

# 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

Fausto Acuña  
Departamento de Energía y Mecánica  
ESPE, Extensión Latacunga  
Latacunga, Ecuador  
[fvacunia@espe.edu.ec](mailto:fvacunia@espe.edu.ec)

Ayala Silvia, Pacheco Santiago  
Carrera de Ingeniería Mecatrónica  
ESPE, Extensión Latacunga  
Latacunga, Ecuador

## Resumen.

El siguiente artículo presenta una investigación sobre 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 cual permite dosificar los niveles de cloro en el agua, así como también el monitoreo en forma remota de su alcalinidad, en la implementación se partió estableciendo las lecturas de cloro mediante un sensor acoplado a un PLC para controlar la dosificación mediante el uso de una servoválvula proporcional en base al programa de control y un HMI; el monitoreo del PH se realizó en base a estaciones repetidoras con módulos xbee que permiten transmitir la señal desde las viviendas hacia la planta de potabilización para determinar las pérdidas en la red. El sistema de cloración es un aporte a la colectividad debido a la mejora en la calidad del agua.

## Abstract.

The following research paper presents an investigation about the implementation of a monitoring and control system for water chlorination remotely using ZigBee technology for water treatment plant "El Calzado" of the EPMAPAL.

Which allows dosing the chlorine levels in the water, as well as to

remotely monitor its alkalinity, in implementing establishing split chlorine readings by a sensor coupled to a PLC to control the dosing by using it a servo valve based proportional control program and HMI; pH monitoring was performed based on relay stations xbee modules that allow you to transmit the signal from the houses to the water treatment plant to determine the losses in the network. The chlorination system is a contribution to the community due to the improvement in water quality.

## I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

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.

La potabilización del agua generalmente incluye los siguientes procesos: Captación, Conducción, Sedimentación, filtración, aireación, métodos químicos, corrección de PH, evaporación y desinfección del agua.

### A. Desinfección del agua.

La desinfección del agua para uso humano tiene por finalidad la eliminación de los microorganismos patógenos contenidos en el agua mediante la inclusión de cloro en el agua.

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.

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 de hígado, estomago, riñón, colon, recto.

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. Por tales razones la EPMAPAL se apega la Norma INEN 1108 con la finalidad de establecer un eficaz control sanitario del agua con límites permisibles de cloro en un rango de 0,3PPM a 1,5PPM y el PH en márgenes de 6,5 a 8,5.

**II. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN**

El sistema está compuesto de tres estaciones principales conformadas por cuatro módulos repetidores, un módulo coordinador, un sistema de control a cargo de un PLC, un HMI para la manipulación de variables de control y la dosificación de cloro a cargo de una servoválvula proporcional.

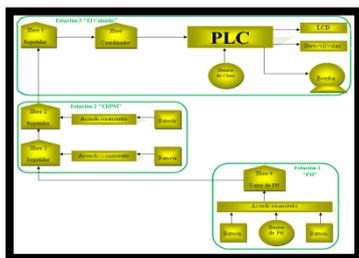


Fig. 1: Diagrama de Bloques del Sistema.

**A. Diseño Placas Electrónicas**

El sistema empezó con el diseño de las placas de las estaciones repetidoras

para acondicionar las señales de los niveles de baterías en los módulos xbee.

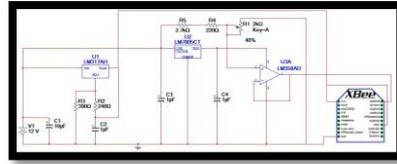


Fig. 2: Circuito General Repetidores.

Se debe considerar que cada una de las señales que manipulan los módulos xbee no debe pasar los 3.3v.

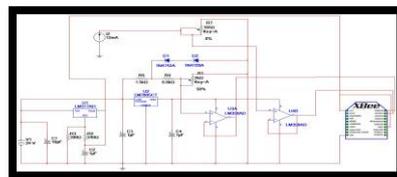


Fig. 3: Circuito General estación PH.

