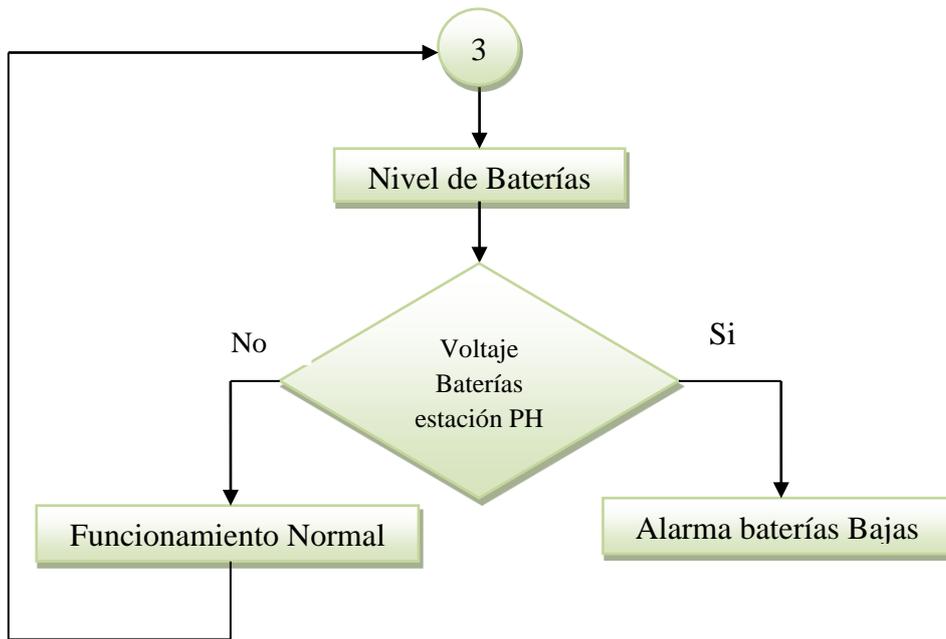


Figura 2.53: Diagrama de Flujo Nivel de Baterías Estación PH.

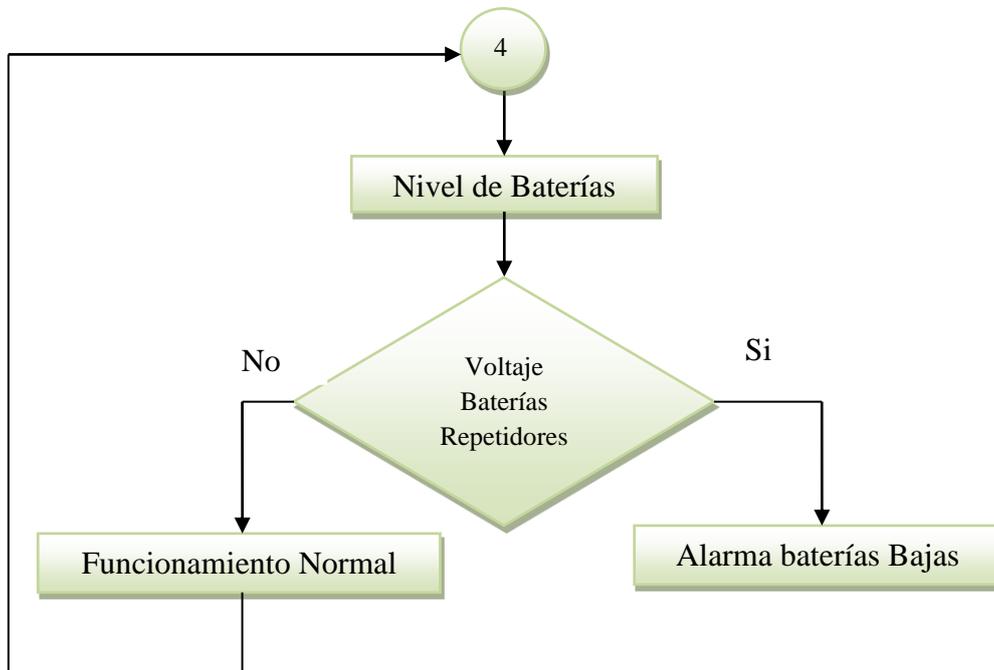


Figura 2.54: Diagrama de Flujo Nivel de Baterías Estaciones Repetidoras.

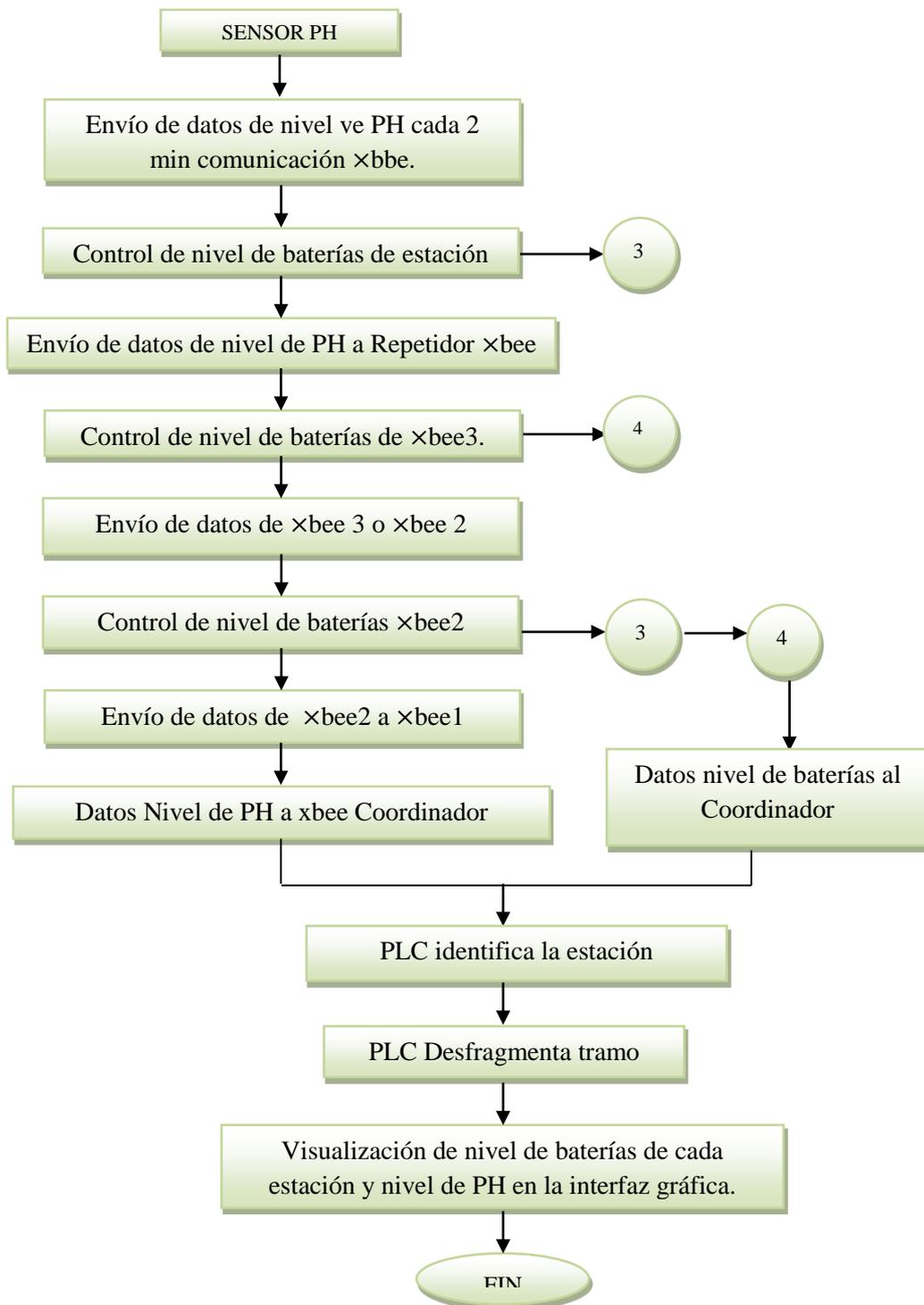


Figura 2.55: Diagrama de Flujo Control datos módulos xbee.

2.9.DISEÑO HMI

Para la manipulación de los registros y variables de control del sistema de cloración se ha dispuesto la instalación de una pantalla gráfica que sirva como interfaz humano máquina en cada uno de los parámetros a controlar del mismo.

La pantalla de visualización estará cargada con ventanas en donde se pueda manipular el reloj y encendido del sistema, verificar el sistema de dosificación de cloro, verificar los registros de PH y baterías, así como también el funcionamiento de la bomba y alarmas que posee el sistema.

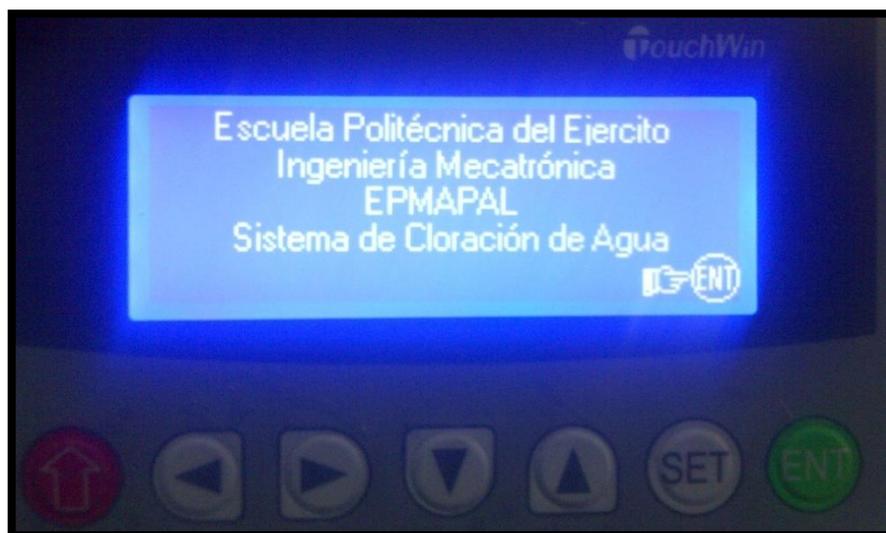


Figura 2.56: Pantalla de Inicio

Para entender el funcionamiento integro de las funciones insertadas en el programa y la manipulación del mismo por medio de la pantalla así como cada una de las funciones de visualización de alertas y variables del sistema se debe interpretar la lógica de programación mediante su diagrama de flujos que se muestra en la figura 2.57.

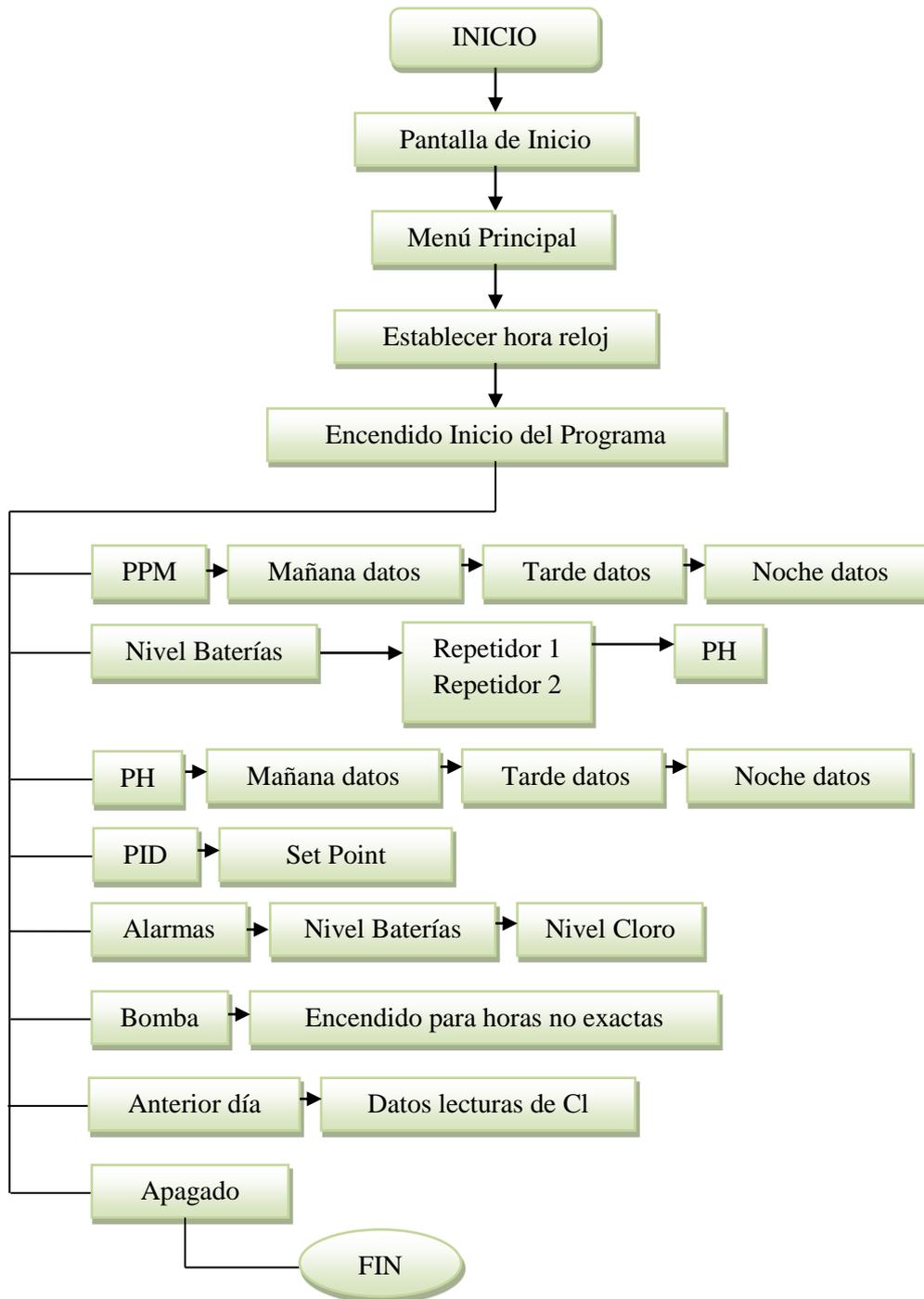


Figura 2.57: Diagrama de Flujo Funcionamiento HMI.

CAPÍTULO III

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. GENERALIDADES.

En este capítulo se analizó el comportamiento práctico real del sistema de cloración. A continuación se presenta las pruebas realizadas y los resultados obtenidos que servirán como base para un desempeño óptimo del sistema.

3.2. PRUEBAS DE COMUNICACIÓN

3.2.1. PRUEBAS DE COMUNICACIÓN MÓDULOS XBEE

Para que los módulos xbee puedan retransmitir la señal a través de la montaña se efectuó pruebas de comunicación para determinar la distancia que poseen en la ubicación estratégica de las estaciones no exceda los 1500m que especifica el fabricante y sobre todo que posean línea de vista, de esta manera se ubicó los módulos xbee en lugares específicos y con la ayuda del programa X-CTU se verificó que los módulos se encuentren enviado la señal por medio de la trama de datos que envía cada dispositivo.

Mediante la utilización de un GPS se verificó la distancia entre cada una de las estaciones logrando establecer una distancia de 600 metros entre la urbanización y la montaña y de 800 metros entre la planta de potabilización y la montaña.

Una vez especificada la distancia entre los puntos de las estaciones se comprobó la comunicación entre la estación PH y ERPM mediante la configuración de dos módulos xbee para poder enviar de una trama de datos de 24 bytes logrando comunicar con éxito y de manera similar entre la estación “El calzado” y ERPM

cada una de estas pruebas se las realizo de manera independiente para determinar la ubicación exacta de cada una de las estaciones.

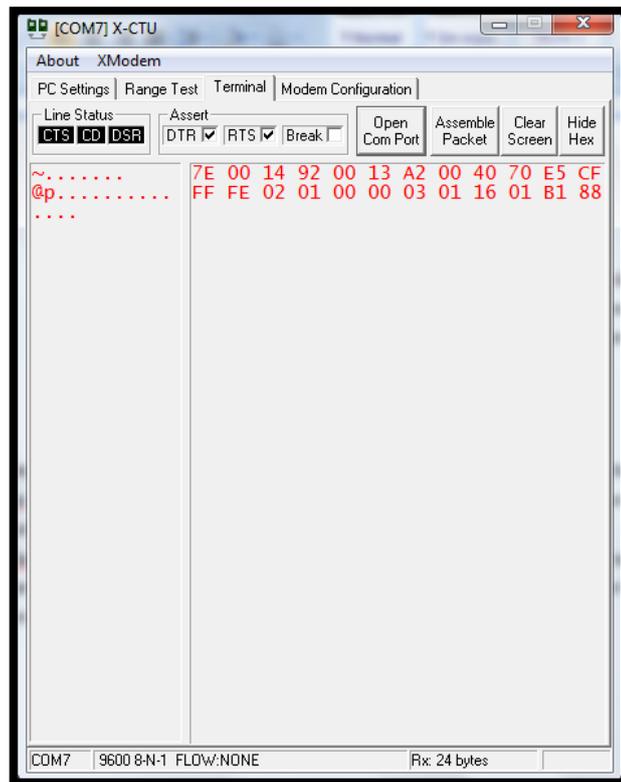


Figura 3.1: Trama de datos enviados

3.2.2. PRUEBAS DE COMUNICACIÓN XBEE-PLC

La comunicación entre el módulo xbee y el PLC se la realiza mediante comunicación serial y el formato de comunicación en forma libre que posee la programación interna del PLC.

Para lograr establecer comunicación entre los dos dispositivos se colocó los parámetros iniciales del puerto común 2 del PLC en el módulo xbee coordinador estableciendo valores de 19200 BPS en la velocidad de transmisión y con una paridad par.

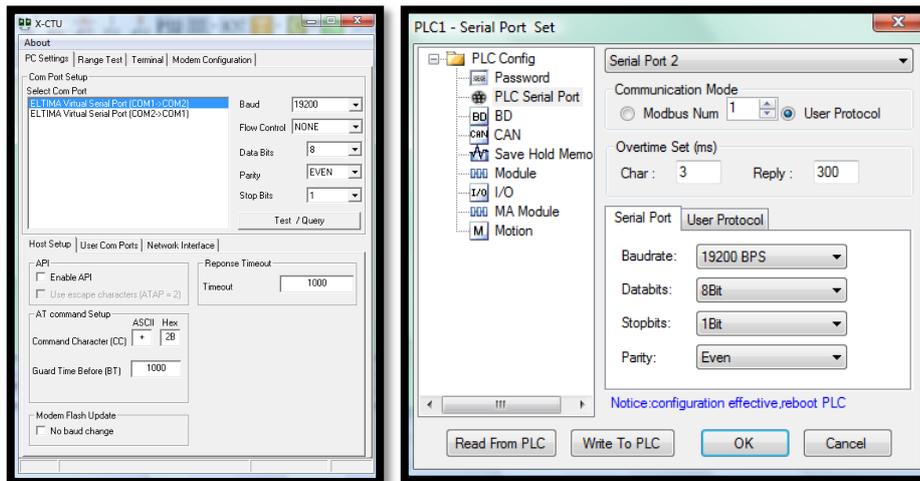


Figura 3.2: Parámetros de Comunicación

Establecidos los parámetros de comunicación se verificó la longitud de la trama más extensa enviada por los módulos xbee que es de 26 bytes para poder ser almacenada en los registros del PLC con la ayuda del formato de comunicación libre.