El sensor de PH entrega una señal de cloro por lo que es necesario realizar un convertidor I/V para acoplar al módulo xbee.

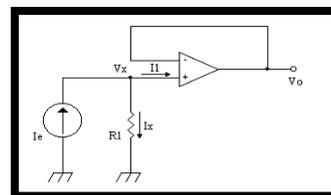


Fig. 4: Convertidor Corriente Tensión.

Debido a que la servoválvula proporcional funciona con una frecuencia de 300hz para la variación de Voltaje se diseñó un circuito de generación de PWM.

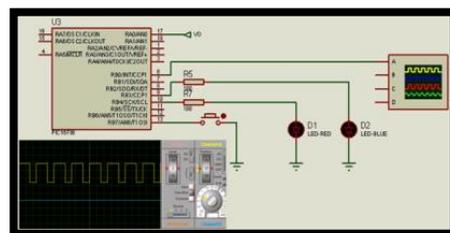


Fig. 5: Generador de PWM

Todas las placas de los circuitos fueron diseñadas en Circuit Maker.

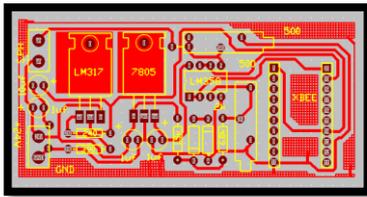


Fig. 6: Diseño Placas Electrónicas

### A. Diseño y simulación de la Red en Radio Mobile.

En el estudio de campo se obtienen las coordenadas de ubicación de las estaciones repetidoras que permiten simular el enlace de radio frecuencia.

Tabla 1: Coordenadas Geográficas Estaciones

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

A continuación se muestra el esquema gráfico de la simulación que además permite obtener datos exactos para la implementación del sistema tales como la altura y colocación de las antenas para asegurar línea de vista entre las estaciones.



Fig. 6: Ubicación Geográfica Estaciones



Fig. 7: Enlace Estación PH y ERPM1



Fig. 8: Enlace Estación ERPM1 y ERPM2



Fig. 9: Enlace Estación ERPM2 y El calzado

### A. Configuración Módulos Xbee

La configuración de los módulos xbee se realiza mediante el programa propio del fabricante X-CTU.

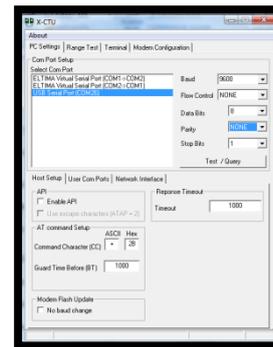


Fig. 10: Ventana de Reconocimiento módulo X-CTU

Debido a las necesidades de funcionamiento de los módulos xbee se especifican los parámetros de configuración en la tabla 2.

Tabla 2: Configuración Módulos

Módulos	Parámetros de Configuración	Descripción	Valores de configuración	Detalles
Coordinador Estación "El Calzado"	Direccionalidad	Direc. Dest. Alto	0	Comunica con cualquier módulo
		Direc. Dest. Bajo	FFFF	
	Habilitar Coordinador	Coordinador	1 (Coordinador)	Recibir datos de todos los módulos xbee
	API	Opción API	1 (API habilitado)	Los datos enviados se almacenan en un frame con estructura definida.
	Velocidad de Transmisión	Velocidad	4 (19200bps)	Emparejar velocidad de transmisión con el PLC
Estación "El Calzado"	Potencia de Transmisión	Potencia	4 (Alto)	Para compensar la distancia
	Direccionalidad	Direc. Dest. Alto	13A200	Buscar el camino más corto hacia el coordinador.
		Direc. Dest. Bajo	4064142D	
Habilitar Coordinador	Router	0 (Router)	Módulo actúa como repetidor	