De esta forma se almacenan en orden los datos enviados por los módulos xbee van siendo almacenados en los registros que van desde el D80 al D105 del PLC.

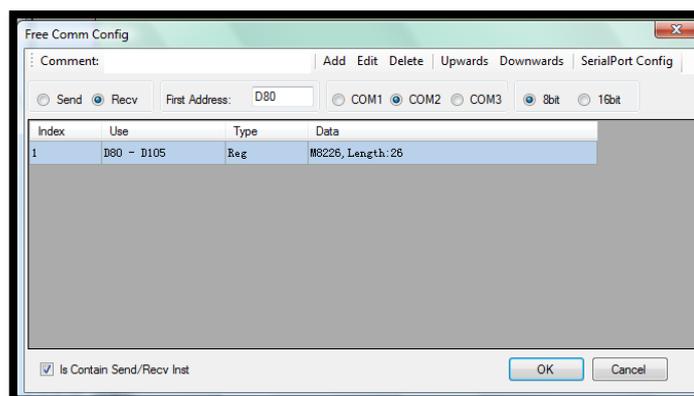


Figura 3.3: Formato de comunicación libre del PLC

La figura 3.3 es la ventana de configuración del formato de comunicación libre del PLC en donde se debe establecer el parámetro de recibir información en el

registro inicial D80 por el puerto común 2, luego seleccionamos la pestaña de adición para agregar la longitud de la trama y la marca especial M8226 que indica la activación del puerto común 2 como recepción de datos como se muestra en la figura 3.4.

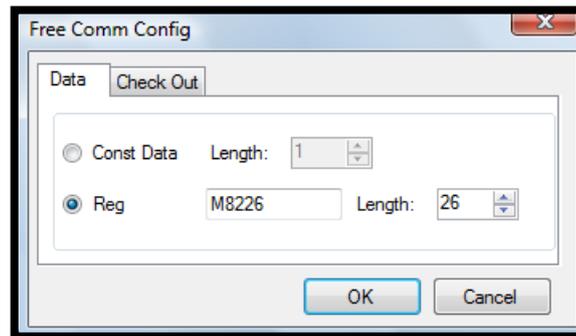


Figura 3.4: Configuración de comunicación libre del PLC

Una vez que se ha configurado la comunicación del PLC se acepta cada una de las ventanas configuradas apareciendo el terminal de recepción de datos, habilitando que los bytes enviados por los módulos xbee se almacenen desde el registro D80 hasta el D105, además los valores de datos asignados a cada uno de los registros van siendo sustituidos por los datos enviados en forma serial por los módulos xbee.



Figura 3.5: Recepción de datos habilitado

De esta manera la trama de datos enviados por los módulos xbee llega a los registros del PLC de manera similar a la trama apreciada por el programa X-CTU como se demuestra en la figura 3.6

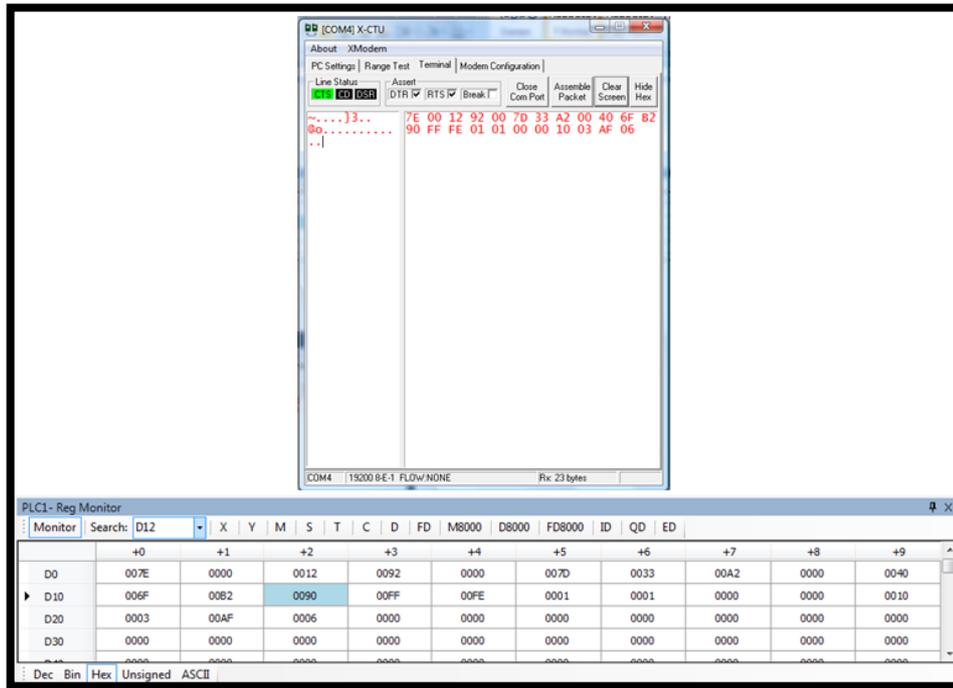


Figura 3.6: Registro de datos xbee

3.2.3. ANÁLISIS DE LA TRAMA DE DATOS

Para identificar los datos enviados por cada uno de los módulos xbee hacia el PLC se debe desfragmentar la trama conociendo cada una de las partes que integran la misma.

El PLC recibe tres tipos de tramas diferentes dos con una longitud de 24 bytes que pertenecen a los módulos repetidores y una tercera con una longitud de 26 bytes para cada una de estas tramas el PLC debe identificar cual pertenece a cada módulo xbee y extraer los datos de nivel de baterías y PH que transmiten los módulos.

Los datos del fabricante de los módulos xbee determina la trama en números hexadecimales y especificando cada una de las partes que contiene la misma, es decir, el primer byte determina el comienzo de la trama y empieza siempre en 7E, el segundo y tercer byte indican la longitud del frame, los siguientes bytes

corresponden al frame de datos, y el último byte corresponde al checksum que sirve para la comprobación de errores.

En base a lo especificado los módulos xbee repetidores ubicados en la estación ERPM envían la siguiente trama de datos:

Tabla 3.1 Trama de datos módulos xbee repetidores

Repetidor ER1																					
7E	00	12	92	00	13	A2	00	40	70	E5	CF	FF	FE	01	01	00	00	01	00	D8	7C
Repetidor ER2																					
7E	00	12	92	00	13	A2	00	40	98	19	39	FF	FE	01	01	00	00	01	00	78	16

Donde 7E indica el inicio de la trama, 00 12 indica que el frame de datos va a tener una longitud de 18 bytes en decimal y el último byte es el checksum.

Para reconocer cuál es módulo xbee que está enviando los datos se debe considerar el byte número nueve del frame de datos ubicado de color blanco en la tabla 3.1 que indica la dirección del módulo que está transmitiendo.

Para identificar en el frame de datos cuáles son los bytes que poseen la información de los conversores analógico/digitales se considera desde la parte final del frame de datos dos bytes de longitud por cada conversor habilitado, para los repetidores contemplan un solo conversor habilitado por lo que se debe considerar los bytes que están de color amarillo en la tabla 3.1, estos bytes indican la variación en los niveles de baterías de las estaciones repetidoras.

El módulo xbee que envía las señales del sensor de PH envía la siguiente trama de datos:

Tabla3.2 Trama de datos módulo xbee PH

Xbee PH																							
7E	00	14	92	00	13	A2	00	40	6F	B2	90	FF	FE	01	01	00	00	03	00	A6	01	18	06

Donde 7E indica el inicio de la trama, 00 14 indica que el frame de datos va a tener una longitud de 20 bytes en decimal y el último byte es el cheksum para la comprobación de errores.

Para reconocer la dirección del módulo xbee que está enviando los datos de PH se debe considerar el byte número nueve del frame de datos ubicado de cloro blanco en la tabla 3.2.

Para identificar en el frame de datos cuáles son los bytes que poseen la información de los conversores análogo/digitales se considera desde la parte final del frame de datos dos bytes de longitud por cada conversor habilitado, el módulo xbee que envía la señal de PH tiene dos conversores habilitados por lo que se debe considerar los bytes que están de color amarillo para saber cuál es la variación del PH y los bytes de color plomo para saber los niveles de baterías en la tabla 3.2.

3.3. PRUEBAS RELOJ DEL SISTEMA.

La parte esencial del sistema es la igualar y mantener el reloj del sistema puntual debido a que la toma de lecturas se los registra en un cronológico establecido en horas además de que el encendido de la bomba se lo debe realizar en horas exactas para poder dotar de agua del sensor de cloro.

Se probó el reloj del sistema durante un periodo equivalente a 31 días en el mes de Diciembre del 2012 obteniendo una precisión del 99.9%.



Figura 3.7: Reloj del Sistema de Cloración

3.4. MEDICIÓN DE VARIABLES

3.4.1. MEDICIÓN DE CLORO

Para poder calibrar el sensor de cloro se comprobó las lecturas en base a un colorímetro que nos permita determinar las ppm de cloro residual enviados por el sistema de cloración y compararlos con las lecturas establecidas en la pantalla de visualización, además se estableció los datos de corriente de salida y los bits de transformación módulo analógico del PLC en conformidad con las ppm de cloro residual en un rango de 0 a 10 ppm.