	or			
	API	Opción API	1 (API habilitado)	Los datos enviados se almacenan en un frame con estructura definida.
	Velocidad de Transmisión	Velocidad	0 (1200bps)	Evitar pérdidas de datos debido a la distancia entre estaciones
	Potencia de Transmisión	Potencia	4 (Alto)	Para compensar la distancia
Estación ERP 1	Direccionamiento	Direc. Dest. Alto	13A200	Buscar el camino más corto hacia el coordinador.
		Direc. Dest. Bajo	4064142D	
	Habilitar Coordinador	Router	0 (Router)	Módulo actúa como repetidor
	API	Opción API	1 (API habilitado)	Los datos enviados se almacenan en un frame con estructura definida.
	Velocidad de Transmisión	Velocidad	0 (1200bps)	Evitar pérdidas de datos debido a la distancia entre estaciones
	Potencia de Transmisión	Potencia	4 (Alto)	Para compensar la distancia
Estación ERP 2	Direccionamiento	Direc. Dest. Alto	13A200	Buscar el camino más corto hacia el coordinador.
		Direc. Dest. Bajo	4064142D	
	Habilitar Coordinador	Router	0 (Router)	Módulo actúa como repetidor
	API	Opción API	1 (API habilitado)	Los datos enviados se almacenan en un frame con estructura definida.
	Velocidad de Transmisión	Velocidad	0 (1200bps)	Evitar pérdidas de datos debido a la distancia entre estaciones
	Potencia de Transmisión	Potencia	4 (Alto)	Para compensar la distancia
Estación PH	Entradas/Salidas	Entrada 0	2 (Ent. Analógica)	Habilita al puerto 0 como entrada analógica.
		Entrada 1	2 (Ent. Analóg.)	
	Direccionamiento	Direc. Dest. Alto	13A200	Buscar el camino más corto hacia el coordinador.
		Direc. Dest. Bajo	4064142D	
	Habilitar Coordinador	Dispositivo Final	2 (End Device)	El módulo únicamente recogerá los datos ingresados por sus entradas analógicas
	API	Opción API	1 (API habilitado)	Los datos enviados se almacenan en un frame con estructura.
Velocidad de Transmisión	Velocidad	0 (1200bps)	Evitar pérdidas de datos debido a la distancia entre estaciones	
Potencia de Transmisión	Potencia	4 (Alto)	Para compensar la distancia	

Establecida la recepción de datos en el PLC se analiza los bytes de la trama de datos para identificar su longitud, la dirección de los módulos y la localización de la información de las entradas analógicas.

Tabla 3: Recepción de la Trama de Datos

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		

**B. Diseño PID**

Para el control de la servoválvula proporcional se utiliza la función de PID en modo de ajuste automático para que las constantes kp, ki, kd se calculen automáticamente.

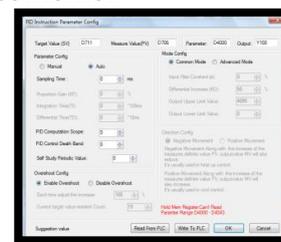


Fig. 12: Configuración PID

**B. Diseño del Software**

El diseño principal del sistema de control se basa en tres ejes fundamentales: el reloj del sistema, la recepción de datos y el control de la dosificación de cloro que debe cumplir las funciones de los siguientes diagramas de flujo.

**A. Configuración Comunicación**

Para la comunicación entre el PLC y el módulo xbee coordinador se la realiza mediante comunicación serial y utilizando el modo de comunicación libre del PLC.