Tabla3.3 Datos sensor de Cloro

PPM Cloro	Corriente de salida (mA)	Bits M.A.
0	4,00	0
0,3	4,48	491
0,4	4,64	655
0,5	4,8	819
0,6	4,96	982
0,7	5,12	1146
0,8	5,28	1310
0,9	5,44	1474
1,0	5,60	1638

1,1	5,76	1802
1,2	5,92	1965
1,3	6,08	2129
1,4	6,24	2293
1,5	6,40	2457
2	7,36	3440
3	8,83	4945
4	10,40	6553
5	12,00	8191
6	13,60	9829
7	15,20	11468
8	16,8	13106
9	18,4	12744
10	20	16383

3.4.2. MEDICIÓN DE PH

Para la medición de los niveles de alcalinidad del agua se basó en tres líquidos conocidos que posean estadísticas de su alcalinidad como son el zumo del limón con PH equivalente a 2.3, agua pura con PH equivalente a 7 y agua con jabón equivalente a un PH de 12 en cada lectura emitida se comprobó la reacción del sensor ante variación de PH su tiempo de respuesta comprobando un tiempo de respuesta del 95% en 5 segundos.

3.4.3. MEDICIÓN NIVELES DE BATERÍAS

Los circuitos acondicionadores de señal dispuestos para enviar datos de voltaje a los módulos xbee se comprobaron en base a la utilización de un multímetro donde se verificó los niveles de voltaje reales de las baterías con los niveles de voltaje identificados por el sistema.

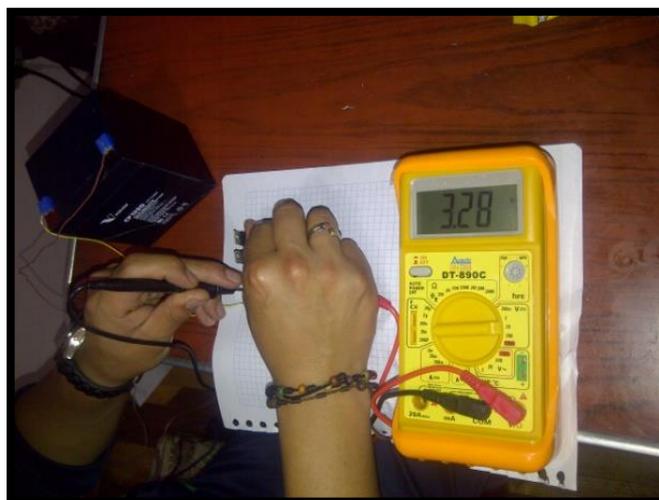


Figura 3.8: Medición acondicionamiento de señal

3.5. PRUEBAS PID

3.5.1. DETECCIÓN DE VARIACIÓN DE CLORO

Para realizar un PID se debe establecer en primera instancia el tiempo de reacción del sistema de cloración ante la mínima variación de los niveles de cloro residual presente en el agua, por tal motivo se realizó pruebas de la reacción del sensor de cloro ante las variaciones de cloro, en la tabla 3.4 se establece los tiempos de reacción del sensor de cloro.

Tabla3.4 Tiempo de Reacción Sensor de Cloro

Rango de Variación (PPM)	Tiempo (s)
0,3 – 0,5	8
0,5 – 1	11
0.5 – 1,5	20

1 – 1,5	12
0,3 – 1,5	26
1,5 – 0,3	39
1,5 – 0,5	23
1,5 – 1	16
1 – 0,5	18
0,5 – 0,3	10

Para un mejor análisis de los tiempos de reacción del sensor de cloro se ha examinado los las gráficas estadísticas del tiempo de reacción ascendente y descendente individualmente.

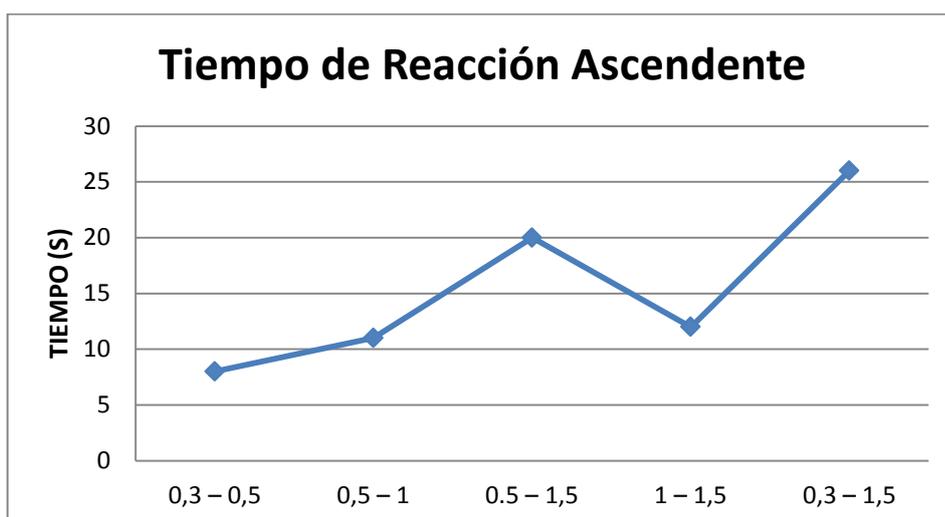


Figura 3.9: Tiempo de Reacción del Sensor de Cloro Lecturas Incrementales

El tiempo nominal de reacción del sensor de cloro es del 95% en 5 segundos lo que en teoría indica que el sensor va a detectar una variación casi completa del rango de medición en un tiempo aproximado a 5 segundos, en la práctica no suscitó de esta forma por motivo que al no existir un mezclador en los tanques de captación provoca que la mezcla entre el cloro gas y el agua se la realice de manera más lenta lo que ocasiona un retardo en la variación de lecturas del sensor de cloro, en la figura 3.9 se puede apreciar los tiempos de reacción del sensor de cloro en forma incremental mostrando el tiempo de variación entre los límites

inferior y superior establecidos para el cloro residual por la norma INEN 1108 aproximado a 20 segundos, una variación entre el punto inferior de la norma y el punto de estabilidad en 8 segundos y una variación entre el límite superior y el punto de estabilidad de 22 segundos.

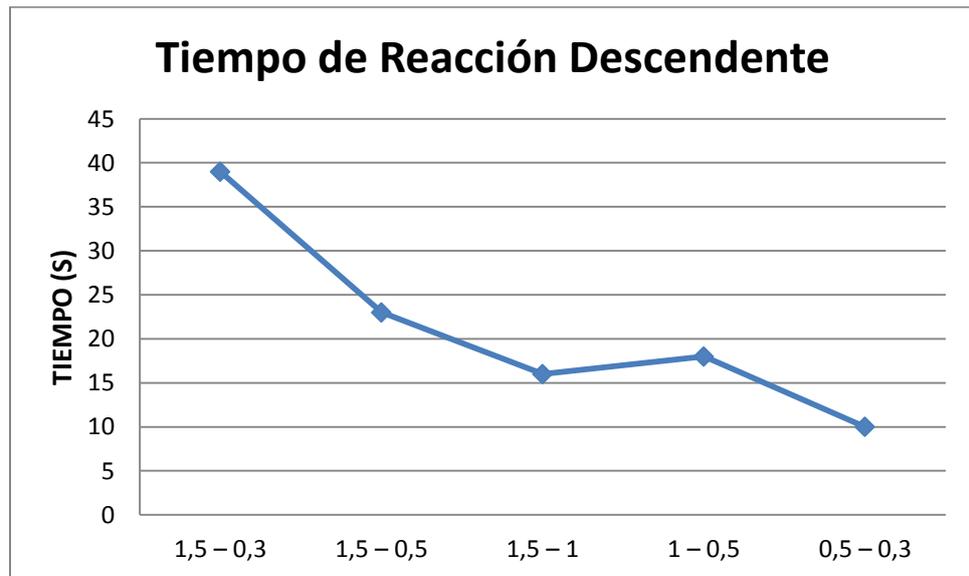


Figura 3.10: Tiempo de Reacción del Sensor de Cloro Lecturas Decrementales

En caso de las lecturas decrementales se aprecia un tiempo entre los límites superior e inferior de la norma de 39 segundos, del punto superior hacia el punto de estabilidad de 23 segundos y del punto de estabilidad al límite inferior de 10 segundos.

El tiempo de reacción decremental es más alto que el tiempo de reacción incremental porque al pasar el cloro de los tanques con una concentración mayor a la que se desea establecer ocurre un inconveniente puesto que se debe en primero disipar la concentración más alta del tanque hasta establecerse en una lectura baja.

Para unificar el tiempo de muestreo del sensor de cloro se estableció un valor intermedio entre los tiempos decrementales e incrementales equivalente a 15

segundos en donde se garantiza que la eficiencia de la reacción va a ser apreciada en forma paulatina sin el inconveniente en que las lecturas sean incrementales o decrementales.

Con ello en el PLC se programó para establecer una muestra del cloro residual cada 15 segundos, este valor se establece de promediar los valores de 5 muestras obtenidas cada 3 segundos lo que garantiza un monitoreo continuo con periodo de tiempo definido, siendo está la muestra que servirá como variable de entrada al PID.

3.5.2. SALIDA DEL PID

Uno de los principales inconvenientes es establecer la señal de salida del PID sin el apoyo de un osciloscopio, pero en base a un análisis se establece que una vez el PID empiece a funcionar el lazo de control se cierra y la salida del PID viene a ser la entrada del sistema debido a la retroalimentación que genera en el lazo de control.