Fig. 11: Acceso a la configuración de modo de comunicación libre

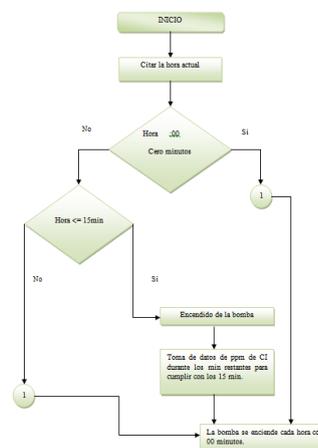


Fig. 13: Diagrama de Flujo Reloj del Sistema

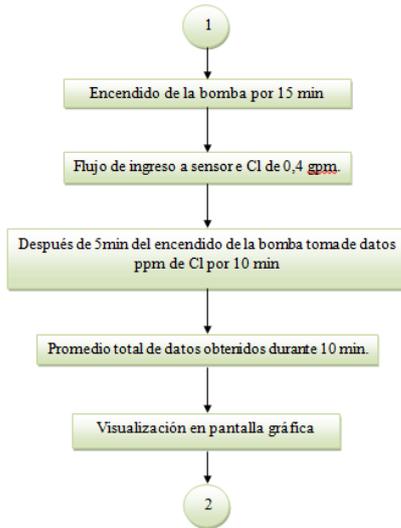


Fig. 14: Diagrama de Flujo Tiempo de Recopilación de Datos

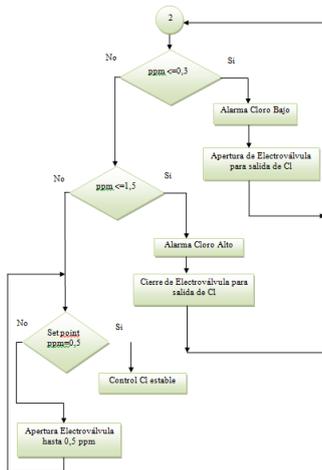


Fig. 15: Diagrama de Flujo Set point y límites de ppm cloro.

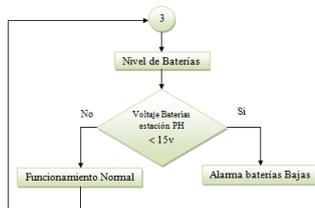


Fig. 16: Diagrama de Flujo Nivel Batería estación PH

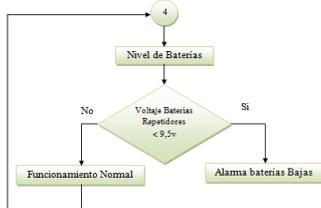


Fig. 17: Diagrama de Flujo Nivel Batería estación ERPM

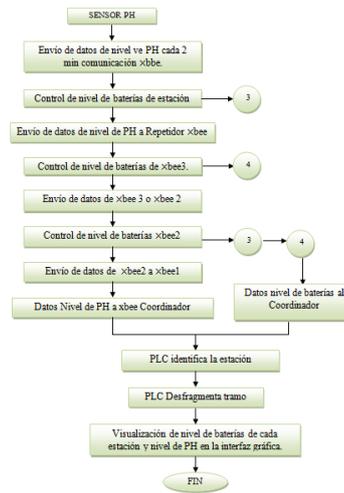


Fig. 17: Diagrama de Flujo Control de datos módulos xbee

### A. 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.



Fig. 18: Pantalla de Visualización

Para entender el funcionamiento íntegro de las funciones insertadas en el interfaz humano máquina sistema se debe interpretar la lógica de programación mediante el siguiente diagrama de flujo.

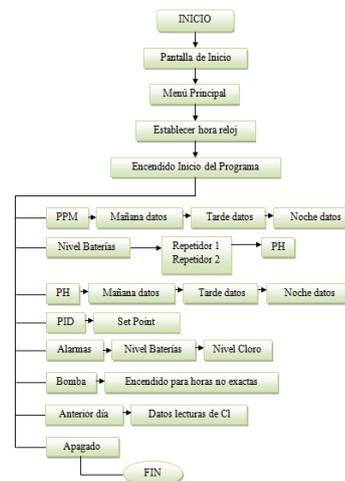


Fig. 19: Diagrama de Flujo Funcionamiento HMI

**B. Implementación Hardware.**

El hardware comprende la elaboración de la parte de física del sistema de cloración como son el ensamblaje e instalación final de cada uno de los componentes pertenecientes al sistema.

Después de comprobar el funcionamiento físico de los circuitos en el protoboard y la elaboración del diseño de las placas se debe soldar cada uno de los componentes que integran las mismas y probar su correcto funcionamiento.