Por ello para generar mi PID se estableció aplicar el proceso de ajuste automático en donde se debe establecer el punto de estabilización, la variable de la muestra, el tiempo de muestreo que se genera el PLC por defecto y salida por donde se desea enviar la señal de corriente.

En base a aquello se identificó el tiempo en que el proceso tardará en estabilizarse sin que éste llegue a perder el control y en base a la ecuación establecida por el modo de autoajuste del PID se establece la tabla 3.5.

$$\text{Valor Nominal} = \text{Valor Actual} + (\text{Valor objeto final} - \text{Valor objetivo Final}) \times 2/3 \quad \text{Ec. 3.1}$$

Tabla3.5 Entrada retroalimentación

Tiempo (s)	Entrada PID
0	0
15	0,33
30	0,44
45	0,56
60	0,48
75	0,51
90	0,49
105	0,52
120	0,49
135	0,51
150	0,47
165	0,51
180	0,5
195	0,49
210	0,51
225	0,48
240	0,5
255	0,52
270	0,49
285	0,5
300	0,5

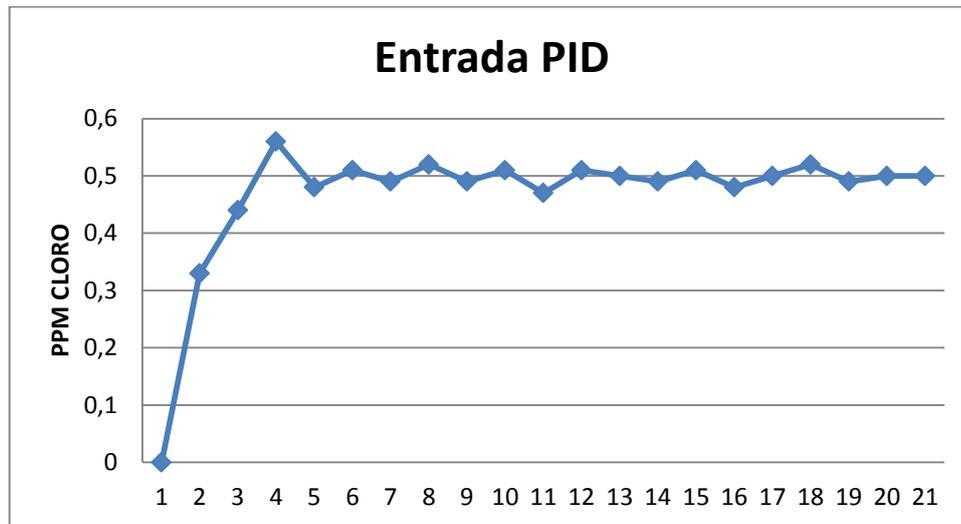


Figura 3.11: Entrada PID

En la figura 3.11 se aprecia el comportamiento de la entrada PID a lo largo de una toma de 20 muestras en un tiempo de 5 minutos como se puede apreciar presenta oscilaciones en la salida mismas que se puede despreciar debido a que comparadas con oscilaciones presentadas en la dosificación manual de cloro se considera un nivel de cloro estable, la consecuencia a largo plazo puede ocasionar daños en la servoválvula o en su placa de control.

3.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de las pruebas se tomó en consideración la semana del 17 al 21 de junio del 2013, estableciendo un análisis minucioso de las tres variables de control que posee el sistema como son los niveles de cloro en el agua, el nivel del PH y los niveles de carga de las baterías de la estación PH y estación ERPM.

3.6.1. NIVEL DE CLORO

- Por medio de la utilización de un colorímetro y del sensor de cloro se estableció los valores del cloro residual equivalentes a las 24 horas del día logrando establecer una tabla de datos de ppm de cloro residual y la

ineficiencia del sistema de medición por colorímetro con respecto a la medición con el sistema de cloración.

Tabla3.6 PPM de cloro residual

HORA	COLORÍMETRO	SENSOR
0:00	0,5	0,49
1:00	0,5	0,43
2:00	0,5	0,47
3:00	0,5	0,54
4:00	0,5	0,53
5:00	0,4	0,42
6:00	0,3	0,35
7:00	0,3	0,35
8:00	0,3	0,32
9:00	0,4	0,39
10:00	0,6	0,58
11:00	0,5	0,5
12:00	0,6	0,53
13:00	0,5	0,53
14:00	0,4	0,46
15:00	0,5	0,55
16:00	0,5	0,42
17:00	0,4	0,37
18:00	0,3	0,41
19:00	0,3	0,33
20:00	0,3	0,32
21:00	0,4	0,41
22:00	0,5	0,47
23:00	0,5	0,49

Para una mejor interpretación de los datos a continuación se representa los valores de la tabla 3.6

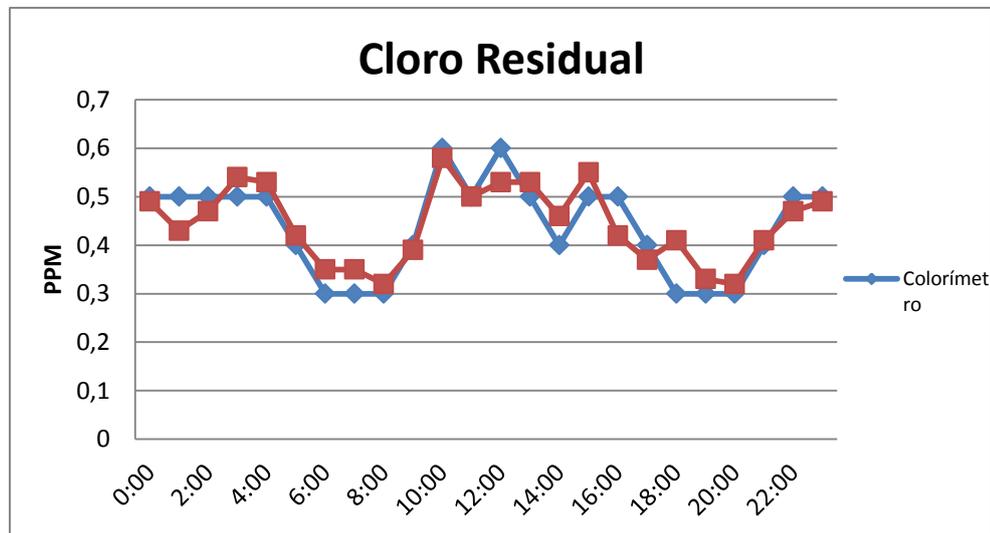


Figura 3.12: Comparación de medidas entre el colorímetro y sensor de cloro

Cómo demuestra la figura 3.12 la imprecisión en la toma de lecturas de cloro residual mediante la utilización de un colorímetro hace imposible detectar cuál es la cantidad exacta de cloro que se está enviando hacia la red debido a que depende de la manera de interpretación de la colorimetría del operario que está realizando la medición con respecto a las medidas obtenidas con el sensor de cloro en las que se incrementa su precisión de lectura permitiendo saber el valor exacto de la cantidad de cloro residual que se está enviando hacia la red, cabe recalcar que la toma de lecturas enviadas en este día son las realizadas por medio de un proceso de dosificación manual sin utilizar el sistema de cloración.

- Para verificar la eficiencia del sistema de cloración se comprobó los valores obtenidos por la muestra de dosificación manual con respecto a las muestras resultantes del sistema de cloración, obteniendo la siguiente tabla de resultados.

Tabla3.7 Resultados del sistema de cloración

HORAS	NIVEL DE BATERÍAS (V) ERPM 1	MIVEL DE BATERÍAS (V) ERPM 2
0:00	0,49	0,5
1:00	0,43	0,52
2:00	0,47	0,51
3:00	0,54	0,5
4:00	0,53	0,51
5:00	0,42	0,5
6:00	0,35	0,49
7:00	0,35	0,48
8:00	0,32	0,53
9:00	0,39	0,52
10:00	0,58	0,53
11:00	0,5	0,47
12:00	0,53	0,54
13:00	0,53	0,52
14:00	0,46	0,45
15:00	0,55	0,48
16:00	0,42	0,5
17:00	0,37	0,52
18:00	0,41	0,52
19:00	0,33	0,51
20:00	0,32	0,48
21:00	0,41	0,47
22:00	0,47	0,51
23:00	0,49	0,53

La siguiente figura interpreta los resultados obtenidos en la tabla 3.7

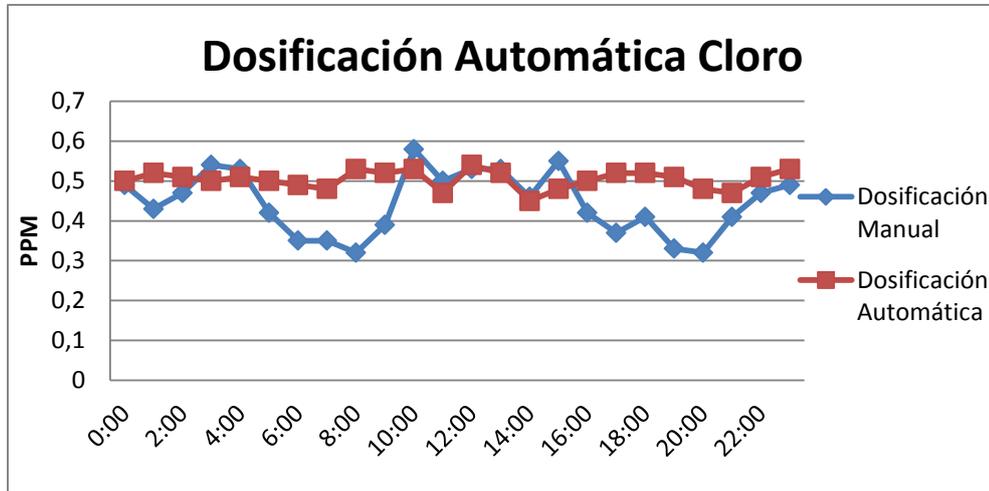


Figura 3.13: Comparación Sistemas de Dosificación

Una vez implementado el sistema de dosificación de cloro automático se detecta una incremento en la estabilidad en nuestro caso se colocó un punto de estabilidad de 0,5 ppm de cloro, el sistema tiende a estabilizar la señal en el punto de referencia establecido a lo largo de todo el día existiendo variaciones debido a la lentitud del proceso por causa de incremento en el caudal de los tanques de captación así como también a las impurezas presentes en el agua, estas variaciones mínimas son aceptables debido a que el sistema de dosificación manual con el que se trabajaba posee un margen de error de ± 2 ppm de cloro en el instante del día que presenta mayor variación, a diferencia del sistema automático que posee un variación de ± 0.05 ppm en el instante del día de mayor fluctuación.

3.6.2. NIVEL DE PH

Para saber si la cloración está realizando una purificación de los elementos contaminantes del agua se estableció los datos estadísticos de los niveles de PH

que están llegando a la urbanización cumplen con lo especificado con la norma INEN 1108.

Tabla3.8 Niveles de PH

HORAS	NIVEL DE PH
0:00	5,98
1:00	6,03
2:00	6,03
3:00	6,06
4:00	6,06
5:00	6,06
6:00	6,06
7:00	6,06
8:00	6,06
9:00	6,06
10:00	6,06
11:00	6,06
12:00	5,82
13:00	5,82
14:00	5,74
15:00	5,74
16:00	5,74
17:00	5,9
18:00	5,98
19:00	5,98
20:00	6,03
21:00	6,03
22:00	6,03
23:00	6,03

En la siguiente figura 3.14 se demuestra los niveles de alcalinidad del agua presentes en la urbanización la hacienda.

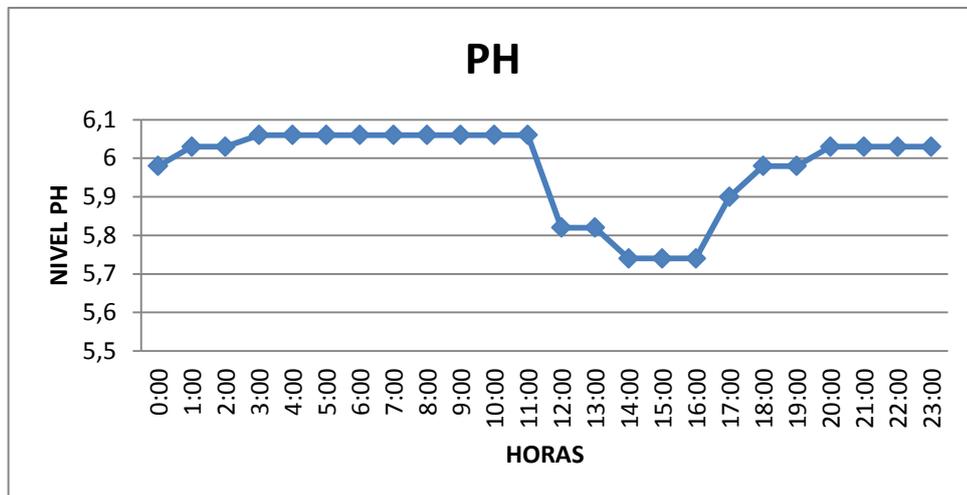


Figura 3.14: Niveles de alcalinidad del Agua

Los niveles de PH recolectados en la urbanización detectan que la alcalinidad promediada del agua es de 5,97 que esta 0,5 partes por bajo del límite establecido por la norma INEN 1108, la causa probable se atribuye a la contaminación interna de las tuberías lo que provoca que las cantidades de cloro residual vayan disminuyendo a medida que avanza por la red.

3.6.3. NIVEL DE BATERÍAS

Para cada una de las estaciones que carecen de alimentación eléctrica propia se las debe monitorear los niveles de baterías para ver el funcionamiento diario de cada una de ellas y verificar si los paneles solares están cumpliendo con su objetivo.

- La estación PH consta de dos baterías conectadas en serie el monitoreo permanente de estas baterías se las hace en un rango de 0v a 24v para ello el

sistema indicara que las baterías de la estación PH deben ser revisadas cuando ajusten los 15v, de esta manera en la tabla 3,9 se indica cada uno de los niveles de baterías monitoreados a lo largo de un muestreo diario.

Tabla 3.9 Niveles de PH

HORAS	NIVEL DE BATERÍAS (V) ESTACIÓN PH
0:00	19,03
1:00	19,03
2:00	19,03
3:00	19,02
4:00	19,02
5:00	19,03
6:00	19,03
7:00	19,05
8:00	19,08
9:00	19,23
10:00	19,30
11:00	19,30
12:00	19,32
13:00	19,34
14:00	19,28
15:00	19,20
16:00	19,15
17:00	19,11
18:00	19,09
19:00	19,07
20:00	19,05
21:00	19,05
22:00	19,03
23:00	19,03

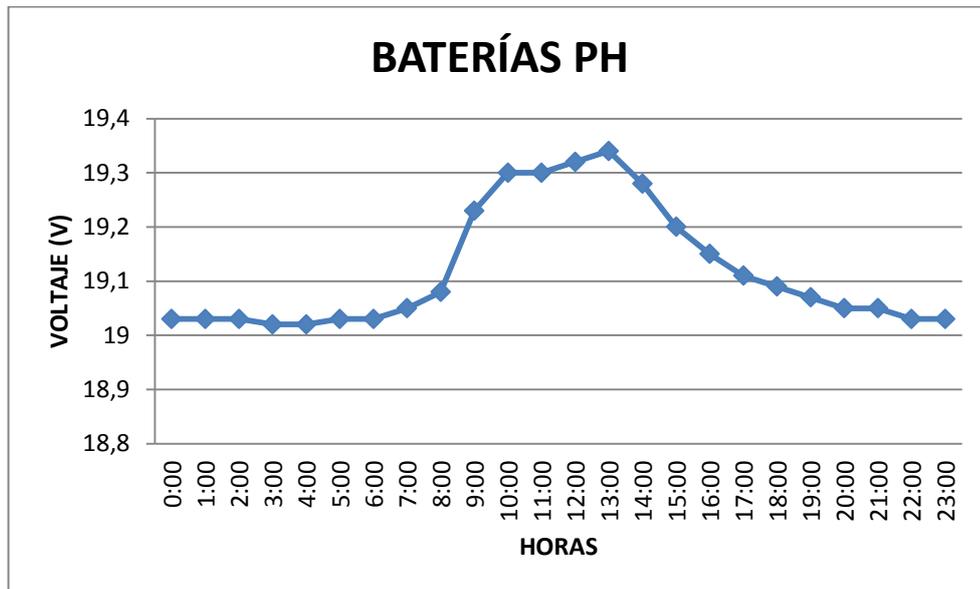


Figura 3.15: Niveles de baterías estación PH

La figura 3.15 muestra el comportamiento diario de los niveles de baterías de la estación PH presentando una máxima carga en las horas en cercanas al medio día en donde la carga de los paneles solares llega a su capacidad máxima permitiendo por consiguiente mantener las baterías cargadas al total de su capacidad alrededor de las 13 horas.

- La estación ERPM consta de dos módulos repetidores que cada uno de ellos consta de una batería de 12v de corriente directa recargable, las cuáles a su vez se encuentran siendo recargadas por paneles solares para garantizar las estaciones alimentación constante, las baterías de estas estaciones serán cambiadas cuando se encuentren funcionando al 80% de su capacidad normal es decir el sistema especificará revisión de baterías cuando cada una de ellas se encuentren con un voltaje equivalente a 9,5V

En la tabla 3.10 se especifica el comportamiento diario de cada una de las baterías.

Tabla 3.10 Niveles de baterías estación ERPM

HORAS	NIVEL DE BATERÍAS (V)	
	ERPM 1	ERPM 2
0:00	12,24	12,49
1:00	12,23	12,47
2:00	12,2	12,46
3:00	12,15	12,43
4:00	12,13	12,41
5:00	12,11	12,39
6:00	12,12	12,39
7:00	12,13	12,41
8:00	12,23	12,49
9:00	12,84	13,07
10:00	12,94	13,21
11:00	12,95	13,25
12:00	13,03	13,52
13:00	13,06	13,88
14:00	13,13	13,80
15:00	12,98	13,57
16:00	12,69	13,43
17:00	12,56	13,27
18:00	12,46	13,12
19:00	12,38	12,96
20:00	12,34	12,88
21:00	12,32	12,74
22:00	12,30	12,66
23:00	12,27	12,52

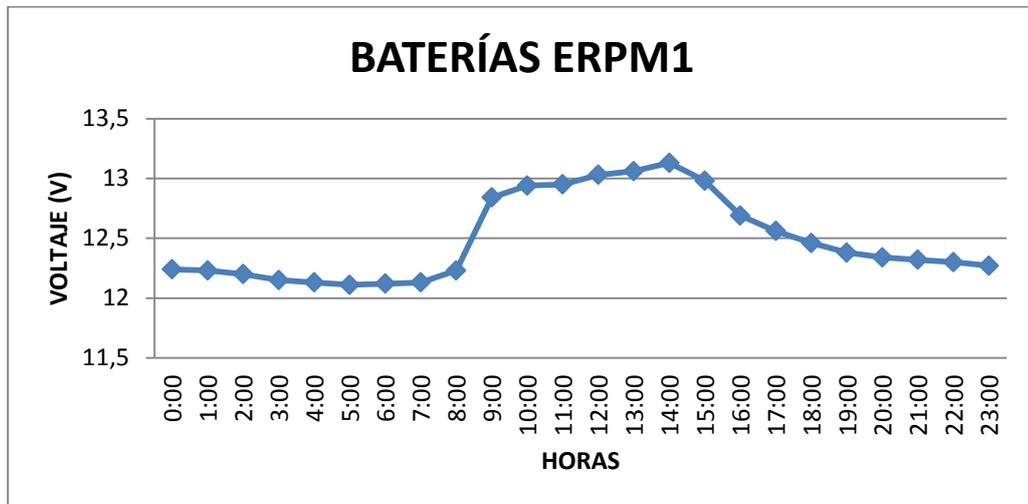


Figura 3.16: Nivel de baterías repetidor ERPM1

El repetidor ERPM1 es el que refrenda la señal desde la urbanización hacia la estación ERPM2, en la figura 3.16 se determina que al igual que la estación PH los niveles de batería llegan a una carga máxima alrededor de las 13:00 permitiendo dotar de energía al módulo repetidor las 24 horas del día sin tener un excesiva descarga en las horas donde la radiación solar es prácticamente nula.