Fig. 20: Acoplamiento de Elementos Placa Estaciones Repetidora



Fig. 21: Acoplamiento de Elementos Placa Estación PH

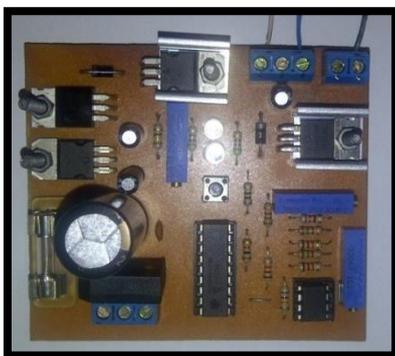


Fig. 22: Acoplamiento de Elementos Placa de Control Servoválvula

Con las placas terminadas se debe elaborar las cajas de las estaciones repetidoras y estación PH las mismas que constan de las baterías con sus respectivos cargadores y las placas de control.

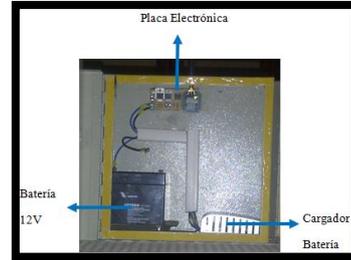


Fig. 23: Montaje Cajas Repetidoras

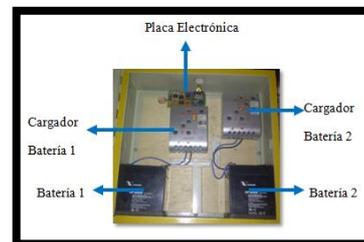


Fig. 24: Montaje Caja Estación PH

Las baterías de cada una de las estaciones repetidoras se encuentran siendo realimentadas por paneles solares.



Fig. 25: Módulos Terminados

La Caja de control está compuesta de las protecciones, pantalla de visualización, el PLC, módulo de expansión, botón de paro de emergencia y luces indicadoras.



Fig. 26: Caja de Control

El sensor de cloro se encuentra ubicado en su propio módulo debido que el suministro de agua debe ser controlado por medio de un flujómetro.

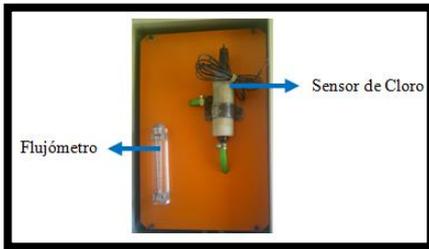


Fig. 27: Caja Sensor de Cloro

El suministro de agua hacia el sensor de cloro se lo realiza mediante se lo realiza mediante una bomba de medio hp de potencia debido a que el caudal de suministro al sensor de cloro es de 0.5 GPM.



Fig. 28: Instalación Bomba de Agua

Las estaciones repetidoras se encuentran instaladas en postes de 6 metros en una montaña situada al norte de la urbanización el calzado.



Fig. 29: Instalación Repetidores

En la urbanización la hacienda localizada en el barrio locoa se

encuentra instalada la estación PH denotada así debido a que en este sitio se encuentra instalado el sensor de PH.

**A. Pruebas de Comunicación**

Para las pruebas de comunicación entre el módulo coordinador y el PLC se debe analizar que la trama enviada por el xbee esté llegando a los registros de almacenamiento del PLC y luego analizar cuáles son los bytes a utilizar.

Tabla 4: Trama de Datos Módulo xbee PH

Trama Xbee PH								
7E	00	14	92	00	13	A2	00	40
6F	B2	90	FF	FE	O1	O1	00	00
O3	00	A6	O1	18	O6			

Tabla 5: Trama de Datos Repetidores

Trama Xbee ERPM1								
7E	00	12	92	00	13	A2	00	40
70	E5	CF	FF	FE	O1	O1	00	00
O1	00	D8	7C					
Trama Xbee ERPM2								
7E	00	12	92	00	13	A2	00	40
98	19	39	FF	FE	O1	O1	00	00
O1	00	78	16					

En las tramas de datos se considera que los bytes de rojo indican el inicio de la trama, los bytes de color verde muestran la longitud del frame de datos, el byte que se encuentra en el casillero de color blanco enseña la dirección del módulo que está transmitiendo, los bytes de color amarillo representan las entradas habilitadas agrupadas de 2 en dos de derecha a izquierda y el byte de morado indica el cheksum y fin del frame de datos.

**B. Detección de variación de cloro**

Debido a la lentitud del proceso entre subida y bajada de la concentración de cloro se debe establecer un tiempo promedio de 15 segundos para que el

sistema pueda detectar la mínima variación.

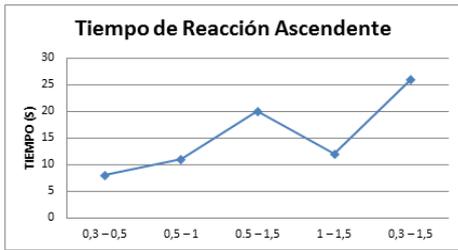


Fig. 33: Tiempo de reacción ascendente

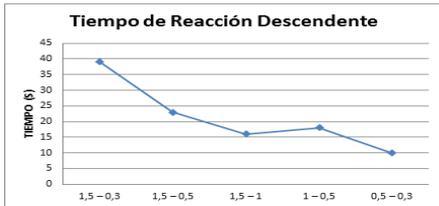


Fig. 34: Tiempo de reacción descendente

**A. Salida del PID**

Para generar el PID en el programa del PLC se establece la opción de ajuste automático y en base al tiempo de reacción del sensor de cloro se determinó que el sistema tarda 5 minutos en estabilizar la concentración de cloro.

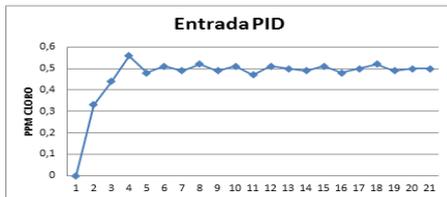


Fig. 35: Estabilización cloro residual

**B. Análisis de Resultados**

Los resultados que arrojó el sistema de cloración una vez en funcionamiento fue el mejoramiento permanente de la calidad del agua debido a que tanto las lecturas de cloro se tornaron exactas en comparación al anterior sistema de medición efectuado por colorímetro. Además se logró estabilizar los niveles de cloro en un 0,5 PPM existiendo pequeñas fluctuaciones debido a la lentitud del proceso.

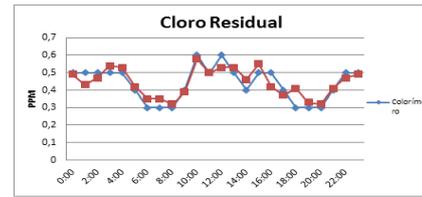


Fig. 36: Comparación de medidas entre el Colorímetro y sensor de cloro

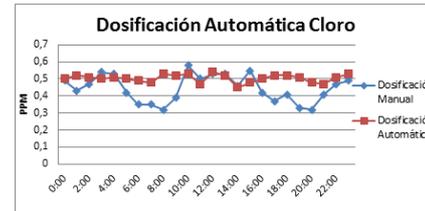


Fig. 37: Comparación Sistemas de Dosificación

En cuanto a los niveles de PH el sistema demostró que en ciertas horas del día se encuentra 0.5 partes por debajo del límite permisible la causa probable se atribuye a la contaminación interna de las tuberías en la red.

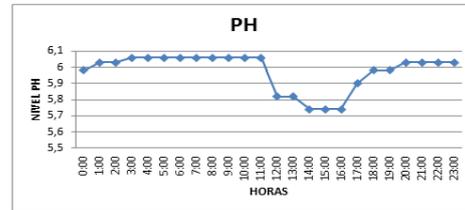


Fig. 38: Niveles de Alcalinidad del Agua.

La recarga de las baterías de las estaciones repetidoras están a cargo de paneles solares obteniendo un valor máximo de carga en horas cercanas al medio día y debido al consumo ínfimo de energía de los módulos xbee la descarga es próxima a 0,1v por cada hora en las que la radiación es prácticamente nula.

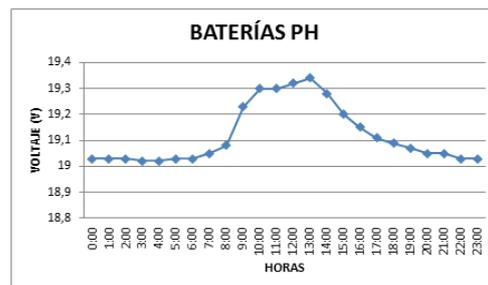


Fig. 39: Niveles de Baterías Estación PH.

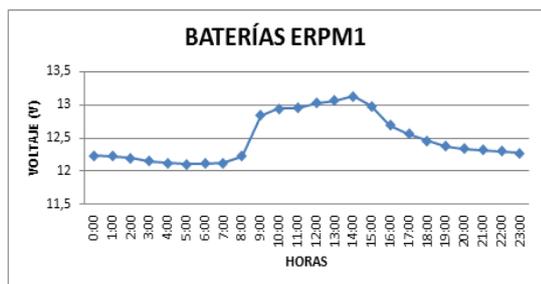


Fig. 40: Nivele de Batería Estación ERPM1.

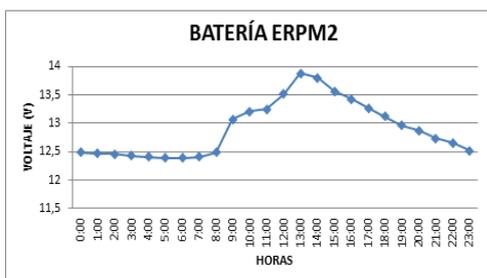


Fig. 41: Nivele de Batería Estación ERPM 2.

### III. COCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### A. CONCLUSIONES

- Mediante tecnología zigbee se monitorea la alcalinidad del agua por medio de la implementación de un sensor de PH y estaciones repetidoras.
- Con la utilización de un PLC, sensor de cloro y servoválvula proporcional se controla 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.
- 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.

- 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.

- 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.

#### B. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la utilización de mezcladores en los tanques reservorios de agua para obtener una mezcla homogénea de cloro con agua antes de tomar las lecturas.
- En base a los resultados se recomienda tomar muestras de cloro residual con colorímetros por lo menos una vez por semana para comprobar la eficiente dosificación de cloro.
- Mantener el reloj del sistema igual para que los datos sean almacenados en las horas exactas del día.

### IV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Robert F. Coughlin y Frederik F. Driscoll. (1999). Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales (5ª Ed.). Naucalpan de Juárez, Edo México. Prentice Hall, Página 67

Mott, Robert L.(2006). Mecánica de Fluidos (6° Ed.). Naucalpan de Juárez Edo. México. Prentice Hall, Página 402

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>

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/>



**Silvia Ayala**, nació el 23 Julio de 1988 en Riobamba provincia de Chimborazo en Ecuador. Es graduada de Ingeniera en

Mecatrónica de la Escuela Politécnica del Ejército extensión Latacunga en el año 2013.

**Áreas de interés:** Automatización Industrial Mecatrónica, Redes de Comunicación Industrial, Mantenimiento y Seguridad Industrial.

**Email:**saayalat@yahoo.com



**Santiago Pacheco**, nació el 27 Julio de 1988 en Latacunga provincia de Cotopaxi en Ecuador. Es graduado de Ingeniero en

Mecatrónica de la Escuela Politécnica del Ejército extensión Latacunga en el año 2013.

**Áreas de interés:** Redes de comunicación inalámbrica, automatización de procesos industriales, Robótica industrial.

**Email:**pachesant@gmail.com