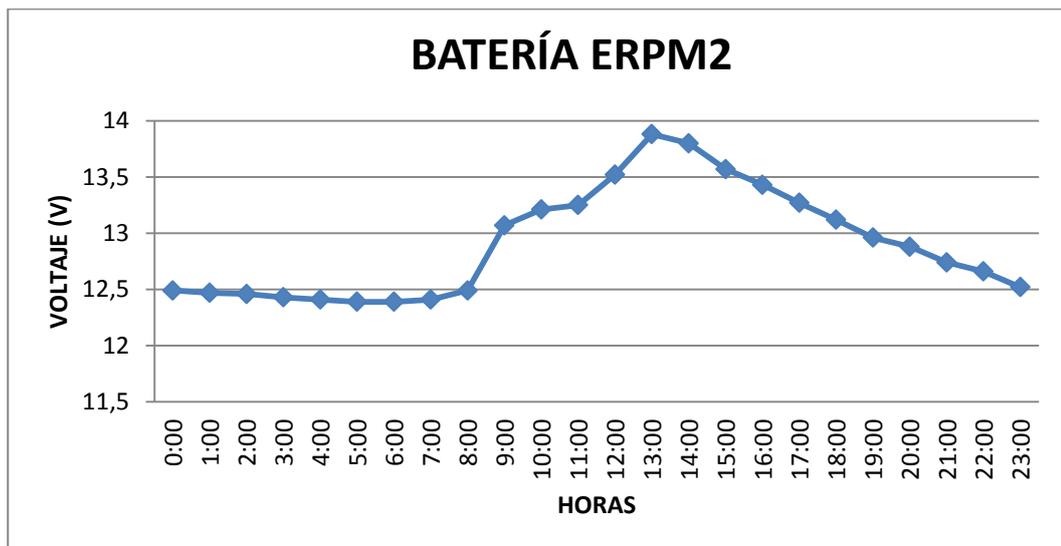


Figura 3.17: Nivel de baterías repetidor ERPM 2

La Figura 3.17 muestra el funcionamiento diario de la batería ERPM 2, la curva de carga y descarga de la estación ERPM2 es similar a la estación ERPM 1 compartiendo el mismo disparo en la carga situados entre las 8:00 y 9:00 de la mañana además que la descarga efectuada en la tarde presenta un descenso progresivo en los niveles de voltaje hasta llegar a descarga estable y mínima de la batería.

La descarga de las baterías en los módulos es próxima a los 0,1v por cada hora transcurrida sin la emisión de radiación sobre los paneles solares llegando a una descarga total aproximada de 1V durante el transcurso de toda la noche.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES.

- Mediante la tecnología zigbee se monitorea la alcalinidad del agua por medio de la implementación de un sensor de PH y estaciones repetidoras que llevan las señales hacia la planta de potabilización.
- Con la utilización de un Controlador Lógico Programable, sensor de cloro y servoválvula proporcional se controla y regula la dosificación de cloro presente en el agua.
- Se investigó y seleccionó minuciosamente cada uno de los dispositivos que intervienen en el proyecto facilitando un correcto funcionamiento del sistema de cloración y monitoreo de variables.
- La comunicación entre el PLC y el dispositivo xbee coordinador se consiguió gracias a la investigación de la comunicación serial de forma libre incorporada en el PLC y estableciendo las mismas velocidades de transmisión.
- En base a la investigación se configuró los dispositivos zigbee en forma de red tipo malla para situar estaciones repetidoras que retransmitan las señales emitidas por el sensor de PH hacia la planta de potabilización.
- Se demostró con pruebas de comunicación que los dispositivos zigbee mesh pueden transmitir a una distancia de hasta 1500m con línea de vista sin ningún tipo de inconveniente.

- La construcción de un sistema de control y monitoreo de cloración facilita mantener los niveles de cloro residual estables, obteniendo agua de mejor calidad para el sector sur de la ciudad de Latacunga.
- Se diseñó un interfaz humano máquina mediante una pantalla de visualización que permite al operario la interacción del sistema de control así como también la visualización de los datos medidos y almacenados.
- Para enviar el suministro de agua con cloro desde la salida del tanque se utilizó una bomba de 0.5 HP de potencia, permitiendo tomar mediciones en tiempo real.
- El caudal de entrada hacia el sensor de cloro se controló mediante un flujómetro que permite que el caudal de entrada hacia el sensor de cloro sea el establecido por el fabricante.
- Para eliminar las burbujas de aire en la tubería generadas a la salida de la bomba y evitar turbulencia en el ingreso de flujómetro se instaló un dissipador de presión.
- Se construyeron placas acondicionadoras de señal para determinar los niveles de baterías en las estaciones repetidoras y en la toma de datos en la estación PH.
- La investigación demostró que la servoválvula necesitó de una frecuencia específica para su correcto funcionamiento por lo que se diseñó una placa que permita generar un PWM seleccionable de 300HZ a partir de una señal de corriente de 4 a 20mA generados por el módulo analógico del PLC.
- Se investigó la opción integrada en el PLC para generar un PID en configuración automática para que el control de la servoválvula de

dosificación abra o cierre de acuerdo a la cantidad de cloro emitido por el sensor permitiendo una dosificación constante de los niveles de cloro en el agua.

- En base a las pruebas efectuadas se logró mantener los niveles de cloro aptos para el consumo humano independientemente del caudal del tanque, horas de mayor consumo y cantidad de bacterias presentes en el agua.
- Los niveles de PH en la urbanización demuestran que el agua que se envía hacia la ciudad se encuentra en los límites permisibles existiendo pérdidas debido a la contaminación de las tuberías y a la disipación de la concentración del cloro.
- Las pruebas demuestran que el consumo de las baterías durante la noche no es considerable además que los paneles solares compensan esta descarga en las horas de mayor radiación llegando a una carga máxima de las baterías al medio día.

4.2 RECOMENDACIONES.

- Se debe revisar la documentación de cada uno de los dispositivos antes de su manipulación para comprender su funcionamiento y evitar daños provocados por el manejo equivocado de los equipos, corregir errores durante la fase de implementación.
- Las placas repetidoras estarán en cajas totalmente herméticas para evitar daños por la exposición de agentes externos como agua o polvo.
- Se recomienda la utilización de mezcladores en los tanques reservorios de agua para obtener una mezcla homogénea de cloro con agua antes de ser enviada al sensor de cloro.

- En base a los resultados se recomienda tomar muestras de cloro residual con colorímetros por lo menos una vez por semana para comprobar un funcionamiento eficiente de la dosificación de cloro.
- Se podría incrementar puntos de medición en la ciudad de Latacunga para comprobar que los niveles de cloro estén dentro del margen permisible a lo largo de toda la red en que se encuentra instalado el sistema de cloración.
- Se recomienda capacitar al personal que trabaja en la empresa de agua potable y alcantarillado de la ciudad de Latacunga en tratamiento de agua para evitar el consumo excesivo de cloro que será perjudicial para la salud humana.
- Es aconsejable dar un mantenimiento preventivo a cada uno de los dispositivos presentes en el sistema de cloración para evitar daños causados por agentes externos.
- Se recomienda colocar un banco de baterías en la planta de potabilización para que el sistema pueda seguir funcionando eficientemente en caso de falla eléctrica.
- Es conveniente revisar las estaciones repetidoras para verificar que los instrumentos se encuentren en un sitio seguro y no sufran fallas por manipulación de personas ajenas a la EPMAPAL.
- Es necesario encender la bomba en caso de poner en marcha el sistema en horas no exactas para que la toma de datos se los realice de manera instantánea y regule la dosificación del cloro sin esperar que el sistema funcione en horas exactas.

- Mantener el reloj del sistema igual para que los datos sean almacenados en las horas del día a las que se tome el muestreo permitiendo llevar un control estadístico real del variables controladas y monitoreadas por el sistema.
- Es aconsejable revisar cada tres meses el electrolito del sensor de cloro para no tener fallas en lecturas y mantener la vida útil del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Maldonado M. (2013). “ Diseño e implementación de un sistema de transmisión variable continua (CVT), como nueva técnica para la locomoción de una silla de ruedas.”. Tesis de grado, Escuela Politécnica Superior del Ejército, Sede Latacunga, Ecuador.
- Mayorga G., Mena L. (Marzo 2010). “Diseño, construcción e implementación de un sistema de control local con interfaz grafica (HMI), para el proceso de precalentado de agua del caldero de la empresa TEIMSA.” Tesis de grado, Escuela Politécnica Superior del Ejército, Sede Latacunga, Ecuador.
- Center for Disease Control and Prevention (CDC). 1999. Achievements in Public Health, 1900-1999: Control of Infectious Diseases. CDC, Atlanta, EE.UU., Morbidity and Mortality Weekly Report, 30 de julio, 1999
- Ramón Pallás Areny. (2003). Sensores y Acondicionadores de Señal (4^a Ed.). Gran vía de los Corts Catalanes. Barcelona España. MARCOMBO, Página 275
- Robert F. Coughlin y Frederik F. Driscoll. (1999). Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales (5^a Ed.). Naucalpan de Juárez, Edo México. Prentice Hall, Página 67
- José M. García Iglesias y Emilio J. Pérez Iglesias. (2006). Dispositivos lógicos programables (PLD) México DF, México. Alfaomega grupo editorial S.A de C.V.
- José M. Angulo Usategui, Susana Romeo y Ignacio Angulo. (2003). Microcontroladores PIC diseño práctico de aplicaciones PIC 16F87X, Aravaca, Madrid. McGrawHill, Página 105

- Mott, Robert L.(2006). Mecánica de Fluidos (6° Ed.). Naucalpan de Juárez Edo. México. Prentice Hall, Página 402
- Construsur (Marzo del 2012). «Purificación del agua Métodos Químicos». Consultado el 12 de Marzo del 2012 de la World Wide Web: <http://www.construsur.com.ar/News-sid-109-file-article-pageid-1.htm>
- Water Treatment Solutions (Marzo del 2012). «Historia de la desinfección del agua». Consultado el 12 de Marzo del 2012 de la World Wide Web: <http://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/historia/historia-desinfeccionagua.htm>
- ITC (Marzo del 2012). «Sensor de Cloro». Consultado el 18 de Marzo del 2011 de la World Wide Web: <http://www.itc.es/pdf/Manuals/44CL-Es.pdf>
- Curso de Programación PLC's (Marzo del 2012). «Teroría y Práctica PLC». Consultado el 12 de Marzo del 2012 de la World Wide Web: http://www.mecatronicatip.com/e107_files/downloads/cursobasmtiptoshi.pdf
- Kingeniate (Marzo del 2012). «Definición PLC». Consultado el 18 de Marzo del 2012 de la World Wide Web: <http://www.ingeniaste.com/ingenias/telecom/tutorial-plc.html>
- Eximte (Abril del 2012). «Servoválvulas y Controles». Consultado el 5 de Abril del 2012 de la World Wide Web:<http://www.eximte.cl/oleohidraulica/servo-valvulas-controles/02.php>

- Controladores PID (Abril del 2012). «Control PID». Consultado el 5 de Abril del 2012 de la World Wide Web: <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- Automatas (Abril del 2012). «Teoría PID». Consultado el 5 de Abril del 2012 de la World Wide Web: http://www.automatas.org/hardware/teoria_pid.htm
- Iraunileon (Abril 2012). «El control PID Básico». Consultado el 5 de Abril del 2012 de la World Wide Web:<http://www.lra.unileon.es/es/book/export/html/268>
- Universidad Politécnica de Cataluña (Abril 2012). «Diseño Módulo Zigbee». Consultado el 5 de Abril del 2012 de la World Wide Web: <http://www.upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3581/1/539481.pdf>
- Aplicaciones Zigbee (Abril 2012). «Zigbee y sus Aplicaciones». Consultado el 5 de Abril del 2012 de la World Wide Web:[http://www.dea.icaei.upco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/Zigbee e%20y%20sus%20aplicaciones.pdf](http://www.dea.icaei.upco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/Zigbee%20y%20sus%20aplicaciones.pdf)
- Electrocomponentes (Abril 2012). «Tecnología Inalámbrica». Consultado el 5 de Abril del 2012 de la World Wide Web: <http://www.sase.com.ar/2012/files/2012/09/SASE-2012-Digi-RF-y Zigbee.pdf>
- Julian Moreno (Abril 2012). «Estructura Zigbee». Consultado el 5 de Abril del 2012 de la World Wide Web: <http://www.sx-de-tx.wikispaces.com/ZIGBEE>
- Universidad Nacional de Trujillo (Abril 2012). «Estándar Inalámbrico Zigbee». Consultado el 5 de Abril del 2012 de la World Wide Web: <http://www.seccperu.org/files/ZigBee.pdf>

- Pickyguide (Abril 2012). «Transceptor». Consultado el 15 de Abril del 2012 de la World Wide Web: http://www.pickyguide.es/ordenador_y_software/transceptores_guia.html
- Automatización Industrial (Abril 2012). «HMI y sus aplicaciones». Consultado el 15 de Abril del 2012 de la World Wide Web: <http://www.iaci.unq.edu.ar/materias/laboratorio2/HMI%5CIntroduccion%20HMI.pdf>
- El ABC de la Automatización (Abril 2012). «Interfaz Humano Máquina». Consultado el 15 de Abril del 2012 de la World Wide Web: <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/hmi.pdf>
- Digi Internacional (Julio 2012). «Manual funcionamiento Zigbee». 23 de Julio del 2012 de la World Wide Web: <http://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>
- Asco Válvulas (Febrero 2013). «Manual funcionamiento Válvulas». Consultado el 3 de Febrero del 2013 de la World Wide Web: <http://www.controlandpower.com/catalog/PDFs/ASCO/ASCO%20355%20Special%20Service%20Valves.pdf>
- Electrobombas Periféricas (Abril 2012). «Manual de Operaciones Bombas Qb-70». Consultado el 15 de Abril del 2012 de la World Wide Web: http://www.motoresczerweny.com.ar/documentos/electrobombas/instalacion/manual_bombas_qb.pdf
- Zytech Modules (Mayo 2013). «Descripción de Paneles Solares». Consultado el 17 de Mayo del 2013 de la World Wide Web: <http://www.renova-energia.com/pdf/paneles/Zytech%20ZT5P.pdf>

- Electronic Devices and Circuits Laboratory (Noviembre 2012). «Datos LM317 ». Consultado el 17 de Noviembre del 2012 de la World WideWeb: [http:// www.tedpavlic.com/teaching/osu/ece327/ lab3_vreg/ lab3_vreg_lm317_example.pdf](http://www.tedpavlic.com/teaching/osu/ece327/lab3_vreg/lab3_vreg_lm317_example.pdf)
- I+D Electrónica (Diciembre 2012). «Frecuencia módulos xbee ». Consultado el 15 de Diciembre del 2012 de la World WideWeb: [http:// www.didacticaselectronicas.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=1352&category_id=150&option=com_virtuemart&Itemid=71&vmcchk=1&Itemid=7](http://www.didacticaselectronicas.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=1352&category_id=150&option=com_virtuemart&Itemid=71&vmcchk=1&Itemid=7)
- Electrónica Fácil (Septiembre 2012). «Convertidor I/T». Consultado el 4 de Septiembre del 2012 de la World WideWeb: [http:// www.electronicafacil.net/tutoriales/CONVERTIDOR-CORRIENTE-A-TENSION.php](http://www.electronicafacil.net/tutoriales/CONVERTIDOR-CORRIENTE-A-TENSION.php)
- Microchip (Abril 2013). «Microcontrolador ». Consultado el 5 de Abril del 2013 de la World WideWeb: [http:// www.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30487c.pdf](http://www.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30487c.pdf)
- Digi (Abril 2013). «Guía de referencia XBIB-R-DEV ». Consultado el 12 de Abril del 2013 de la World WideWeb: [http:// www.ftp1.digi.com/support/documentation/xbibrdev_referenceguide.pdf](http://www.ftp1.digi.com/support/documentation/xbibrdev_referenceguide.pdf)
- Digi (Junio 2013). «Ganancia Andena Módulo xbee». Consultado el 10 de Junio del 2013 de la World WideWeb: [http:// www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl?id=2146](http://www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl?id=2146)
- Ayuda Electrónica (Junio 2013). «Manual Radio Mobile». Consultado el 15 de Junio del 2013 de la World WideWeb: [http:// www.ayudaelectronica.com/radio-mobile-software-radio-enlaces/](http://www.ayudaelectronica.com/radio-mobile-software-radio-enlaces/)

GLOSARIO

A

APS: Subcapa de Fábrica

C

CPU: Unidad Central de Procesamiento

E

EPMAPAL: Empresa Municipal de Alcantarillado de la ciudad de Latacunga

ERPM: Estación Repetidora Para la Montaña

F

FBD: Programación en Diagrama de Bloques

G

GPM: galones por minuto

GTB: Gestión Técnica de Edificio

H

HMI: Interfaz humano Máquina

I

INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

ISE: Ión de Electrón Selectivo

IL: Lista de Instrucciones

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

L

LD: Programación en Escalera

LAN: Local Area Network

M

MAC: Dirección identificador de 48 bits que se corresponde de forma única con una interfaz de red

P

PH: Unidad para medir el Alcalinidad del Agua

PPM: Partes por Millón de unidad

PID: control Proporcional Integral Derivativo

PLC: Controlador Lógico Programable

PHY: Capa Física

PIC: Peripheral Interface Controller. Controlador de Interfaz Periférico.

PWM: Pulse width modulation. Modulación por ancho de pulso.

S

SOFTWARE: Conjunto de instrucciones que se ejecutan en el PIC, computadora.

W

WLAN: wireless local area network

Z

ZIGBEE: es un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo