



Instituto Tecnológico De Tuxtla Gutiérrez

Reporte Final De Residencia Profesional

Proyecto:

Modelo dinámico del proceso de producción de agua potable.

Realizado a:

Instituto Tecnológico De Tuxtla Gutiérrez

Asesor:

Dr. Héctor Hernández de León

Residente:

Carlos Emir Pérez Morales

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, diciembre 2012

ÍNDICE

CAPITULO I	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. JUSTIFICACIÓN	4
3. OBJETIVOS	5
3.1Objetivogeneral	5
3.2 Objetivos específicos	5
4. CARACTERIZACIÓN DEL AREA EN QUE PARTICIPÓ	6
4.1 Datos de la empresa	6
5. PROBLEMAS A RESOLVER	7
6. ALCANCES Y LIMITACIONES	7
CAPITULO II	8
7Fundamento teorico	9
<i>7.1Marco referencial</i>	9-10
<i>7.2Marco conceptual</i>	10
7.2.1.Proceso De Tratamiento De Agua Potable	10-12
8.Sensores	13
8.1.Pt100	13-18
8.2pH	18-20
8.3Turbidez	20-22
9..Sistemas de adquisición de datos	22
9.1..Acondicionamiento de señal	22-23
9.2Acondicionamiento Lineal	23
9.3.Convertidor I/V Con Entrada Flotada	24
10Puente de Wheatstone	24-26
11.Amplificadores de instrumentación	26-28
CAPITULO III	29
12.Metodología	30-55
CAPITULO IV	56
13.Resultados	57-58
14. conclusiones	59
15. blibliografias	60-61
16. Anexos	62-70

Capítulo I

1 Introducción

La necesidad de optimizar el servicio de agua potable en una red de distribución de agua, se han incorporado el uso de nuevas tecnologías tales como la electrónica, la informática, y la automatización. La necesidad de controlar los procesos ha aumentado gracias a la creación de algoritmos matemáticos que estén constantemente supervisando el estado de dicha red, las fugas de agua potable producen desperdicio de agua, reducen la eficiencia de las redes y generan una pérdida económica los organismos operadores del sistema de distribución de este tipo de líquido.

En la actualidad la operación de procesos industriales no sólo está basada en su controlabilidad, sino también en la supervisión y detección de fallas para de este modo aumentar la confiabilidad, seguridad y disminuir costos.

La producción de agua potable es un proceso que requiere especial cuidado en el control de cada una de las etapas de obtención del mismo.

2 Justificación

La producción de agua potable es un proceso que requiere especial cuidado en el control de cada una de sus etapas. La escasez de los sensores en línea que permiten el monitoreo en tiempo real representan uno de los principales obstáculos de su análisis. El desarrollo de sensores virtuales ha permitido sustituir parcialmente la necesidad de los sensores en línea. Elemento importante de estos es el establecimiento de modelos dinámicos de comportamiento aplicados a las variables importantes del proceso, siendo esta área en la que se enfoca la presente propuesta de residencia profesional.

3 Objetivo del proyecto

3.1 Objetivo General.

Aplicar herramientas de diseño y simulación a la red de distribución de agua potable de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, con la finalidad de conocer el comportamiento dinámico del proceso de distribución del líquido vital

3.2 Objetivos específicos:

1. Conocer la situación actual de los modelos dinámicos de potabilización del agua.
2. Identificar las variables importantes a la entrada del proceso de producción de agua potable (pH, color, turbiedad, temperatura y demanda de cloro) de tal manera que permitan conocer, mediante la determinación de las ecuaciones principales del modelo matemático, los valores de la dosificación de sustancias químicas que se agregan al agua durante el proceso (sulfato de aluminio y polímero).
3. Diseñar e implementar en un circuito digital, el sistema de adquisición de datos con interfaz inalámbrica, basado en microcontroladores.

4 Caracterización del área en que participo

El proyecto será realizado en el Laboratorio de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (Edificio I) y en la planta potabilizadora SMAPA, previa firma de convenio de colaboración.

4.1 Datos de la empresa:

Nombre: Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

Ubicación: Carretera Panamericana Km.1080 en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas México.

Código Postal: 29000, apartado postal 599.

Teléfono: 01 961 6150380 ext. 325.

Giro, ramo o sector: Educativo e Investigación

Nombre del titular de la empresa: MA José Luis Méndez Navarro

Puesto: Director.

Misión

Formar de manera integral profesionistas de excelencia en el campo de la ciencia y tecnología con actitud emprendedora, respecto al medio ambiente apego a los valores éticos.

Visión

Ser una institución de excelencia en la educación superior tecnológica del sureste, comprometida con el desarrollo socioeconómico sustentable de la región.

Las carreras con que cuenta el instituto son:

- ❖ Ing. Química
- ❖ Ing. Electrónica
- ❖ Ing. Electrica
- ❖ Ing. Mecánica
- ❖ Ing. Industrial
- ❖ Ing. Bioquímica
- ❖ Ing. Sistemas Computacionales
- ❖ Ing. Gestión Empresarial

5 Problemas a resolver

Debido a la necesidad de establecer una verdadera caracterización en los procesos de tratamiento del agua potable, es primordial conocer las variaciones de los sensores más importantes del proceso de potabilización, como lo son, la temperatura, el pH, la turbidez, entre otros.

Un adecuado sistema de adquisición de datos y un sistema de análisis permitirá al operador de la planta contar con el mejor sistema de vigilancia y diagnóstico, ya que se conocerán los límites de funcionamiento de las variables involucradas en el proceso. Además, el contar con las dosis adecuadas de químicos que se agregan al proceso de potabilización, se tendrán ahorros en la adquisición de dichos químicos y el correspondiente cuidado al medio ambiente.

6 Alcances y limitaciones

El proyecto está provisto de ciertas limitaciones debidas principalmente con la transmisión- recepción inalámbrica, ya que esta puede ser afectada por factores muchas veces fuera de nuestro control, como pueden ser situaciones climatológicas severas, interferencias constantes por otros equipos, etc. En este caso se implementa un algoritmo que verifica que el dato que se reciba sea siempre correcto. Además de que se trabaja en varios canales de transmisión, para el caso en que existan equipos con la misma frecuencia de trabajo y en todo caso el mismo canal de transmisión.

Un problema a que se enfrenta el sistema es también debido a la distancia de transmisión, un problema que es fácilmente solucionable, nada más con cambiar los módulos inalámbricos a unos de mayor potencia de transmisión y por consecuencia mayor alcance.

Otro detalle a mencionar es la limitación de los módulos Xbee inalámbricos que permiten un muestreo máximo de 1ms, que para el caso de esta aplicación no tiene repercusión a menos que el muestreo se necesite realizar a un frecuencia mayor a 1Khz, Pero dado el caso de la planta de tratamiento de agua el muestro es aproximadamente cada hora, por lo tanto no es problema mayor el tiempo de muestreo.

Capítulo II

7 Fundamento teórico

7.1 Marco referencial

La red de sensores inalámbricos ha crecido de una forma muy rápida, que los ha convertido en una tecnología de gran auge. En 1997 el Instituto de Ingenieros eléctricos y electrónicos IEEE desarrolla el estándar 802.11 o WLAN1 el cual tiene una gran tasa de transferencia de datos que alcanza aproximadamente 2 [Mbps]. Actualmente en el mercado los protocolos de comunicación inalámbrica más populares son el 802.11.b con una tasa de transferencia de 11 [Mbps] y el 802.11.a con una tasa de 54 [Mbps]. En cuanto a el área de monitoreo del subsuelo existe una red de sensores heterogéneos que permiten un modelado de alta fidelidad del cultivo y del suelo. Una red sensora que comprende uno o más sensores pasivos dispersos dentro de un suelo en ubicaciones y profundidades coordenadas conocidas. Un transceptor comunica de manera inalámbrica con los sensores pasivos para recibir datos que indican una condición dentro del suelo, tales como condición ambiental o una presencia biológica. La comunicación inalámbrica es llevada a cabo en una radiofrecuencia apropiada para la transmisión a través del suelo. El transceptor puede conectarse a un vehículo ubicado por encima o por debajo de la superficie del suelo, un dispositivo que se vincula con el suelo, o un sensor activo ubicado dentro del suelo. En Julio de 1999 se libera el estándar Bluetooth del Bluetooth Special Interest Group (SIG) y que posteriormente sería estandarizado como IEEE 802.15.1 con una tasa de transferencia de 1 [Mbps] y en junio del 2003 es liberado el 802.11.3 con una tasa de transferencia de 55 [Mbps]. Tal es el caso de un sistema de sensores Bluetooth para monitorear variables de un sistema de calorimetría directa utilizando la tecnología Bluetooth como interfaz inalámbrica para el transporte de los datos a un PC. Cada sensor posee un transmisor que se encarga de enviar los datos de manera inalámbrica al receptor, el cual actúa como un concentrador que reúne los datos de los sensores en una sola trama serial, con el fin que una aplicación reconozca, organice y reproduzca gráfica y numéricamente el valor correspondiente a la medición realizada por cada sensor.

Es así que las redes inalámbricas están en constante crecimiento de tal forma que día a día han ido reemplazando en algunas aplicaciones específicas, como sistemas de control, mediciones de variables ambientales y sistemas de seguridad entre otras, a la tecnología de redes cableadas dadas su flexibilidad y fácil instalación. Su desarrollo y tecnología ha sido capaz de integrar en éstas a pequeños dispositivos llamados sensores. Esto nos lleva a conocer una tecnología reciente, innovadora, capaz de solucionar problemas de forma rápida y confiable. Es así que las redes de sensores inalámbricas revolucionan la forma que entendemos y manejamos los sistemas físicos, desde las alas de un avión hasta complejos eco-sistemas. La disponibilidad de sensores de bajo consumo, actuadores, procesadores embebidos y transmisores permite la aplicación del

sensores inalámbricos distribuidos a una gran variedad de aplicaciones incluyendo monitoreo ambiental (aire, agua, suelo, variables químicas), vigilancia militar, instrumentación de planta, seguimiento de inventario, aplicaciones médicas y por último la agricultura. Actualmente una de las necesidades más importantes de esta variedad de aplicaciones es contar con la información lo más rápido posible, es así que las redes de sensores inalámbricas proveen una latencia de procesamiento muy baja, es decir, son capaces de transmitir los datos tan rápidos como sean capturados por el sensor a través de la red enrutando así los paquetes hasta el nodo destino, permitiendo así una respuesta oportuna al estímulo. Así se tiene que las redes de sensores inalámbricas son actualmente una tecnología de punta aplicada a las necesidades actuales en el mercado, que requieran soluciones rápidas y de fácil implementación. Las redes de sensores inalámbricas es una tecnología en constante desarrollo, es así que distintas asociaciones, empresas y universidades están dedicando tiempo e invirtiendo recursos en el desarrollo de la " Tecnología del Futuro. "

7.2 Marco conceptual

7.2.1 Proceso De Tratamiento De Agua Potable.

Cuando el agua no es naturalmente potable habrá que hacer un tratamiento corrector, como sucede con las aguas superficiales. El tratamiento corrector o potabilizador puede ser físico, químico o microbiológico.

Físico:

- Eliminación de la turbiedad y el color; es decir la eliminación de materias en suspensión, finamente divididas, que no asientan fácilmente, acompañadas muchas veces de materias orgánicas coloidales o disueltas, que no son retenidas por la simple filtración. Para ello es necesario un tratamiento previo con coagulante químico, seguido de decantación o clarificación y luego filtración, a través de un manto de arena u otro material inerte y finalmente un tratamiento de desinfección, más o menos intenso, según el grado de contaminación.
- Eliminar o reducir la intensidad de los gustos u olores para lo cual se recomienda distintos procedimientos, que dependen de la naturaleza de la naturaleza del problema, como ser: aireación, Carbón activado, uso de cloro u otros oxidantes, como el ozono, etc., y algunas veces combinando con tratamiento previo del agua natural con un alguicida.

Químico:

- 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). La eliminación de elementos nocivos puede referirse a bajar los contenidos excesivos de hierro, manganeso, flúor, arsénico o vanadio. Por último con respecto al agregado de productos químicos, decimos que se refiere al agregado de flúor (prevenir caries).

Bacteriológico:

- El tratamiento bacteriológico se refiere casi exclusivamente a la desinfección con cloro, pudiéndose utilizar cloro puro, sales clorogenas o hipocloritos. Las dosis a utilizar generalmente se fijan en base al cloro residual, cuyo valor debe estar entre 0.05 mg/ l y 0.1 mg/l para quedar a cubierto de cualquier contaminación secundaria.
- Enumerados como hemos visto los distintos tratamientos correctores, veremos ahora en detalle cada uno de los procedimientos necesarios para potabilizar un agua para potabilizar un agua proveniente de una fuente superficial.
- Desarenador: Al estudiarse una toma de agua debe evitarse al máximo el arrastre de arena. Si las condiciones locales de la toma no lo permite, será preciso prever un desarenado.
- El desarenado tiene por objeto extraer del agua natural, la grava, arena y partículas minerales, más o menos finas, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones y para proteger las bombas contra la abrasión. El desarenado se refiere normalmente a las partículas a 0.2 mm; una granulometría menor corresponde a los procesos de sedimentación simple.

Los procesos que se dan en un tratamiento convencional de potabilización del agua se muestran en la figura 1.

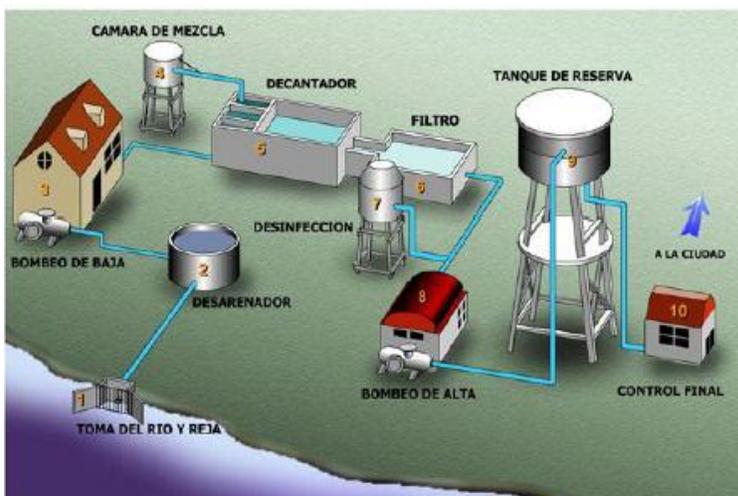


Figura 1. Proceso convencional para el tratamiento de agua.

En la figura 1 se destacan los siguientes procesos: La Toma del río (1) que es el punto de captación de las aguas más rejilla. Impide la penetración de elementos de gran tamaño (ramas, troncos, peces, etc.). El Desarenador (2) que sedimenta arenas que van suspendidas para evitar dañar las bombas. El bombeo de baja (3) son las bombas llamadas de baja presión que toman el agua directamente de un río, lago o embalse, enviando el agua cruda a la cámara de mezcla. La cámara de mezcla (4) donde se agrega al agua productos químicos, como los coagulantes (sulfato de alúmina) y alcalinizantes (cal). El decantador (5) donde el agua llega velozmente a una pileta muy amplia donde se aquieta, permitiendo que se depositen las impurezas en el fondo. Para acelerar esta operación, se le agrega al agua coagulante que atrapan las impurezas formando pesados coágulos. El agua sale muy clarificada y junto con la suciedad quedan gran parte de las bacterias que contenía. Después el Filtro (6) donde el agua decantada llega hasta aquí y pasa a través de sucesivas capas de arena de distinto grosor. El proceso de desinfección es para asegurar aún más la potabilidad del agua, se le agrega cloro que elimina el exceso de bacterias y lo que es muy importante, su desarrollo en el recorrido hasta las viviendas. Finalmente se tiene el sistema de bombeo de alta (8) de donde se toma el agua del depósito para la ciudad, el tanque de reserva (9) y el control final (10). Antes de llegar al consumo, el agua es severamente controlada por químicos expertos, que analizan muestras tomadas en distintos lugares del sistema.

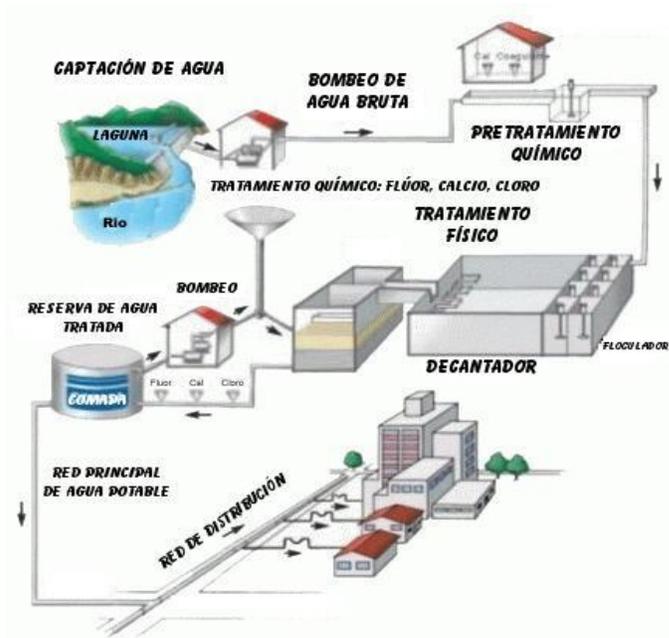


Fig.2. Etapas del proceso de tratamiento de agua.

La planta de tratamiento de agua potable "SMAPA" (ciudad de Tuxtla, México), que fue utilizada como sitio de prueba para este estudio, proporciona el agua a

más de 800 mil habitantes y tiene una capacidad nominal de 800 l/s de agua. La figura 2 presenta la descripción esquemática de las operaciones necesarias para tratar el agua en una planta típica. Generalmente abarca 5 unidades: pre-tratamiento, pre-oxidación, clarificación, desinfección y refinación (Figura 2). El proceso de la coagulación (etapa de clarificación) es causado agregando al agua un compuesto altamente iónico (sulfato de aluminio).

8. Sensores:

8.1 Temperatura (Pt100)

Los sensores de temperatura RTD (Resistive Temperature Detector) son los sensores de temperaturas más estables y precisas, Consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica.

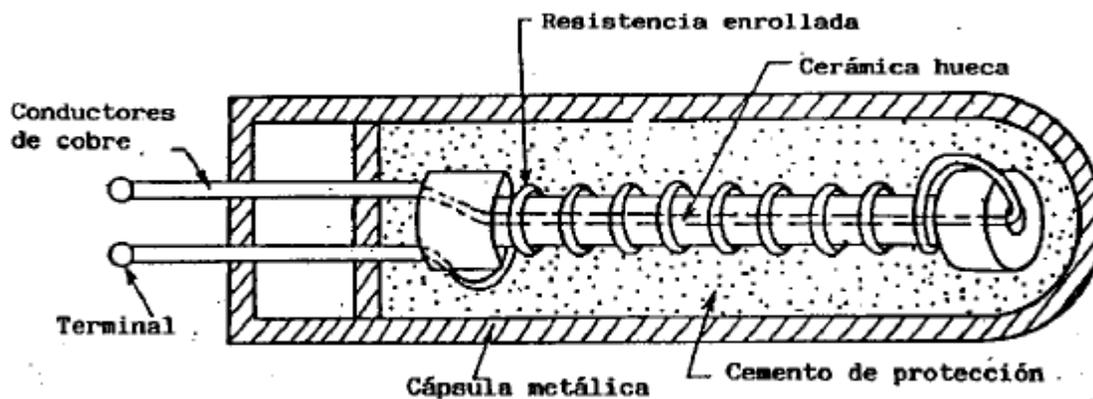


Fig3 Composición física de un sensor PT100

La ecuación que relaciona su resistencia con la temperatura es:

$$R = R_0(1 + \alpha_1\Delta T + \alpha_2\Delta T^2 + \dots)$$

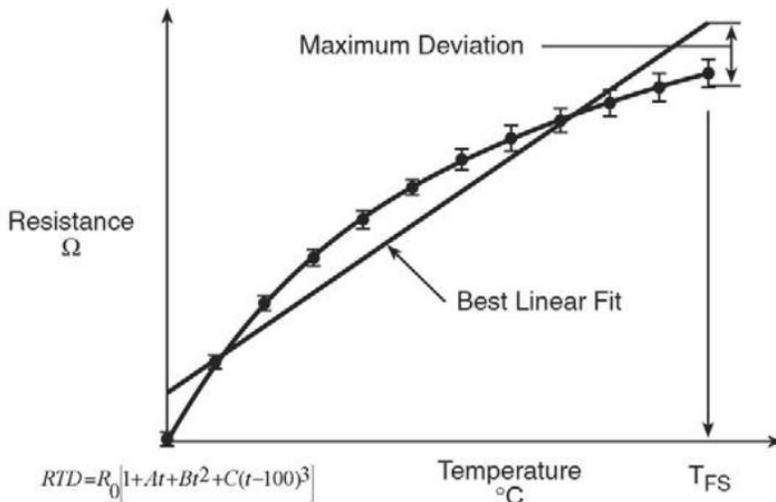
Donde: R_0 = Resistencia a la temperatura de referencia (habitualmente 0 °C).

$$\Delta T = T^a - T \text{ referencia}$$

$\alpha_1, \alpha_2, \dots$ = coeficientes de temperatura. (También suelen expresarse como A, B, C, etc.) Una aproximación bastante utilizada es la dada por la Ecuación Callendar-Van Dusen:

$$R = R_0 [1 + AT + BT^2 + C(T-100)^3]$$

Los coeficientes A, B y C se encuentran estandarizados por normas como la DIN 43760. En la siguiente figura, observar la relación NO LINEAL, es decir, Sensibilidad NO constante.



Curva de calibración típica de una RTD (Ecuación Callendar- Van Dusen). Observar su alinealidad. El coeficiente C es cero para temperaturas superiores a 0°C

Los RTD suelen ir asociados a montajes eléctricos tipo puente, que responden a la variación de la resistencia eléctrica por efecto de la temperatura para originar una señal analógica de 0-20mA ó 4-20mA que es la que se utiliza en el sistema de control correspondiente como señal de medida.

El material utilizado para la fabricación de los RTD, pueden ser los siguientes:

Tabla 1. Características de diferentes materiales termoresistivos

METALES	RESISTIVIDAD (ρ)	COEFICIENTE TÉRMICO (α)	INTERVALO ÚTIL DE TEMPERATURA		DIÁMETRO MÍNIMO DEL HILO	PRECISIÓN USUAL
	Ωm	K^{-1}	$^{\circ}\text{C}$		mm	$^{\circ}\text{C}$
Platino	$10,6 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	-200	950	0,05	0.01
Níquel	$6,84 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-3}$	-150	300	-	0.50
Cobre	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	-200	120	-	0.10

A continuación se muestra una tabla de comparación de los sensores de temperatura RTD con otros tipos de sensores existentes en el mercado.

Tabla 2. Ventajas y desventajas entre sensores de temperatura comerciales

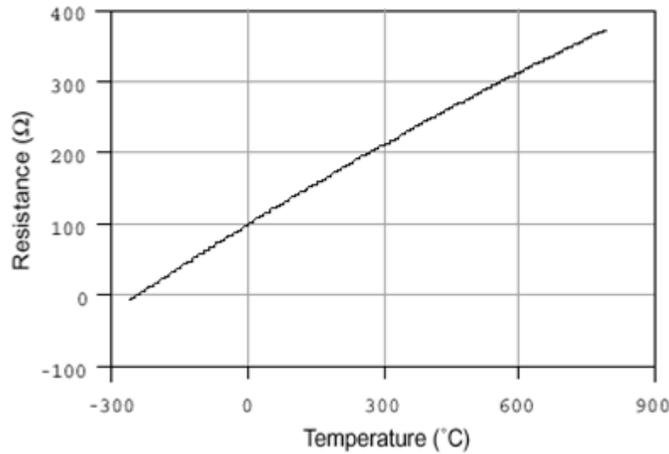
Ventajas	Rtd	Termistor	Sensoric	Termopar
↑	Más estable	Alto rendimiento	El ms lineal	Autoalimentado
	Más preciso	Rápido	El de mayor rendimiento	Robusto
	Más lineal termopar	Medida 2 hilos	Económico	Económico
				Amplia variedad Formas físicas
				Amplia gama de temperaturas
Desventajas	Rtd	Termistor	Sensoric	Termopar

↓	Caro	No lineal	Limitado at<250°c	No lineal
	Lento	Rango de t. Limitado	Lento	Baja tensión
	Precisa fuente al.	Precisa fuente al.	Precisa fuente al.	Precisa referencia
	Peq. Cambio resistencia.	Frágil	Config. limitada	Menos estable
	Medida 4 hilos	Autocalentable	Autocalentable	Menos sensible
	Autocalentable			

La RTD más popular, conocida como PT100 está constituida por un hilo de platino cuya resistencia nominal es de 100 °C a 0° C. La utilización del platino consigue la mayor precisión y estabilidad hasta 500° aprox. Coeficiente más significativo $\alpha = 0.00385$.



Fig 4 Sensor PT100 comercial pequeño.



. Resistance-Temperature Curve for a 100 Ω Platinum RTD, $\alpha = 0.00385$

Fig 5 Curva de linealidad de un sensor resistivo RTD.

El incremento de la resistencia no es lineal pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde. El material del cual está formado el sensor tiene un coeficiente de temperatura de resistencia α , el cual determina la variación de resistencia del conductor por cada grado centígrado, esto se expresa de la siguiente manera

$$R_t = (1 + \alpha t) R_0$$

Donde:

R_0 = resistencia en Ω (ohms) a 0°C

R_t = resistencia en Ω (ohms) a $t^\circ\text{C}$

t = temperatura actual

α = coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0°C y 100°C es de $0.003850\Omega \times (1/\Omega) \times (1/^\circ\text{C})$ en la escala práctica de temp. internales (IPTS-68).

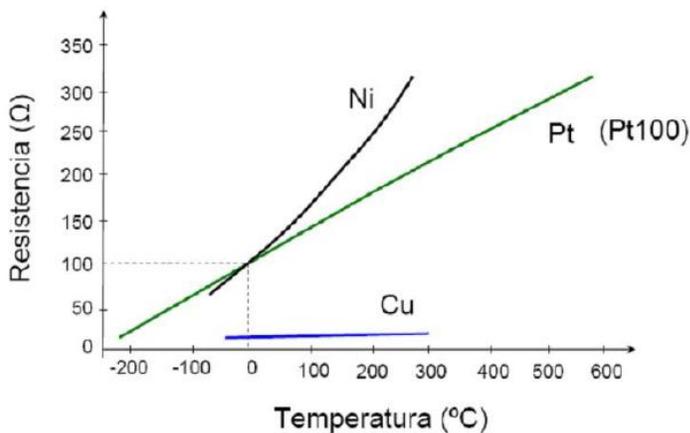


Figura 6. Comparación de linealidad de dos diferentes materiales.

La mejor linealidad y el rango de temperatura que estas soportan van desde -260 hasta 1000 °C.

En el caso de los sensores RTD, PT100, existen tres formas de poderlos conectar (para un PT100 de dos hilos, de tres o de cuatro hilos). El objetivo es determinar exactamente la resistencia eléctrica $R(t)$ del elemento sensor de platino sin que influya en la lectura la resistencia de los cables R_c . El PT100 requerido para este proyecto es el PT100 de 3 hilos. El modo de conexión de 3 hilos es el más común y resuelve bastante bien el problema de error generado por los cables.

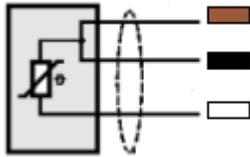


Fig 7 Configuración de colores de los cables de conexión.

El único requisito es que los tres cables tengan la misma resistencia eléctrica pues el sistema de medición se basa (casi siempre) en el "puente de Wheatstone". Por supuesto el lector de temperatura debe ser para este tipo de conexión.

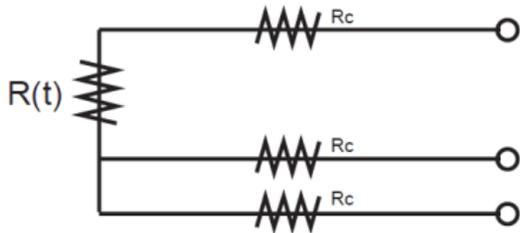


Fig 8 Diagrama esquemático del PT100.

En el caso particular de los instrumentos ARIAN, se hace pasar una corriente conocida a través de los cables azul y verde con lo cual el instrumento mide $2R_c$. Luego mide la resistencia por los cables café y azul para finalmente restarle $2R_c$ al valor medido y obtener $R(t)$.

Autoajuste y corriente del PT100. Se debe hacer pasar una cierta corriente I por el elemento sensor de modo de poder medir su resistencia. Esta corriente I llamada "corriente de excitación" la suministra el instrumento lector y es del orden de 0.1 mA a 2 mA dependiendo del modelo y marca del equipo.

Un problema que puede ocurrir es que la "corriente de excitación" genere por efecto Joule ($P=I^2R$) un calentamiento del elemento sensor aumentando su temperatura y produciendo así un error en la lectura.

Este problema es más pronunciado mientras más pequeña sea la Pt100 (menor capacidad de disipación del calor generado) y a la vez mientras se esté midiendo en un medio menos conductor de calor. Por ejemplo es mayor cuando se mide temperatura en el aire que cuando se la mide en el agua. Valores típicos del error producido en un Pt100 son del orden de 0.5°C por mW generado cuando la Pt100 está en aire sin circular y 0.05°C con la misma Pt100 en agua.

Los Pt100 pueden fácilmente entregar precisiones de una décima de grado con la ventaja que la Pt100 no se descompone gradualmente entregando lecturas erróneas, si no que normalmente se abre, con lo cual el dispositivo medidor detecta inmediatamente la falla del sensor y da aviso.

Este comportamiento es una gran ventaja en usos como cámaras frigoríficas donde una desviación no detectada de la temperatura podría producir algún daño grave. Además la Pt100 puede ser colocada a cierta distancia del medidor sin mayor problema (hasta unos 30 metros) utilizando cable de cobre convencional para hacer la extensión.

8.2 Sensor pH

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH es la concentración de iones hidronio [H₃O⁺] presentes en determinadas sustancias. La sigla significa "potencial de hidrógeno" (pondus Hydrogenii o potentia Hydrogenii; del latín pondus, n. = peso; potentia, f. = potencia; hydrogenium, n. = hidrógeno). Este término fue acuñado por el químico danés Sørensen, quien lo definió como el logaritmo negativo de base 10 de la actividad de los iones hidrógeno.

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

Los sensores electroquímicos son aquellos que utilizan dispositivos que convierten 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 por sus siglas en inglés): de vidrio, de membrana líquida y de metal-óxido de metal. Una sección aparte merecen los ISFET (Ion Selective Field Effect Transistor). Los ISEs 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. Ese 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.

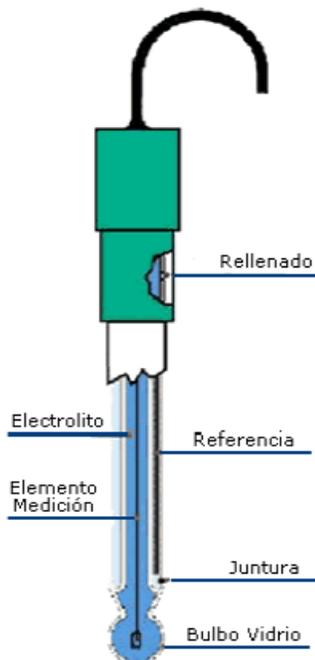


Figura 9. Sensor de pH tipo electrodo.

$$E = E_0 + \frac{RT}{F} \ln [H^+]$$

Donde: R es la constante de los gases y vale $8,31 \text{ } ^\circ\text{K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, T es la temperatura en $^\circ\text{K}$, F es la constante de Faraday que vale 96485 C y E_0 es una constante que agrupa una serie de potenciales: en primer lugar el valor del voltaje de referencia, pero también otros que aparecen en la pila y que escapan al alcance de este trabajo. Sin embargo se quiere mencionar que estos potenciales varían con el tiempo y es lo que provoca que se requiera una calibración periódica. Asimismo E_0 depende de la temperatura. Modelo de "celda electroquímica" para un sensor de pH basado en el electrodo de membrana de vidrio selectivo al ión H^+ .

El modelo de sensor, basado en el electrodo de vidrio formando parte de una celda electroquímica, es el más ampliamente difundido y es el que aparece en los textos de enseñanza a nivel superior. Tiene la ventaja de ser relativamente sencillo, a pesar de que hay fenómenos que no logra explicar. No entraremos en esos aspectos ya que exceden el alcance de este trabajo pero se deja constancia que existen modelos más complejos, aunque no tan difundidos, 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 una precisión aceptable.

Los ISE requieren calibración y limpieza periódica. Para mantener una precisión de 0,1 unidades de pH es necesario.

El sensor de pH de vidrio



Fig 10 Sensor de pH comercial

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 (0,01) y tienen tiempos de vidas relativamente cortos (1 año). Los costos varían entre 30 y 300 dólares. Los electrodos de membrana líquida son similares al electrodo de vidrio excepto que la membrana es un polímero orgánico saturado con un intercambiador iónico líquido. Por más detalles puede consultarse. Los electrodos de estado sólido consisten en metales cuya superficie está recubierta parcialmente por una capa de óxido del mismo metal. Entre ellos, el más utilizado es el electrodo de antimonio. Es resistente, adecuado para el registro continuo y operaciones de control. Su intervalo de utilización es de pH 2 a 8. Otros electrodos metal-óxidometálico bastante utilizados son los de telurio, tungsteno, y molibdeno.

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.

8.3 Turbidez

Las mediciones de turbidez proporcionan datos sobre la concentración de partículas que no se han disueltas y que quedan suspendidas en la fase líquida. La concentración de partículas determinada se utiliza para el control y la optimización

del proceso, por ejemplo, para controlar el crecimiento de la biomasa, la cristalización y los procesos de filtración o la medición de concentración de sólidos en las aguas residuales. Se dispone de dos soluciones de medición óptima de la turbidez: una se basa en la tecnología de dispersión de retorno de la luz y la otra en la tecnología de la dispersión de la luz en un ángulo de 90°. La primera se beneficia de la tecnología de la fibra óptica para la plena compatibilidad con los porta electrodos de proceso mettler toledo.

Esquema del sensor de Turbidez:

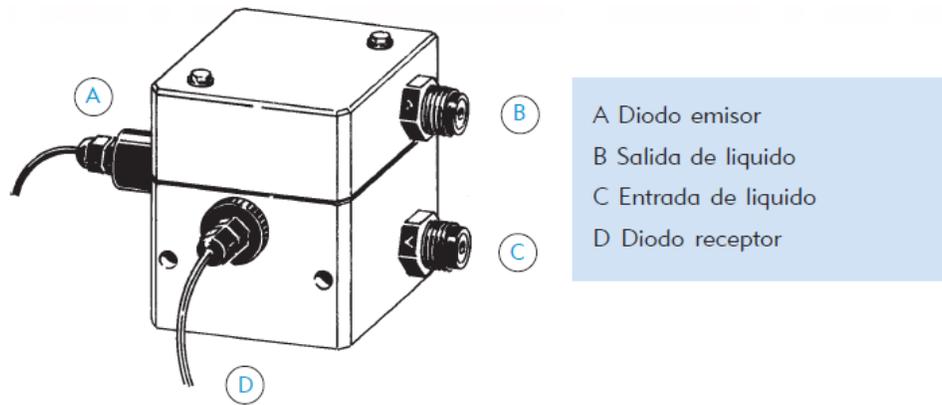


Fig 11 Sensor de Turbidez comercial.

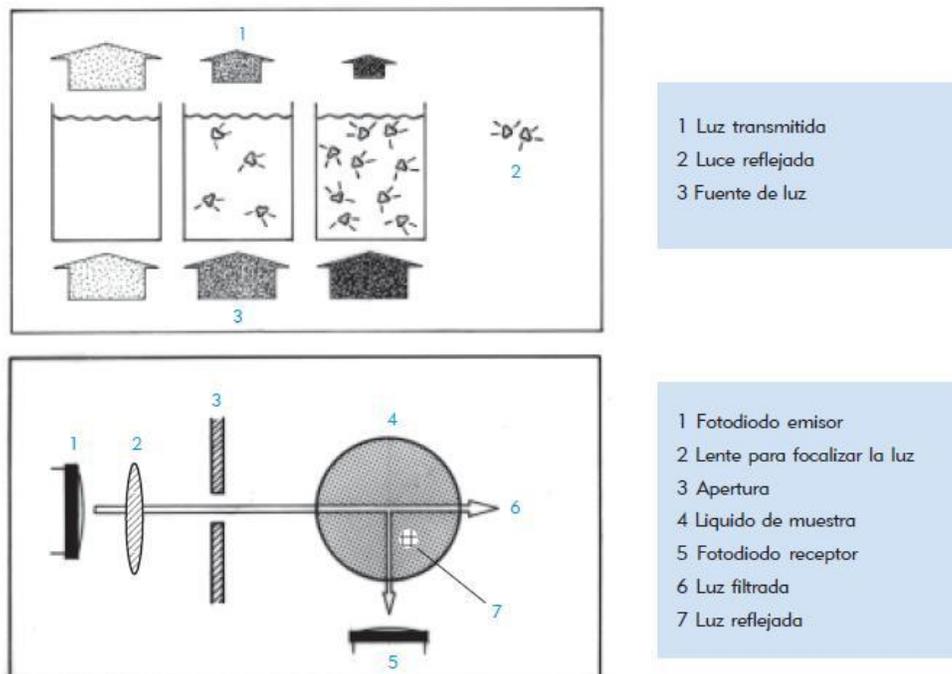


Fig 12 Principio de funcionamiento básico de un sensor de turbidez.

El funcionamiento del sensor se basa en utilizar un fotodiodo que determina la cantidad de luz que se refleja en el líquido a controlar. La luz que atraviesa la muestra del líquido que contiene partículas en suspensión está reflejada en muchas direcciones y una pequeña cantidad de ellas está determinada en el fotodiodo. El ojo humano percibe esta condición como turbidez. Este es el principio básico en que se basa el funcionamiento del sensor.

9 Sistemas de adquisición de datos.

9.1 Acondicionamiento de señal.

El acondicionamiento de señales es parte fundamental de un sistema de adquisición de datos. Un sistema de adquisición de datos (SAD) es un sistema que puede ser utilizado para el control automático de un proceso o simplemente para el monitoreo de las variables del proceso. En un sistema de adquisición de datos se capturan señales eléctricas asociadas con las variables físicas del proceso.

Normalmente, los puertos de entrada de un sistema de adquisición de datos tienen ciertas limitaciones en cuanto al tipo de señales que pueden interpretar. Por ejemplo, se pueden tener señales de voltaje o señales de corriente, la información puede estar contenida sobre la amplitud de la señal o puede estar asociada a las variaciones de frecuencia; la máxima variación en la amplitud, en la frecuencia o en cualquiera que sea el parámetro de la señal que contiene la información también es un factor importante a considerar. Por otra parte, existe una gran variedad de sensores que transforman una variación de una cantidad física en una señal eléctrica análoga (de ahí el nombre de señales analógicas, debido a que son señales eléctricas análogas a una variable física).

Difícilmente podríamos esperar que los sensores se comunicaran sin problemas con los sistemas de adquisición de datos ya que las señales de provenientes de un sensor son normalmente señales de bajo nivel no apropiadas para su captura inmediata en un SAD. La interface que resuelve los conflictos y permite la comunicación del sensor con el SAD es lo que se conoce como etapa de acondicionamiento de señal. Aunque la transformación de señales de bajo nivel en señales de alto nivel capturables por los sistemas de adquisición de datos constituye una de las aplicaciones más necesarias del acondicionamiento de señal, existe otra aplicación igualmente importante que es la transmisión de información. Se tienen algunas señales más adecuadas que otra para la transmisión, por ejemplo, una señal de corriente no sufre la atenuación que una

línea de transmisión le impone a una señal de voltaje; por otra parte, la información contenida en las variaciones de frecuencia de una señal viaja más segura a través de la línea mientras que la información contenida en la amplitud de otra señal representa una víctima fácil para el temible ruido aditivo. Las transformaciones de señal de un tipo a otro antes y después de la transmisión se realizan por medio de bloques de acondicionamiento de señal.

La etapa acondicionadora está formada básicamente por amplificadores operacionales, comparadores de nivel y amplificadores de instrumentación. Los amplificadores operacionales en sus configuraciones básicas (inversora, no inversora, amplificadora, convertidor de corriente a voltaje, etc.), son usados para garantizar que al convertidor A/D le sea suministrado el rango máximo de voltaje y así el mismo pueda dar el mayor número de combinaciones posibles.

9.2 Acondicionamiento Lineal

Una etapa de acondicionamiento lineal es aquella cuya relación de entrada-salida puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$f_{out} x = KG * x + K0$$

Esto es, KG es un factor que permite la ganancia o la atenuación y K0 que representa el corrimiento de cero. El proceso de ajuste de KG y K0 se conoce como calibración.

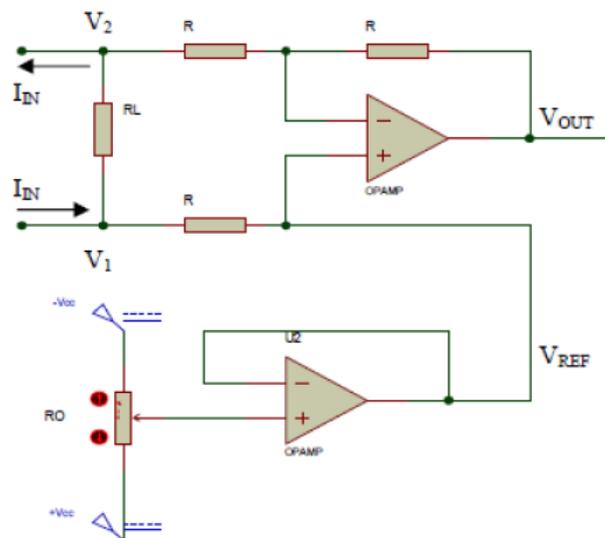


Figura 13. Convertidor de Corriente a Voltaje.

9.3 Convertidor I/V Con Entrada Flotada

En un convertidor I/V con entrada flotada (Figura) la resistencia R_L (encargada de convertir la corriente a voltaje) en este circuito receptor es la resistencia de entrada (suponiendo $R \gg R_L$) y corresponde a la resistencia de carga del transmisor.

Aplicando superposición a este circuito (amplificador diferencial), se puede obtener el voltaje de salida:

Además se tiene que

$$\begin{aligned}V_{OUT} &= V_1 - V_2 + V_{REF} \\ V_1 - V_2 &= I_{IN} * R_L\end{aligned}$$

Entonces el voltaje de salida se puede expresar también como:

$$V_{out} = I_{IN} * R_L + V_{REF}$$

Esta última ecuación permite la selección de R_L . Nuevamente, se puede hacer una combinación serie de resistencias y potenciómetros para los elementos R_L y R_o .

10 Puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es un instrumento eléctrico de medida inventado por Samuel Hunter Christie en 1832, mejorado y popularizado por Sir Charles Wheatstone en 1843. Se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida. La topología del Puente de Wheatstone es la mostrada en la Figura

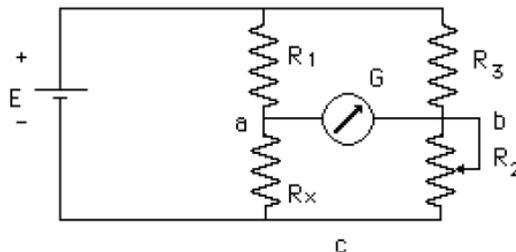


Fig 14. Diagrama esquemático del Puente de Wheatston.

Las resistencias R1 y R3 son resistencias de precisión, R2 es una resistencia variable calibrada, Rx es la resistencia bajo medición y G es un galvanómetro de gran sensibilidad. Si variamos R2 hasta que el galvanómetro indique cero corrientes, se cumplirá que:

$$V_{ac} = V_{bc}$$

Donde:

$$V_{ac} = \frac{R_x}{R_x + R_1} \cdot E$$

$$V_{bc} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \cdot E$$

Por lo tanto:

$$\frac{R_x}{R_x + R_1} = \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

De esto podemos deducir:

$$\frac{R_x}{R_1} = \frac{R_2}{R_3}$$

Por lo tanto:

$$R_x = \frac{R_1}{R_3} \cdot R_2$$

Este circuito se conoce con el nombre de puente de Wheatstone. El primero que diseñó un circuito como éste fue S. Hunter Chistie en 1833, pero su uso no se generalizó hasta que Charles Wheatstone lo empleó para medir resistencias en 1843. Por lo general, la configuración con la que se representa este circuito es la mostrada en la figura, y la condición de equilibrio del Puente, cuando la corriente por el galvanómetro es igual a cero, está dada por la expresión:

$$R_1 R_2 = R_3 R_x$$

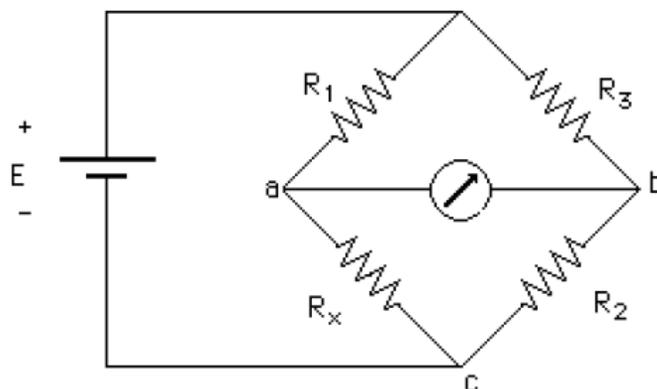


Fig15. Configuración del Puente.

Factores de los que depende la exactitud del puente.

La exactitud y precisión con la que determinemos el valor de R_x de una resistencia con un puente de Wheatstone dependen de los siguientes factores:

1. De la exactitud y precisión de las otras tres resistencias que constituyen el puente. Si R_x está dada por la expresión:
2. $R_x = R_1/R_3 \cdot R_2$
3. De los valores de las resistencias de precisión R_1 y R_3 . Cuanto menores sean los valores nominales de dichas resistencias, mayores serán las corrientes en el circuito, y será más simple detectar variaciones de las mismas.
4. Del valor de la fuente E . Cuanto mayor sea dicho valor, mayores serán las corrientes en el circuito, por lo que será más simple detectar variaciones en sus valores. Debido a las condiciones impuestas sobre la batería y las resistencias, se tienen que realizar los diseños tomando en cuenta las limitaciones de potencia de estas últimas.

Sensibilidad del puente de Wheatstone.

La sensibilidad del puente de Wheatstone se define como el número de divisiones que se desplaza el galvanómetro cuando se produce una variación en la resistencia incógnita (R_x) o en la resistencia de ajuste (R_2). La sensibilidad del puente viene dada por:

$$S_p = \frac{\text{No. de divisiones}}{\Delta R_x}$$

Amplificadores de instrumentación

El amplificador de instrumentación es un amplificador diferencial tensión-tensión cuya ganancia puede establecerse de forma muy precisa y que ha sido optimizado para que opere de acuerdo a su propia especificación aún en un entorno hostil. Es un elemento esencial de los sistemas de medida, en los que se ensambla como un bloque funcional que ofrece características funcionales propias e independientes de los restantes elementos con los que interacciona. Para ello, se le requiere:

- Tengan unas características funcionales que sean precisas y estables.
- Sus características no se modifiquen cuando se ensambla con otros elementos.

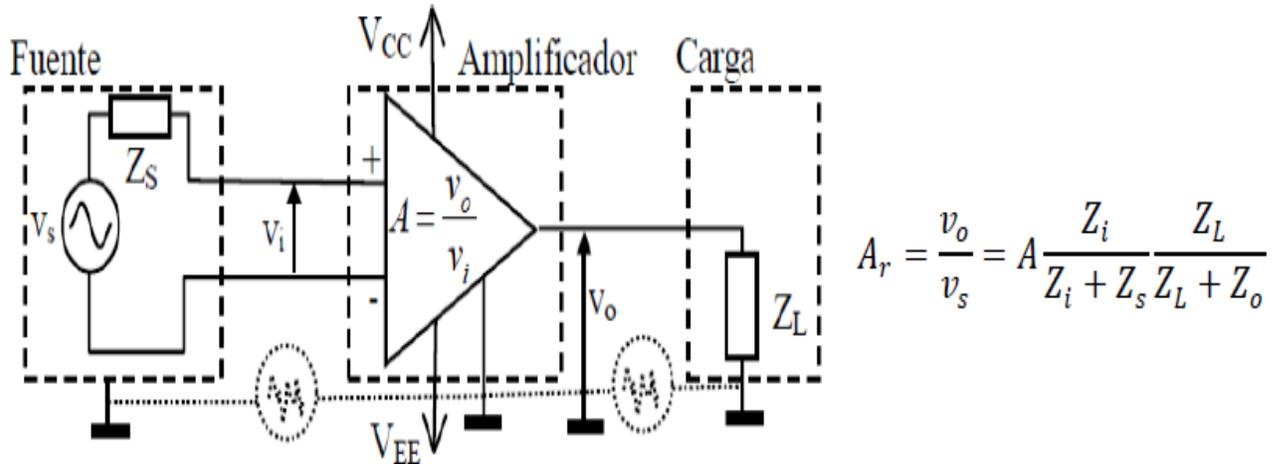


Fig16. Amplificador de Instrumentación.

A los amplificadores de instrumentación se les requieren las siguientes características:

1. Son amplificadores diferenciales con una ganancia diferencial precisa y estable, generalmente en el rango de 1 a 1000
2. Su ganancia diferencial se controlada mediante un único elemento analógicos (potenciómetro resistivo) o digital (conmutadores) lo que facilita su ajuste.
3. Su ganancia en modo común debe ser muy baja respecto de la ganancia diferencial, esto es, debe ofrecer un CMRR muy alto en todo el rango de frecuencia en que opera.
4. Una impedancia muy alta para que su ganancia no se vea afectada por la impedancia de la fuente de entrada.
5. Una impedancia de salida muy baja para que su ganancia no se vea afectada por la carga que se conecta a su salida.
6. Bajo nivel de la tensión de offset del amplificador y baja deriva en el tiempo y con la temperatura, a fin de poder trabajar con señales de continua muy pequeñas.

7. Una anchura de banda ajustada a la que se necesita en el diseño
8. Un factor de ruido muy próximo a la unidad, Esto es, que no incremente el ruido.
9. Una razón de rechazo al rizado a la fuente de alimentación muy alto.

Los amplificadores de instrumentación han sido desarrollados para ser utilizados en sistemas de instrumentación en los que las características de operación son críticas. Las características de los amplificadores de instrumentación pueden optimizarse si se diseñan como circuitos integrados, ya que en este caso, el fabricante puede garantizar el diseño de los elementos críticos, haciendo que tengan valores precisos y que las relaciones entre las características de elementos emparejados tengan razones muy exactas, justo tal como se requiere en su diseño.

La precisión y estabilidad de los amplificadores de instrumentación se realiza a costa de limitar su flexibilidad. Son amplificadores que han sido diseñados para ser utilizados únicamente como amplificadores, pero a cambio de ello, proporcionan unas características excepcionalmente buenas, y además pueden utilizarse sin necesidad de conocer con detalle su diseño interno y con sólo interpretar su especificación externa.

Capítulo III

Metodología

Descripción del Método

El proceso de producción de agua potable

El tratamiento del agua implica procesos químicos y biológicos que transforman a este en agua potable que satisface un conjunto de estándares de calidad a un precio razonable, siempre respetando el cuidado del medio ambiente.

La planta de tratamiento de agua potable "SMAPA" 2012 (ciudad de Tuxtla, México), que fue utilizada como sitio de prueba para este estudio, proporciona el agua a más de 800 mil habitantes y tiene una capacidad nominal de 800 l/s de agua. La figura 1 presenta la descripción esquemática de las operaciones necesarias para tratar el agua en una planta típica. Generalmente abarca 5 unidades: pre-tratamiento, pre-oxidación, clarificación, desinfección y refinación. El proceso de la coagulación (etapa de clarificación) es causado agregando al agua un compuesto altamente iónico (sulfato de aluminio) (C. Lind, 1994), así como también la adición de polímero como ayudante de floculación. Estos dos compuestos son susceptibles de ser modelados matemáticamente, y por tanto, estimarse sus valores de acuerdo al modelo de comportamiento determinado, tomando en cuenta las variables de afectación.

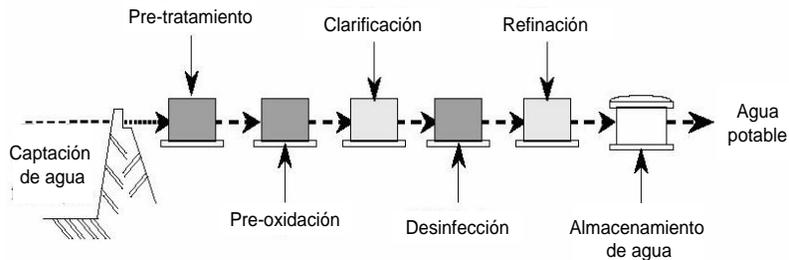


Figura 17. Planta típica de tratamiento de agua potable

La reacción forma un precipitado que atrae los sólidos y las partículas coloidales (partículas negativas). Este precipitado, en forma de lodo, se posiciona en el fondo del tanque por gravedad (figura 2).

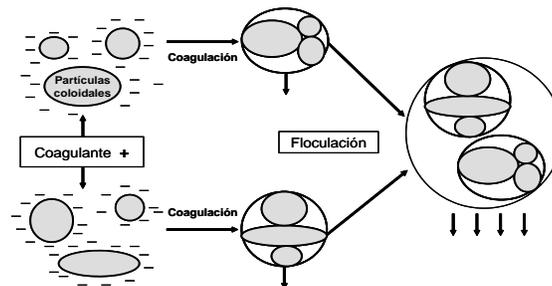


Figura 18. Proceso coagulación-floculación

La etapa siguiente es la filtración, donde partículas existentes aun en el agua quedan atrapadas por camas de arena. La desinfección utiliza cloro. El agua después se almacena en un tanque y está listo ser transportada a través de la red de distribución. En este proceso la supervisión y control son esenciales.

El objetivo del presente artículo es la integración a un esquema de diagnóstico, tanto de la dosis de coagulante, como del polímero, a partir de los modelos calculados de dichas variables y las mediciones en línea de las características principales del agua asociadas a la entrada de la planta, en un sistema incluyente de éstos valores en un esquema general de diagnóstico y supervisión.

A continuación se presentan los modelos de comportamiento del sulfato de aluminio y del polímero, con la finalidad de insertarlos en un esquema de diagnóstico basado en técnicas de clasificación.

Obtención del modelo dinámico

El término modelo está dotado de múltiples acepciones, en general, un modelo es la abstracción de elementos relevantes de un sistema en estudio, generalmente en forma matemática que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento (Aracil J., 1997). El modelo determinado, permite realizar estimaciones, es decir, puede predecirse los valores que tomarán algunas magnitudes en instantes de tiempo. Una vez que se cuenta con el sistema físico (coagulación-floculación, caso de estudio), el siguiente paso hacia la obtención del modelo matemático consiste en la reunión de las relaciones constitutivas y estructurales del proceso. Este modelo puede ser un sistema de ecuaciones que contenga las relaciones mencionadas, las cuales permitan aplicar alguna teoría matemática adecuada ya establecida. Así, entonces, el proceso de modelado consiste en un conjunto de operaciones mediante el cual, tras el oportuno estudio y análisis, se construye el aspecto real de comportamiento del proceso, el cual se reduce al análisis de toda la información de la que se dispone con relación al proceso, su depuración hasta reducirla a sus aspectos esenciales, y su reelaboración correspondiente de modo que pueda ser transcrita a un lenguaje matemático para su transcripción a un lenguaje de simulación computacional. Además, es necesario considerar las condiciones iniciales necesarias para determinar las evoluciones de las variables a tomarse en cuenta durante el horizonte temporal de evaluación. La perfección del modelo será una vez que se hayan corregido los defectos observados e introduciéndolas mejoras consideradas más convenientes. Ahora, el modelo está listo para utilizarse bajo el esquema de estimación de valores propuesta en la presente investigación.

Ahora bien, a continuación se presentan los resultados de la investigación bibliográfica aplicada al modelado del proceso de potabilización, particularmente

en la etapa de coagulación-floculación. Para el sulfato de aluminio no se encontró, en la investigación bibliográfica realizada, ninguna expresión matemática que modelara la relación entre el color y la cantidad de sal utilizada. Por ello se procedió, con los datos aportados por la planta potabilizadora, a utilizar un proceso de interpolación polinomial y diferenciación numérica con la asistencia de matlab [Toolkit, Chapra & Canale, 1998], obteniéndose las ecuaciones mostradas en (1) y (2):

$$\frac{dCs}{dt} = (a_1 - 2 * a_2 t + 3 * a_3 * t^2 - 4 * a_4 * t^3) \quad (1)$$

$$C_f = C_s \frac{Sal}{C_i} \quad (2)$$

Donde:

dCs = Variación del color en diferentes etapas

C_f = Color pronosticado a la entrada en *mg/l*

C_s = Color experimental del agua cruda

C_i = Color real del agua cruda

Sal = Cantidad del sulfato de aluminio en *mg/l*.

Para la determinación del modelo matemático del polímero, se toma en cuenta los estudios realizados por Amirtharajah y Mills 1982, en donde señalan que en la etapa de floculación es muy importante la desestabilización de partículas en tiempos conocidos en mezcla rápida (1 minuto, por ejemplo). Así, las etapas iniciales de floculación están influenciadas por las operaciones de mezcla rápida, en la cual se sugieren las relaciones mostradas en las ecuaciones (3) y (4).

$$G * T * C^{1.46} = 5.9 \times 10^6 \quad (3)$$

$$C = \left(\frac{K}{G * t} \right)^{\frac{1}{1.46}} \quad (4)$$

Donde:

T = Tiempo óptimo de mezcla rápida en segundos

C = Dosis de coagulante en *mg/l*

G = Gradiente de velocidad promedio en s^{-1}

$K = 5.9 \times 10^6$

Y para el subrango de inercia se propone la ecuación diferencial mostrada en (5). Las unidades de mezcla más comúnmente utilizadas se diseñan con gradientes de 700 a 1000 s^{-1} .

$$\left[\frac{dD}{dt}\right]_i = C_1(d_1 + n)^{\frac{7}{3}}\left(\frac{1}{n}\right)^{\frac{4}{3}} \quad (5)$$

Donde:

dD/dt = Tasa de desestabilización

d_1 = Partículas coloidales (m^3)

C_1 = Constante (mg/l)

m = Microescala

Esquemas básicos de diagnóstico

Las herramientas clásicas de supervisión que se aplican a un proceso industrial, como lo es el tratamiento del agua potable, deben ser complementadas por herramientas de vigilancia, de diagnóstico y de un apoyo a la decisión de tal forma que se integren globalmente a la supervisión (J. Aguilar-Martin 1989, H.Hernández De León, 2006) (figura 3). La supervisión consiste principalmente en vigilar la ejecución de una operación, después a proponer acciones correctivas si existe la necesidad.

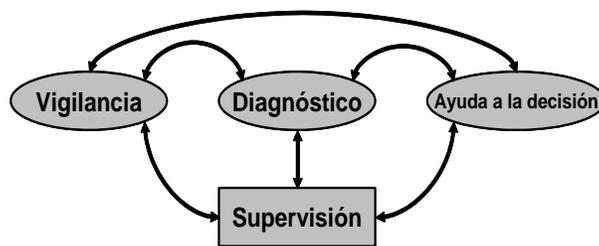


Figura 19. Vigilancia, diagnóstico y apoyo a la decisión a nivel de la supervisión

Así, la vigilancia utiliza los datos provenientes del sistema para representar el estado de funcionamiento para después detectar sus evoluciones. El diagnóstico identifica la causa de éstas evoluciones. Finalmente, el apoyo a la decisión propone las acciones correctivas. Una revisión de los diferentes métodos de diagnóstico es dado por Dash, 1997. Los métodos de diagnóstico son separados en dos categorías tomando en cuenta si ellos necesitan explícitamente un modelo de proceso o si ellos están basados en la disposición de datos históricos de funcionamiento del proceso. La primera categoría reposa en un conocimiento a profundidad del sistema incluyendo las relaciones causales entre los diferentes elementos mientras que la segunda, en el conocimiento a partir de experiencias pasadas.

El método general para el diagnóstico del proceso a partir de la obtención de los valores de las variables de dosificación (sulfato de aluminio y polímero) se presenta en la figura 4. Comprende el pre-tratamiento de los datos y el clasificador difuso, que permite generar la asociación de clases a estados funcionales del proceso. En esta última etapa incluye la participación activa del experto.

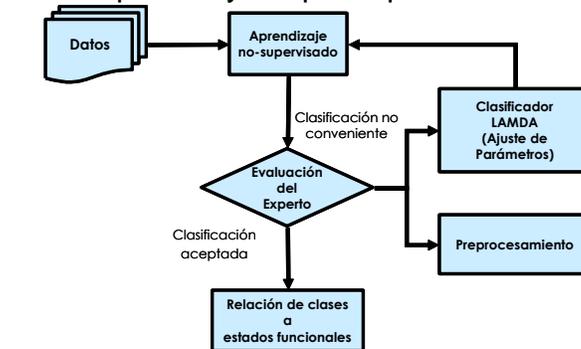


Figura 20. Asociación de clases a estados funcionales

Resultados

El diagrama a bloques de la figura 5, muestra el esquema general que permite la obtención de resultados aplicado al proceso de producción de agua potable, tomando en cuenta las ecuaciones del modelo dinámico de comportamiento de la dosificación de coagulante, sulfato de aluminio (ecuaciones 1 y 2).

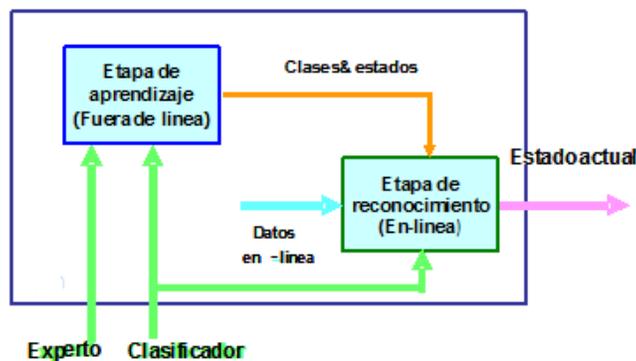


Figura 21. Etapa de reconocimiento en línea de estados funcionales (uso del clasificador difuso)

Con la aplicación de la metodología descrita anteriormente se obtienen los siguientes resultados. La base de datos consiste en 180 mediciones de 3 variables

más la dosis de coagulante calculada con el modelo dinámico, durante un período de 6 meses (mayo a octubre de 2010). Para la generación de los estados funcionales del proceso de potabilización y de acuerdo al método propuesto, se utiliza un algoritmo de clasificación difuso como estrategia general para la obtención del modelo de la planta (utilizando los datos históricos). El reconocimiento de los estados funcionales en tiempo real es de acuerdo a la medición en línea de las variables características del agua a la entrada de la planta. La figura 6 muestra la gráfica de resultados correspondiente a 5 clases, resultado de la aplicación del método de clasificación difuso. Estas 5 clases son asociadas a 5 estados funcionales (mostrados en la figura), con la asistencia del experto de la estación de tratamiento de agua potable. Los estados de la existencia de algas, el incremento de los retrolavados y la turbidez del agua durante el proceso resultan de gran interés a considerarse para propósitos de vigilancia de la planta potabilizadora.

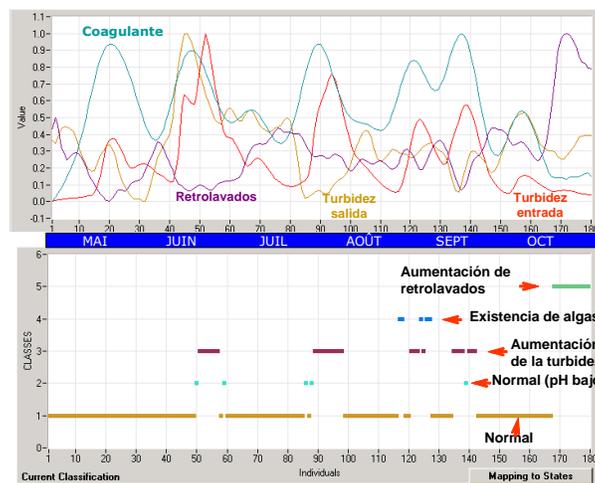


Figura 22. Detección de 5 estados funcionales. La dosis de coagulante calculada incluida en el proceso.

El sistema da solución a muchos de estos problemas y otros que se presentan en este proceso de toma de lectura de los valores de las variables de la planta. El sistema se basa en un concepto modular, el cual en este caso se conforma de cinco partes primordiales las cuales se ilustran en la siguiente imagen:

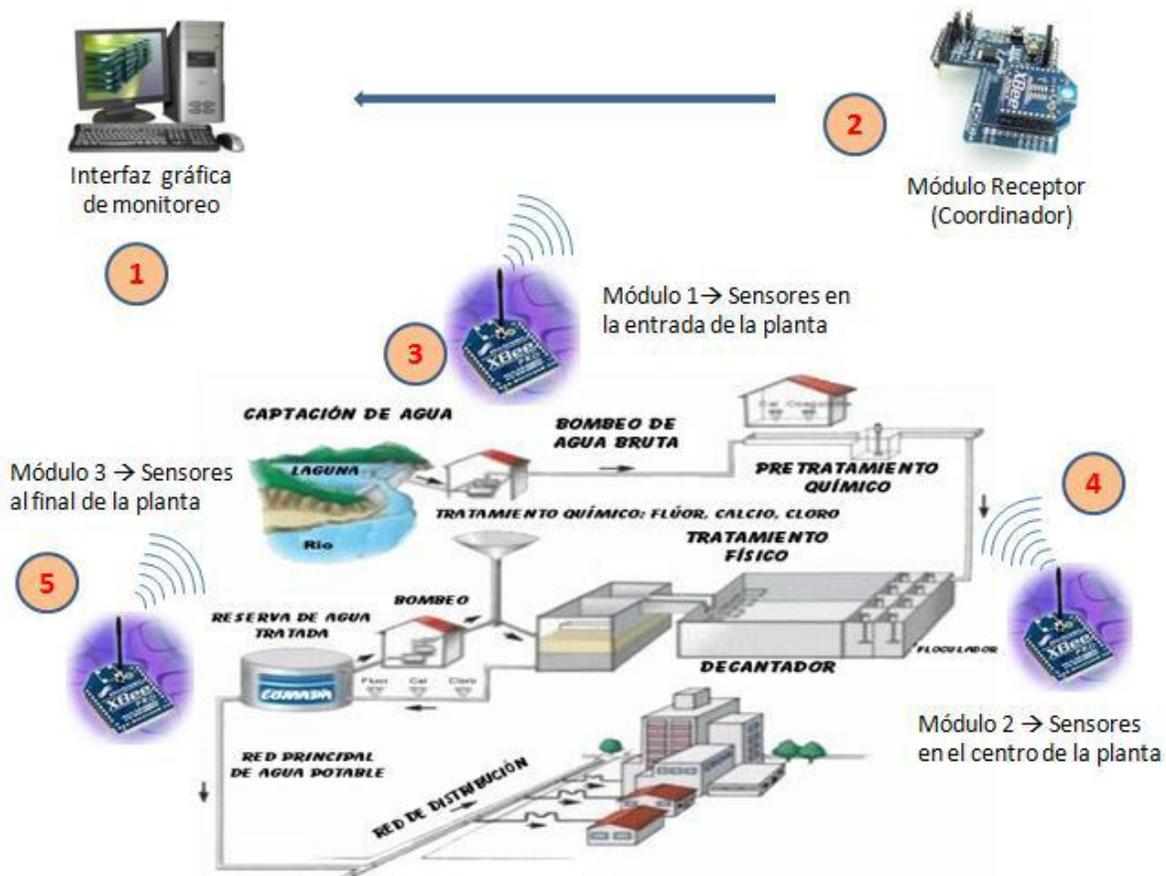


Fig23. Diagrama del proyecto.

Podemos observar en la imagen anterior que se tendrán 3 diferentes puntos de monitoreo, los cuales están dados por los puntos marcados 3, 4 y 5. Cada uno de estos módulos, son módulos en los cuales se diseñarán para ser capaces de realizar lecturas de 3 sensores que son: un sensor de temperatura tipo PT100, un sensor de pH industrial, y un sensor de turbidez del agua de tipo industrial, por lo tanto, el módulo tendrá los acondicionadores de señal necesarios para ajustar las señales a los requerimientos del convertidor analógico-digital de los módulos Xbee respectivos.

Cada módulo será programado para realizar una lectura de sus conversores analógico-digital incorporados y realizará a su vez una transmisión de estos datos cada 5 minutos, durante el tiempo que permanezca conectado en modo captura, por lo tanto el número de muestras colectadas dependerá del tiempo en funcionamiento en modo captura.

Así, por ejemplo, si se mantiene 24 horas en funcionamiento el número de muestras total recabadas será:

$$nMuestras = 24h \times \left(\frac{60min}{5min} \right) = 24 \times 12 = 288$$

Hay que considerar que es el número de muestras por cada módulo debido a un sensor; entonces tomando en cuenta lo anterior y si todos los módulos mandan datos al mismo tiempo, en teoría se podría producir una colisión de datos o en determinado momento algún tipo de pérdida de información, para evitar esto, gracias al protocolo que se maneja y a que se configura un modulo coordinador, se puede tener un control de acceso transmisión- recepción que es llevado a cabo por este módulo coordinador, que no es más que un módulo similar a los anteriores pero programado o destinado a ser un coordinador, el cual recibirá los datos de cada uno de los módulos remotos que se conecten o se asocien a él, administrará los tiempo de acceso, et., éste recibirá los datos correspondientes y los enviará al microcontrolador PIC8f4550 el cual se encargara de identificar un paquete de datos válido y en su caso si es válido, el microcontrolador verificará qué tipo de dato y lugar de procedencia remota de este dato y lo enviará hacia el terminal de la PC por conexión USB. En caso dado el dato sea un paquete no válido será desechado y quedará en espera del próximo paquete de datos.

Una vez que se tenga el dato en el buffer de lectura del puerto USB, la aplicación o interfaz de usuario es la responsable de dos cosas principalmente, la primera, la presentación del dato de manera visual en una gráfica en tiempo real y segunda, el almacenamiento de este dato en un archivo dentro de la pc o cualquier dispositivo de almacenamiento disponible. Esto con la posibilidad de mantener un historial que permita de alguna forma el comportamiento de los valores durante periodos de tiempo.

Así un momento dado se puede dar la posibilidad de generar una aplicación, un script o software de análisis con el cual poder sacar un mayor provecho a estos datos, en dado caso se puede llegar a trabajar este archivo con algún tipo de algoritmo de predicción o aprendizaje para lograr en determinado momento realizar una predicción en la dosis de los compuestos químicos necesarios en el proceso de potabilización del agua.

Un diagrama de bloques generalizado de nuestro sistema se muestra a continuación:

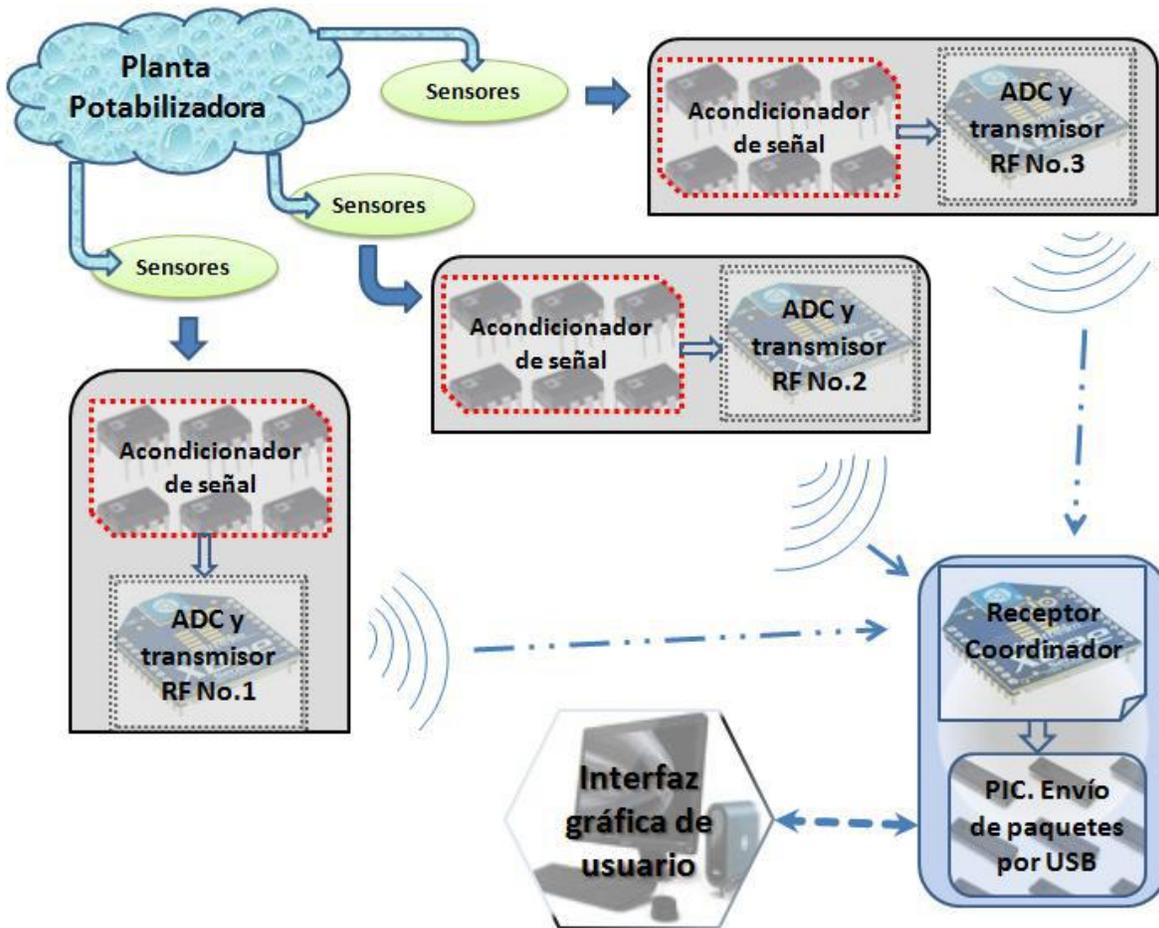


Fig24. Diagrama a bloques del proyecto.

Se puede observar en el diagrama que el hecho de que sea un sistema inalámbrico tiene gran ventaja respecto a uno que su transmisión se lleve a cabo por cables.

Bueno ahora una pregunta importante: ¿Cómo o de qué forma nuestro sistema obtendrá la alimentación, principalmente en los módulos remotos? La respuesta a esta pregunta es muy simple y se detalla a continuación.

Para el sistema que proporcionará la fuente de alimentación de los módulos remotos se tienen varias alternativas muy buenas como pueden ser, alimentación por celdas solares, baterías, etc., en este caso se tomó el uso de baterías recargables de 12v con una capacidad de corriente de 4Ah.

En la siguiente imagen se puede observar una imagen de la batería que se menciona. Sus características son: batería recargable sellada, de ácido-plomo, de 12 Vcc, 4 Amperes/hora y hasta 1000 ciclos de carga/descarga.



Diseño y desarrollo de la tarjeta principal con conexión USB a la PC. (Receptor).

En el siguiente apartado se desarrollo el módulo inalámbrico receptor, que consta principalmente de:

- Un Módulo inalámbrico Xbee PRO.
- nUn Microcontrolador PIC18F4550.
- Un conector USB.
- Un led indicador.

Este módulo se conoce también como coordinador, ya que aparte de ser el receptor de la información de los módulos remotos, éste también coordina o administra como ya se había mencionado el tráfico de datos de cada uno de los módulos asociados a él. Básicamente les asigna un tiempo de acceso en el cual pueden recibir o transmitir datos.

Además de implementar una confirmación de recepción conocida como “mensaje de acknowledge” en el cual un módulo que envía un paquete de datos debe recibir un pulso el cual significa una confirmación de que el dato que se envió fue recibido por el destinatario correctamente, en el caso de que no se reciba un mensaje de acknowledge se interpreta de que el paquete de datos enviado se perdió y no fue recibido por el destinatario, en este caso se hace reintentos de envío hasta 3 veces y en todo caso se maneja un mensaje de ACK failure que es guardado en un registro de contador del módulo Xbee transmisor.

Pero lo mencionado anteriormente no asegura siempre un dato 100% confiable debido a que como se manejan frames de datos, lo anterior solo nos sirve para indicar si el frame llego a su destinatario o no, más sin embargo, no podemos descartar la posibilidad de que algún bit del frame de datos enviado no se haya alterado, dado que si sucede esto en el momento de interpretar la información, los datos obtenidos estarán corruptos.

En este caso se hace uso de un algoritmo de detección de errores o checksum que nos permite conocer si algún bit de una serie de bytes sufrió una modificación, una transición de estado, y con esto conocer si un frame de datos que ha entrado en el buffer de recepción es confiable o no.

El algoritmo de checksum se implementa en el microcontrolador, así como también se implementa la conexión por el puerto USB hacia el ordenador.

El microcontrolador fue programado utilizando el compilador MikroC de Mikroelectrónica, se utiliza principalmente la librería HID (Human Interfaz Device) incluida en el compilador la cual nos permitió lograr realizar la conexión con el software desarrollado en Visual Basic 6.0.

Principalmente lo que se realizó en esta parte del desarrollo del proyecto es tener una tarjeta la cual contenga, un módulo inalámbrico Xbee PRO configurado como coordinador de la red, un microcontrolador en este caso el PIC 18F4550, el cual servirá de medió para la interacción del módulo coordinador y el ordenador.

Para la comunicación entre el microcontrolador y el módulo inalámbrico se utilizó el protocolo de comunicación USART asíncrono a una velocidad de 19200 bps. Se remarca que se utilizó para la alimentación de este módulo coordinador, la alimentación que proporciona el puerto USB, además de un regulador de voltaje de 3.3 volts el cual nos permite la alimentación para el módulo Xbee.

El microcontrolador recibe en su pin de Rx paquetes de datos provenientes de cada uno de los módulos remotos, cada uno de estos paquetes contiene información que es útil para identificar de donde proviene el paquete, que tipo de sensor corresponde y el valor del dato entregado por el sensor.

Primeramente se programan los registros del módulo coordinador con los siguientes parámetros:

Registro	Valor
ID	3456
MY	1234
DL	0
IU	1
AP	1
BD	6

Estas configuraciones pueden ser programadas directamente con el programa X-CTU de MaxStream o podemos también cargarlos con la ayuda de un microcontrolador, en este caso programamos unas pequeñas rutinas las cuales

cargan a los módulos los valores correspondientes en los registros de tal manera que funcionen y se adapten a nuestras necesidades.

El paquete recibido por el microcontrolador desde el módulo Xbee coordinador es un paquete API se que se muestra en la figura siguiente y se compone de:

- 7E Start delimiter.
- 00 0A Length bytes.
- 83 API identifier value byte.
- 00 01 Source address bytes.
- 20 RSSI value byte.
- 00 Option byte.
- 01 Sample quantity byte.
- 02 00 Channel indicator.
- 02 A2 Sample data ADC0, ADC1 ...
- B4 Check sum.

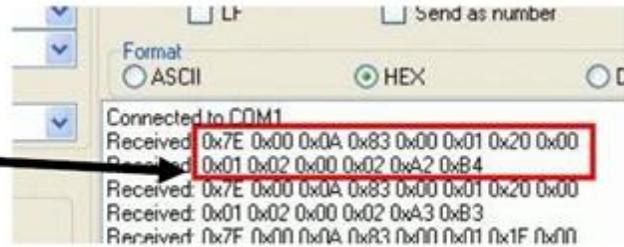


Fig 25. Datos recibidos de los módulos.

A continuación se muestra el diagrama esquemático de la tarjeta receptora:

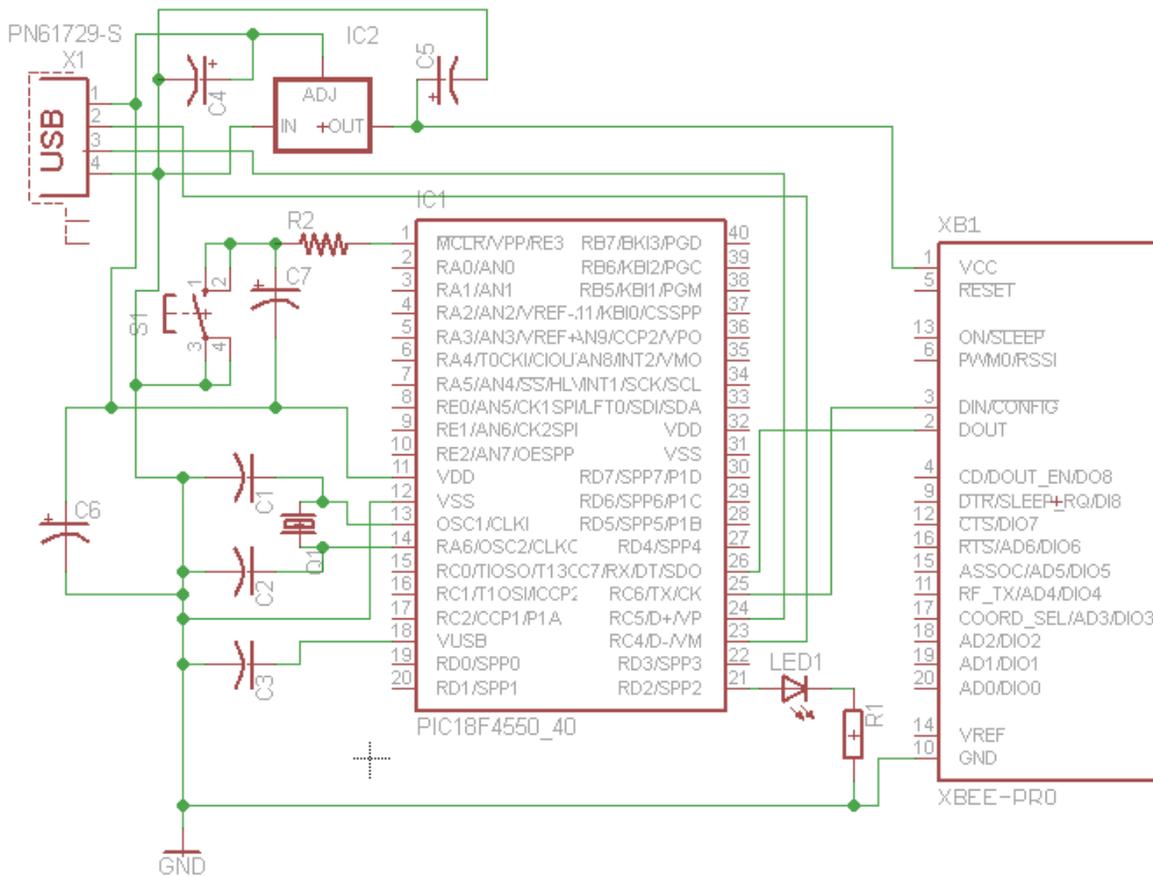


Fig 26. Diagrama de la tarjeta receptora.

Y a continuación en la siguiente imagen se muestra el PCB de la tarjeta que se elaboro.

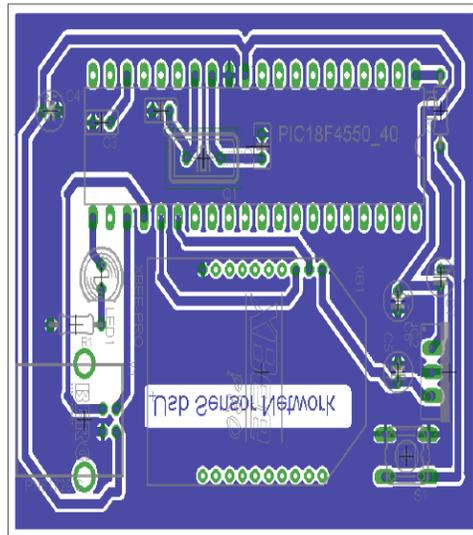


Fig 27. PCB de la tarjeta Receptora.

Diseño y desarrollo de la tarjeta remota de adquisición de datos. (Transmisor).

Una vez terminado el desarrollo del módulo receptor, nos enfocamos ahora al desarrollo del módulo transmisor, en general su trabajo constara de adquirir la señal proveniente de cada uno de los sensores, acondicionar cada una de las respectivas señales y enviar cada una a su respectivo conversor analógico-digital ubicado en el módulo Xbee transmisor. Se utilizarán los conversores ADC0, ADC1, ADC2 respectivamente.

El módulo transmisor constará de las siguientes partes:

- Un módulo inalámbrico Xbee
- Un puente de w para el pt100
- Un acondicionador de señal para el PT100
- Un conversor de I/V para el sensor pH
- Un conversor de I/V para el sensor de Turbidez

Este módulo se le conoce también como End Device, porque es el dispositivo que se asocia a un coordinador en la red, en este caso cada uno de los módulos End Device que formen parte de la red, podrán interactuar con el coordinador, enviar-recibir información.

De esta forma el End Device donde tenemos nuestros sensores será el que por medio de sus entradas analógicas transmitirá la información obtenida hacia el coordinador, el envío de los datos se lleva a cabo por medio de paquetes o frames de datos, los cuales son recibidos de la misma forma por el módulo coordinador y estos a la vez enviados a través del puerto serial al microcontrolador y este último al PC.

Ahora continuamos con la programación de los registros del módulo Xbee, para que este trabaje en modo de End Device, para esto se muestra la tabla siguiente:

Registro	Valor
ID	3456
MY	1
DL	1234
D0	2
D1	2
D2	2
IR	1
IT	1
AP	1
BD	6

Fig. 28

Cabe señalar que los sensores de pH y turbidez entregan en su salida una señal analógica de corriente, por lo tanto, utilizamos un convertidor de corriente a voltaje para poder interpretar el valor correspondiente al valor de la variable medida por el sensor.

Como aún no tenemos los sensores físicamente pero si sabemos cuáles son los que se compraran pues obtenemos de estos su datasheet y obtuvimos los datos importantes para poder hacer el acondicionamiento adecuado, además de que una vez armado se sometió a pruebas de manera tal que un fuente de corriente simulara la corriente entregada por los sensores en el rango de 4 - 20mA, obteniendo resultados satisfactorios.

El módulo transmite un frame que es idéntico al ya descrito anteriormente ya que es el que recibe el módulo coordinador.

A continuación se muestra el diagrama esquemático de la tarjeta transmisora.

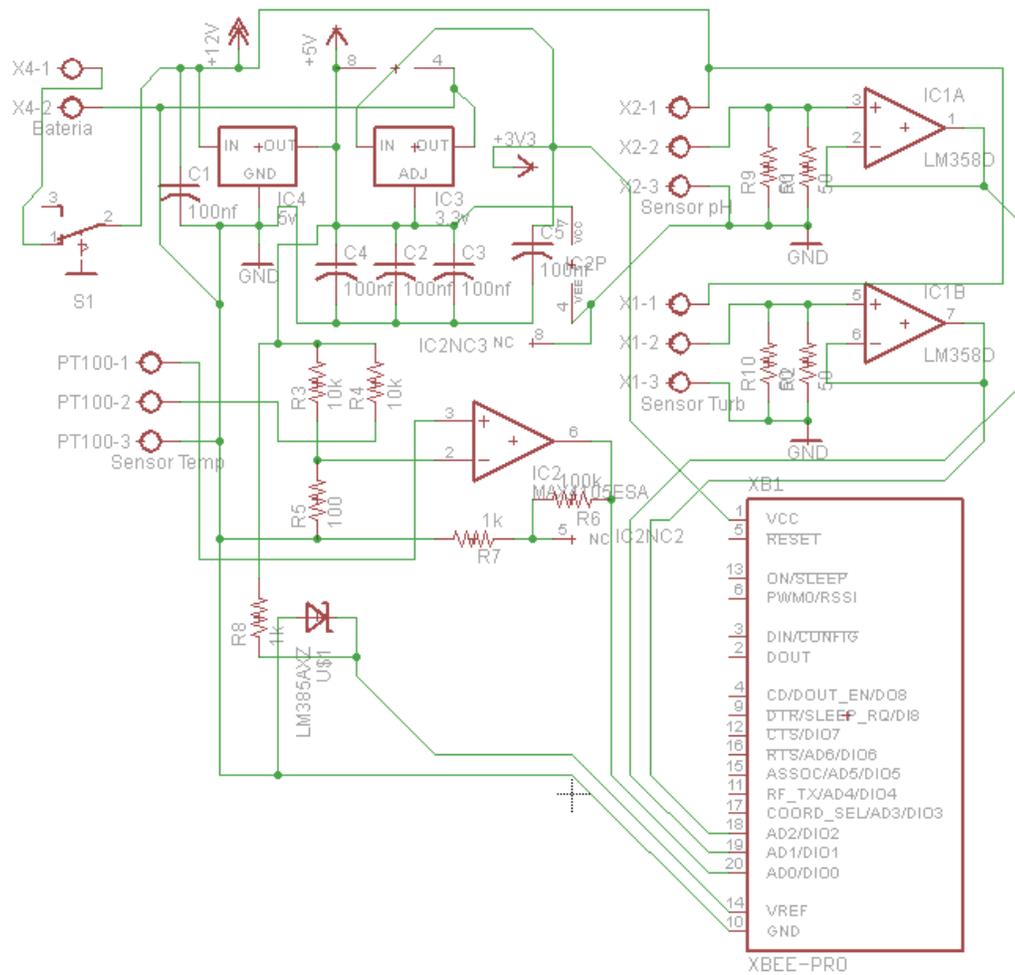


Fig. 29. Diagrama de la tarjeta Transmisora.

Y a continuación en las siguientes imágenes se muestra el PCB de las tarjetas que se elaboraron.

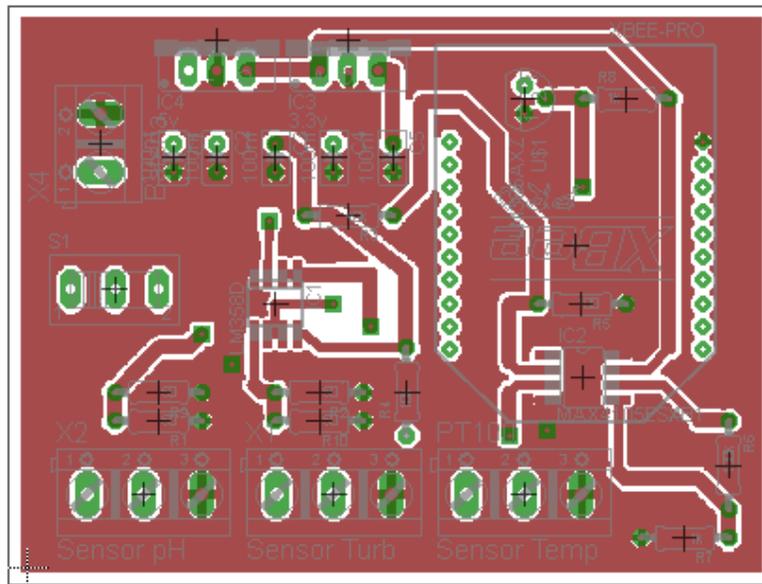


Fig. 30. PCB Top Layer

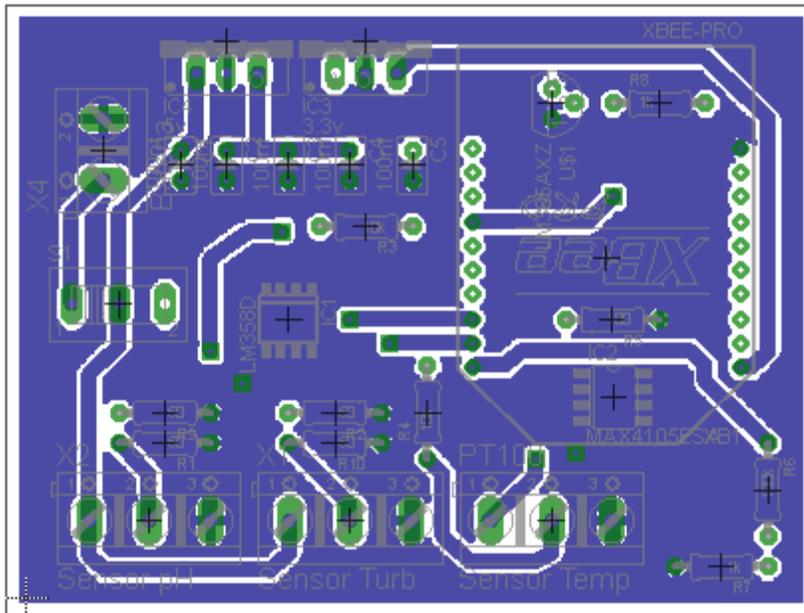


Fig. 31. PCB Bottom Layer

Diseño y programación de la interfaz de usuario en VB 6.0

Para la programación de la interfaz se utilizó el entorno de desarrollo de Visual Studio 6.0 y el lenguaje de programación Visual Basic 6.0. La elección del mismo surgió debido a que es un lenguaje sencillo, con una gran variedad de soporte de desarrollo, documentación, etc. Un lenguaje no tan potente como C++ o C#, pero suficiente para nuestra aplicación, sin embargo, se podría migrar a cualquiera de estos lenguajes sin ningún problema.

Para el sistema ya ampliamente descrito se diseñó un interfaz de usuario, se buscó que la interfaz fuera intuitiva, amigable, clara y capaz de ir almacenando estos datos en un archivo para su posterior aplicación.

Ahora se dará una descripción muy general de las diversas partes de la interfaz y del código relacionada a esta, una descripción más detallada de esta y sobre su uso se encontrará en la sección denominada Manual de Software.

La interfaz consta básicamente de 4 partes principales a las cuales son:

- Una barra de menú.
- Una barra de intensidad de señal.
- Un botón para play-pause
- Una serie de 3 pestañas de visualización.

La barra de menú se muestra a continuación junto con el código correspondiente a cada una de las opciones disponibles en el menú.

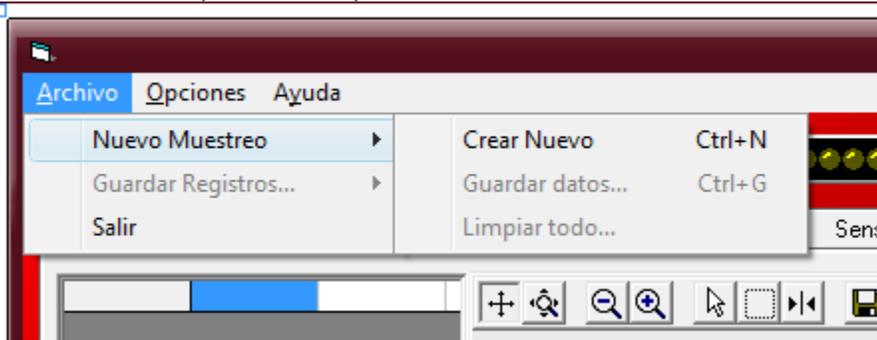


Fig. 32. Menu del Software.

La barra de intensidad de señal, muestra la calidad de la señal entre los dispositivos, esta representa la intensidad de la señal de cada dispositivo dependiendo de la pestaña que se tenga seleccionada, puede ser 1, 2, 3.



Fig. 33. Nivel de señal inalámbrica.

Este botón básicamente es para iniciar o pausar un muestreo de los datos.



Fig. 34

La parte principal las tres pestañas donde se visualizan los datos obtenidos de los módulos remotos.

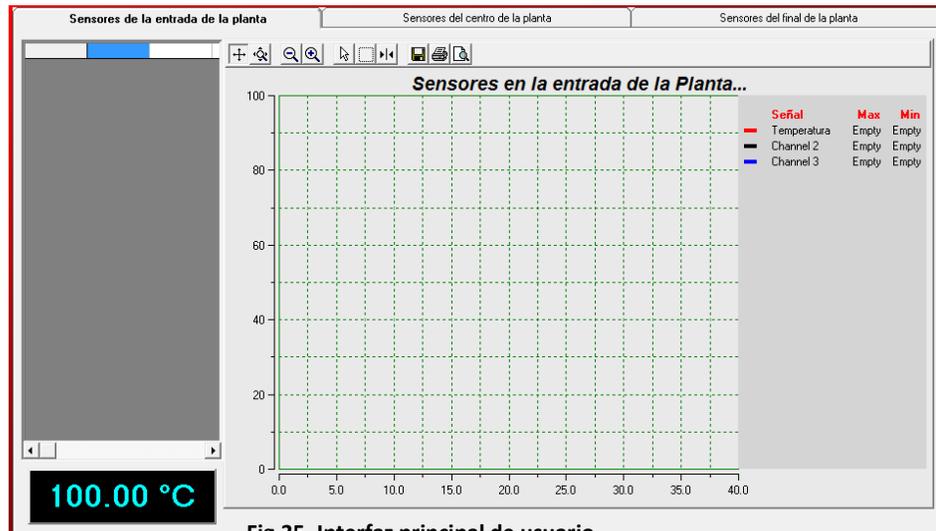


Fig.35. Interfaz principal de usuario.

Código del programa:

Programa Principal

```
Private Const VendorID = 4660
Private Const ProductID = 1
Private Const BufferInSize = 10
Private Const BufferOutSize = 10
Dim BufferIn(0 To BufferInSize) As Byte
Dim BufferOut(0 To BufferOutSize) As Byte
Dim i As Double
Dim i2(0 To 2) As Byte
Dim Indice As Byte
Dim XData As Double
Dim YData As Double
Dim NoDevice As Double Dim Fila As Integer
Private Sub Form_Load()
    About.Visible = False
    For Indice = 0 To 2 Step 1
        For i = 0 To 2 Step 1
            iXYPlotX1(Indice).Channel(i).TraceVisible = False
            iXYPlotX1(Indice).Channel(i).MarkersVisible = True
        Next
    Next
    For Indice = 0 To 2 Step 1
        For i = 0 To 3 Step 1
            If (i = 0) Then
                MSFlexGrid1(Indice).ColWidth(i) = 450
            Else
                MSFlexGrid1(Indice).ColWidth(i) = 700
            End If
        Next
    Next
    WriteSomeData
    i = 0
    Indice = 0
End Sub
Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
    DisconnectFromHID
End Sub
Public Sub OnPlugged(ByVal pHandle As Long)
    If hidGetVendorID(pHandle) = VendorID And hidGetProductID(pHandle) = ProductID Then
        MainForm.Caption = "USB Sensor Network Conectado y Listo!..."
    End If
End Sub
Public Sub OnUnplugged(ByVal pHandle As Long)
```

```

If hidGetVendorID(pHandle) = VendorID And hidGetProductID(pHandle) = ProductID Then
MainForm.Caption = "USB Sensor Network Esta desconectado..."
End If
End Sub
Public Sub OnChanged()
Dim DeviceHandle As Long
' get the handle of the device we are interested in, then set
' its read notify flag to true - this ensures you get a read
' notification message when there is some data to read...
DeviceHandle = hidGetHandle(VendorID, ProductID)
hidSetReadNotify DeviceHandle, True
End Sub
Public Sub OnRead(ByVal pHandle As Long)
If hidRead(pHandle, BufferIn(0)) Then
NoDevice = (BufferIn(1) * 256) Or (BufferIn(2))
If (NoDevice = (SSTab1.Tab + 1)) Then
iLedBarX1.Position = 95 - BufferIn(3)
End If
If (NoDevice = 1) Then
i = i2(0)
End If
If (NoDevice = 2) Then
i = i2(1)
End If
If (NoDevice = 3) Then
i = i2(2)
End If
XData = i
Fila = i
YData = ((BufferIn(4) * 256) Or (BufferIn(5)))
iXYPlotX1(NoDevice - 1).Channel(0).AddXY XData, ((YData * 1240) / 1023) / 19.19
iXYPlotX1(NoDevice - 1).Channel(1).AddXY XData, ((YData * 1240) / 1023) / 19.19
iXYPlotX1(NoDevice - 1).Channel(2).AddXY XData, ((YData * 1240) / 1023) / 19.19
MSFlexGrid1(0).AddItem (CStr(i + 1) & Chr(9) & CStr(Round(((YData * 1240) / 1023) / 19.19, 2))) &
Chr(9) & CStr(Round(YData, 2)) & Chr(9) & CStr(Round(YData, 2))
iAnalogDisplayX1(NoDevice - 1).Value = ((YData * 1240) / 1023) / 19.19
If (SSMauto.Checked = True) Then
YData = Round(YData * 1#, 2)
Print #1, CStr(XData) + vbTab + CStr(YData)
End If

If (NoDevice = 1) Then
i2(0) = i2(0) + 1
End If
If (NoDevice = 2) Then
i2(1) = i2(1) + 1
End If

```

```

If (NoDevice = 3) Then
If (NoDevice = 3) Then i2(2) = i2(2) + 1
End If
End If
End Sub
Public Sub WriteSomeData()
'BufferOut(0) = 0
'BufferOut(1) = 10
'hidWriteEx VendorID, ProductID, BufferOut(0)
MSFlexGrid1(0).TextMatrix(0, 1) = "Temp"
MSFlexGrid1(0).TextMatrix(0, 2) = "pH"
MSFlexGrid1(0).TextMatrix(0, 3) = "ppM"
End Sub
Private Sub iSwitchRockerX1_OnChangeUser()
If (iSwitchRockerX1.Active) Then
ConnectToHID (Me.hwnd)
MainForm.Caption = "USB Sensor Network Conectado y Listo!..."
SSMsavdat.Enabled = False
SSMlimpiar.Enabled = False
Else
DisconnectFromHID
MainForm.Caption = "USB Sensor Network Esta desconectado..."
SSMsavdat.Enabled = True
SSMlimpiar.Enabled = True
End If
End Sub
Private Sub SMabout_Click()
About.Visible = True
SetFormOnTop About
End Sub

Private Sub SMSalir_Click()
answer = MsgBox("¿Estas seguro que quieres salir?", vbExclamation + vbYesNo, "Confirmar
Acción...")
If answer = vbYes Then
Unload Me
End
Else
MsgBox "Acción cancelada...", vbInformation, "Cuadro de confirmación"
End If
End Sub
Private Sub SSAjus_Click()
options.Visible = True
SetFormOnTop options
End Sub

```

```
Private Sub SSMauto_Click()  
    SSMauto.Checked = True  
    SSMmanual.Checked = False  
    SSMsavreg.Enabled = False  
    SSMcrearnuevo.Enabled = True  
End Sub
```

```
Private Sub SSMcrearnuevo_Click()  
    Dialog1.InitDir = App.Path  
    Dialog1.ShowSave  
    Open Dialog1.FileName For Output As #1  
    SSMlimpiar.Enabled = True  
    SSMsavdat.Enabled = False  
    iSwitchRockerX1.Enabled = True  
    SSMcrearnuevo.Enabled = False  
    SSMlimpiar.Enabled = False  
    If (SSMauto.Checked = True) Then  
        MSFlexGrid1(0).Clear  
        iXYPlotX1(0).ClearAllData  
        i = 0  
        i2(0) = 0: i2(1) = 0: i2(2) = 0  
        XData = 0: YData = 0  
    End If
```

```
WriteSomeData  
End Sub
```

```
Private Sub SSMdatosen_Click()  
    Dim ret As Boolean  
  
    ret = Exportar_FlexGrid_txt(MSFlexGrid1(0), "C:\entrada.dat", vbTab)  
  
    If ret Then  
        MsgBox "Flexgrid exportado a entrada.dat ", vbInformation  
    End If  
End Sub
```

```
Private Sub SSMdatosfi_Click()  
    Dim ret As Boolean  
  
    ret = Exportar_FlexGrid_txt(MSFlexGrid1(2), "C:\final.dat", vbTab)  
    If ret Then  
        MsgBox "Flexgrid exportado a final.dat ", vbInformation  
    End If  
End Sub
```

```

Private Sub SSMdatosme_Click()
Dim ret As Boolean

ret = Exportar_FlexGrid_txt(MSFlexGrid1(1), "C:\medio.dat", vbTab)
If ret Then
MsgBox "Flexgrid exportado a medio.dat ", vbInformation
End If
End Sub

Private Sub SSMlimpiar_Click()
If (SSMauto.Checked = True) Then
iSwitchRockerX1.Enabled = True
SSMsavdat.Enabled = False
SSMcrearnuevo.Enabled = False
SSMlimpiar.Enabled = False
'MSFlexGrid1(0).Clear
iXYPlotX1(0).ClearAllData
For f = 1 To i2(0) Step 1
MSFlexGrid1(0).RemoveItem 1
Next
i = 0
i2(0) = 0: i2(1) = 0: i2(2) = 0
XData = 0: YData = 0
Close
Open Dialog1.FileName For Output As #1
End If
WriteSomeData
End Sub

Private Sub SSMmanual_Click()

SSMauto.Checked = False
SSMcrearnuevo.Enabled = False
SSMmanual.Checked = True
SMSavreg.Enabled = True
iSwitchRockerX1.Enabled = True

End Sub

Private Sub SSMsavdat_Click()
'Cerramos el archivo actual de datos
Close
For f = 1 To i2(0) Step 1

MSFlexGrid1(0).RemoveItem 1
Next
iXYPlotX1(0).ClearAllData
iSwitchRockerX1.Enabled = False

```

```

SSMcrearnuevo.Enabled = True
SSMsavdat.Enabled = False
SSMlimpiar.Enabled = False
End Sub

Public Function Exportar_FlexGrid_txt(FlexGrid As Object, _
    Path_Txt As String, _
    Delimitador As Variant) As Boolean

On Error GoTo Err_Funcion
Dim Fila As Integer
Dim Columna As Integer
Dim Free_File As Integer

' Número de archivo libre para crear el archivo de texto
Free_File = FreeFile
' Abre y crea el archive
Open Path_Txt For Output As #Free_File

' Recorre las filas del Flexgrid
For Fila = 0 To _
FlexGrid.Rows - 1
FlexGrid.Row = Fila

' Recorre las columnas
For Columna = 0 To _
FlexGrid.Cols - 1
FlexGrid.Col = Columna
' escribe el Delimitador
If Columna > 0 Then
Print #Free_File, Delimitador;
End If
' Escribe el dato
Print #Free_File, vbNullString & FlexGrid.Text & vbNullString;
'Print #Free_File, FlexGrid.Text
Next

Print #Free_File, ""
Next
Close
Exportar_FlexGrid_txt = True

' Fin
Exit Function
' error
Err_Funcion:

```

```
Close #Free_File
MsgBox Err.Description, vbCritical
End Function
```

HID Interface

Option Explicit

' HID interface API declarations...

```
Declare Function hidConnect Lib "mchID.dll" Alias "Connect" (ByVal pHostWin As Long) As Boolean
Declare Function hidDisconnect Lib "mchID.dll" Alias "Disconnect" () As Boolean
Declare Function hidGetItem Lib "mchID.dll" Alias "GetItem" (ByVal pIndex As Long) As Long
Declare Function hidGetItemCount Lib "mchID.dll" Alias "GetItemCount" () As Long
Declare Function hidRead Lib "mchID.dll" Alias "Read" (ByVal pHandle As Long, ByVal pData As Byte) As Boolean
Declare Function hidWrite Lib "mchID.dll" Alias "Write" (ByVal pHandle As Long, ByVal pData As Byte) As Boolean
Declare Function hidReadEx Lib "mchID.dll" Alias "ReadEx" (ByVal pVendorID As Long, ByVal pProductID As Long, ByVal pData As Byte) As Boolean
Declare Function hidWriteEx Lib "mchID.dll" Alias "WriteEx" (ByVal pVendorID As Long, ByVal pProductID As Long, ByVal pData As Byte) As Boolean
Declare Function hidGetHandle Lib "mchID.dll" Alias "GetHandle" (ByVal pVendorID As Long, ByVal pProductID As Long) As Long

Declare Function hidGetVendorID Lib "mchID.dll" Alias "GetVendorID" (ByVal pHandle As Long) As Long
Declare Function hidGetProductID Lib "mchID.dll" Alias "GetProductID" (ByVal pHandle As Long) As Long
Declare Function hidGetVersion Lib "mchID.dll" Alias "GetVersion" (ByVal pHandle As Long) As Long
Declare Function hidGetVendorName Lib "mchID.dll" Alias "GetVendorName" (ByVal pHandle As Long, ByVal pText As String, ByVal pLen As Long) As Long
Declare Function hidGetProductName Lib "mchID.dll" Alias "GetProductName" (ByVal pHandle As Long, ByVal pText As String, ByVal pLen As Long) As Long
Declare Function hidGetSerialNumber Lib "mchID.dll" Alias "GetSerialNumber" (ByVal pHandle As Long, ByVal pText As String, ByVal pLen As Long) As Long
Declare Function hidGetInputReportLength Lib "mchID.dll" Alias "GetInputReportLength" (ByVal pHandle As Long) As Long
Declare Function hidGetOutputReportLength Lib "mchID.dll" Alias "GetOutputReportLength" (ByVal pHandle As Long) As Long
Declare Sub hidSetReadNotify Lib "mchID.dll" Alias "SetReadNotify" (ByVal pHandle As Long, ByVal pValue As Boolean)
Declare Function hidIsReadNotifyEnabled Lib "mchID.dll" Alias "IsReadNotifyEnabled" (ByVal pHandle As Long) As Boolean
```

```
Declare Function hidIsAvailable Lib "mcHID.dll" Alias "IsAvailable" (ByVal pVendorID As Long,
ByVal pProductID As Long) As Boolean
```

```
Private Declare Function CallWindowProc Lib "user32" Alias "CallWindowProcA"
(ByVal lpPrevWndFunc As Long, ByVal hwnd As Long, ByVal Msg As Long, ByVal
wParam As Long, ByVal lParam As Long) As Long
Private Declare Function SetWindowLong Lib "user32" Alias "SetWindowLongA"
(ByVal hwnd As Long, ByVal nIndex As Long, ByVal dwNewLong As Long) As Long
```

```
Private Const WM_APP = 32768
Private Const GWL_WNDPROC = -4
```

```
Private Const WM_HID_EVENT = WM_APP + 200
Private Const NOTIFY_PLUGGED = 1
Private Const NOTIFY_UNPLUGGED = 2
Private Const NOTIFY_CHANGED = 3
Private Const NOTIFY_READ = 4
```

```
Private FPrevWinProc As Long ' Handle to previous window procedure
Private FWinHandle As Long ' Handle to message window
```

```
Public Function ConnectToHID(ByVal pHostWin As Long) As Boolean
FWinHandle = pHostWin
ConnectToHID = hidConnect(FWinHandle)
FPrevWinProc = SetWindowLong(FWinHandle, GWL_WNDPROC, AddressOf WinProc)
End Function
Public Function DisconnectFromHID() As Boolean
SetWindowLong FWinHandle, GWL_WNDPROC, FPrevWinProc End Function
```

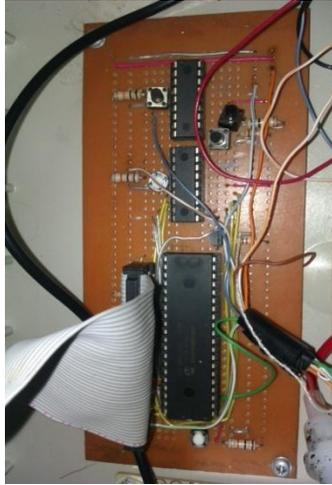
```
Private Function WinProc(ByVal pHwnd As Long, ByVal pMsg As Long, ByVal wParam
As Long, ByVal lParam As Long) As Long
If pMsg = WM_HID_EVENT Then
Select Case wParam
Case Is = NOTIFY_PLUGGED
MainForm.OnPlugged (lParam)
Case Is = NOTIFY_UNPLUGGED
MainForm.OnUnplugged (lParam)
Case Is = NOTIFY_CHANGED
MainForm.OnChanged
Case Is = NOTIFY_READ
MainForm.OnRead (lParam)
End Select
End If
```

```
WinProc = CallWindowProc(FPrevWinProc, pHwnd, pMsg, wParam, lParam)
End Function
```

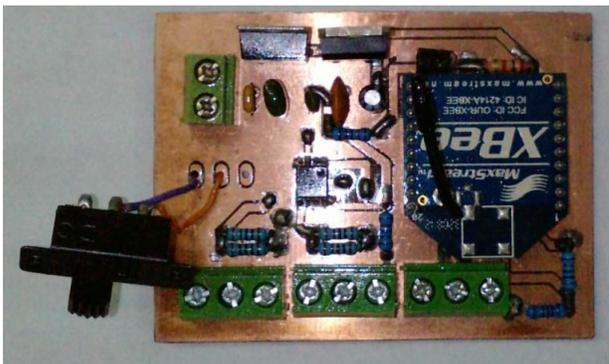
Capítulo IV

Resultados, prototipos

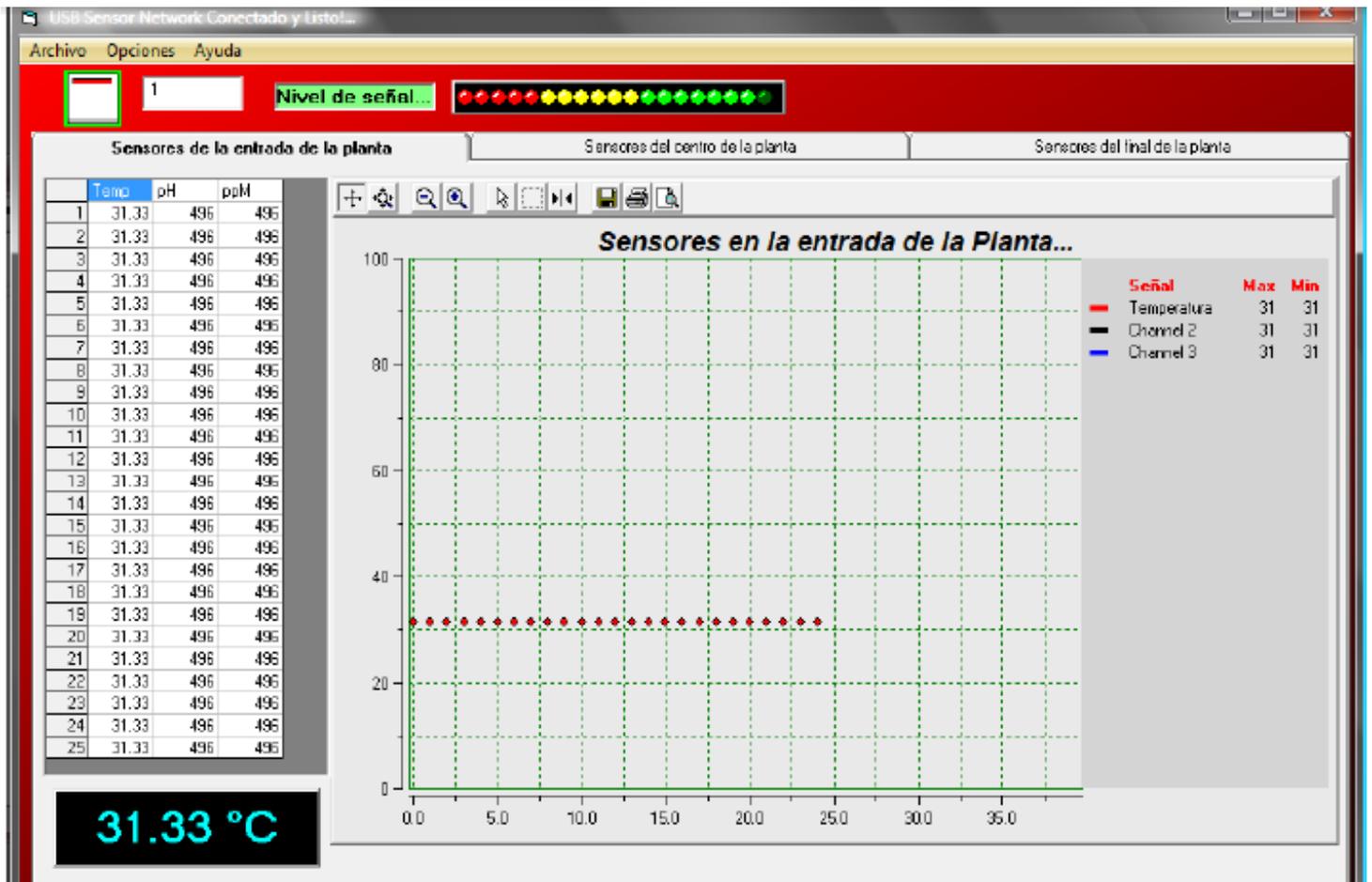
Módulo Coordinador (receptor) Finalizado.



Módulo End Device (transmisor) Finalizado.



Interfaz de Usuario en funcionamiento



Conclusiones

En el presente trabajo se mostró la manera en que fue desarrollado un sistema de monitoreo para crear una red inalámbrica de sensores bajo el protocolo IEEE 802.15.4. Después de haber terminado el trabajo, y tomando en cuenta todas las fases del desarrollo, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Las redes de sensores sin cable son redes de nano aparatos autónomos capaces de una comunicación sin cable. La diferencia entre la red de sensores que todos conocemos y la nueva generación de redes de sensores sin cable es que estos últimos son inteligentes (es decir, capaces de poner en marcha una acción según la información que vayan acumulando) y no son limitados por un cable fijo.
- Con este proyecto se pretende introducir esta nueva tecnología dentro de un sector tan importante para nuestra región como es la planta de tratamiento de agua potable. Una de las tareas claves de este proyecto es el desarrollo de un sistema de información que deberá proporcionar una herramienta de gran valor para la toma de decisiones por parte del usuario. Los objetivos finales del proyecto contemplan el desarrollo de un prototipo totalmente funcional que permita la captura y el análisis sencillo de los datos.
- Para cumplir con los objetivos planteados se desarrollaron dos sistemas denominados Coordinador y End Device. El primero permite que una PC se integre a una red ZigBee; el segundo es un módulo que funciona con pilas y que permite monitorear sensores. Ambos sistemas se dejaron a nivel de circuito impreso.
- Los sistemas fueron probados obteniendo los resultados esperados, por lo cual se considera haber cumplido completamente los objetivos del presente trabajo. Además, se documentó la forma en la que los módulos se deben configurar, de acuerdo a la función que va a realizar.
- El sistema Coordinador permitirá realizar aplicaciones de redes de sensores que se puedan comunicar con una PC de una manera rápida mediante el puerto USB.
- La capacidad de funcionar con pilas del sistema End Device hace a este sistema totalmente portátil. Además puede funcionar con una fuente de voltaje externa, cuando se dispone de una fuente de energía.
- El sistema End Device fue desarrollado para trabajar con módulos XBee de la serie 1, sin embargo, en la actualidad en el país se pueden adquirir módulos de la serie 2, que tiene una pequeña diferencia en sus terminales. Por tal motivo el sistema está limitado de alguna forma a utilizar los módulos únicamente de la serie 1.

Referencias bibliográficas

FAULKENBERRY, L.M. Introducción a los Amplificadores Operacionales con Aplicaciones a CI lineales. México, D.F., LIMUSA, 1996. 661p.

VALVERDE, Rebaza Jorge Carlos. El Estándar Inalámbrico ZigBee. Universidad Nacional de Trujillo. Perú, Trujillo. 2007

OJEDA, Luis Thayer. Guía del Usuario XBee Series 1., Chile, Providencia, Santiago. 2007

Datasheet MICROCHIP PIC18F4550. Data Sheet 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with 10-Bit A/D and nanoWatt Technology. 2007

*1+ Roger Smith, "RFID: A Brief Technology Analysis", CTOnet.org, 2004.

*2+ Módulos de RF ZigBee™/802.15.4 versión OEM fabricados por MaxStream, Inc., 2005.

*3+ Microsoft, "Notas técnicas de Microsoft Windows Server 2003".

*4+ M. López Villaseñor, M. A. Gutiérrez Galindo, R. Marcelín Jiménez, "De sensores inalámbricos, mitigación de riesgos y sistemas autoorganizados", Área de Redes y Comunicaciones, Depto. De Ing. Eléctrica, UAM–Iztapalapa, 2007.

[5] Honeywell, XYR500 WG510/WA510, Wireless Gauge and Absolute pressure transmitters, 12/2004, ISBN: 34-XY-01-01.

[6] David Geer, "Users make a beeline for ZigBee sensors technology", Published by the IEEE Computer Society, Diciembre 2005.

ARISTIDES, Álvarez. Tomar datos de Norma 4...20 mA. *En línea+. <http://webs.ono.com/lmoliver/tomar_datos.pdf>

Fuente de Corriente de 4 a 20mA [En línea]. <http://www.forosdeelectronica.com/attachment.php?attachmentid=6423&d=1204839042>

IEEE 802.15.4. [En línea]. <http://es.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4>

ANTÔNIO ROGÉRIO MESSIAS. Controle remoto e aquisição de dados via XBee/ZigBee (IEEE 802.15.4). [En línea]. <<http://www.rogercom.com/ZigBee/ZigBeePag02.htm>>

LAURO SOTO. Sensores Otras Variables Físicas. [En línea] <<http://www.mitecnologico.com/Main/SensoresOtrasVariablesFisicas>>

METTLER TOLEDO. Equipos & Soluciones: Analítica de Procesos: Turbidez [En línea].

http://mx.mt.com/mx/es/home/products/ProcessAnalytics/level_2_turbidity_family_MARCH03_NEW.Chemical_application_browse.a-1073754352.html?sem=12010318

ELECTRÓNICA GUERRA. Sensores Ambientales: Sensores Calidad del Agua [En línea]. <http://www.guemisa.com/ambien.htm>

MARIA ISABEL GIMENEZ DE GUZMAN. LABORATORIOS DE CIRCUITOS ELECTRONICOS GUIA TEORICA (2ª versión). Capitulo IX: Puente de Wheatstone [En línea]. http://www.labc.usb.ve/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap9.pdf

JULIO BRACHO CONSEJERO. Diseño de Redes de Sensores Inalámbricos con Inteligencia Artificial Distribuida. [En línea]. <http://fondosdigitales.us.es/tesis/tesis/645/disen-de-redes-de-sensores-inalambricos-con-inteligencia-artificial-distribuida/>

EUGENIO DUQUE PÉREZ. Redes De Sensores Inalámbricas. [En línea] http://microe.udea.edu.co/eventos/redes_sensores_inalambricas.pdf

FRANCISCO RAMOS PASCUAL. Redes De Sensores Inalámbricos. [En línea]. <http://www.radioptica.com/sensores/redes-sensores.pdf>

BR. M. CEBEY, BR. J. CURTO, Y BR. J. OREGGIONI. Biosensores para determinaciones analíticas: Electroodos para medir PH [En línea]. <http://www.scribd.com/doc/17615004/electrodo-de-pH>

Accesorios para instrumentos: Sensor de Turbidez. [En línea]. http://www.spargo.cl/sitio/upload/19/1147722162_sonda%20turbiedad%20espanol.pdf

Sensor Pt 100 (3 hilos) con transmisor de 4 a 20 mA para áreas peligrosas (Zona 1) [En línea]. http://www.tycothermal.com/assets/Europe/Spanish/Document/Datasheets/4764/DOC-485_R2_MONI-PT100-4_20MA.pdf

Sondas de temperatura TS325A [En línea]. <http://www.ifm-electronic.com/ifmes/web/dsfs!TS325A.html>

Anexos

Módulos Xbee.

XBee™/XBee-PRO OEM RF Modules – Product Manual v1.06 [2005.10.28]

1. XBee/XBee-PRO OEM RF Modules

XBee and XBee-PRO Modules were engineered to meet ZigBee/IEEE 802.15.4 standards and support the unique needs of low-cost, low-power wireless sensor networks. The modules require minimal power and provide reliable delivery of critical data between devices.

The modules operate within the ISM 2.4 GHz frequency band and are pin-for-pin compatible with each other.



1.1. Key Features

High Performance, Low Cost

XBee

- Indoor/Urban: up to 100' (30 m)
- Outdoor line-of-sight: up to 300' (100 m)
- Transmit Power: 1 mW (0 dBm)
- Receiver Sensitivity: -92 dBm

XBee-PRO

- Indoor/Urban: up to 300' (100 m)
- Outdoor line-of-sight: up to 1 mile (1500 m)
- Transmit Power: 100 mW (20 dBm) EIRP
- Receiver Sensitivity: -100 dBm

RF Data Rate: 250,000 bps

Advanced Networking & Security

Retries and Acknowledgements

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

Each direct sequence channels has over 65,000 unique network addresses available

Point-to-point, point-to-multipoint and peer-to-peer topologies supported

128-bit Encryption (downloadable firmware version coming soon)

Self-routing/Self-healing mesh networking (downloadable firmware version coming soon)

Low Power

XBee

- TX Current: 45 mA (@3.3 V)
- RX Current: 50 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10 μ A

XBee-PRO

- TX Current: 270 mA (@3.3 V)
- RX Current: 55 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10 μ A

Easy-to-Use

No configuration necessary for out-of box RF communications

Free X-CTU Software (Testing and configuration software)

AT Command Mode for simple configuration of module parameters

Small form factor

Network compatible with other ZigBee/802.15.4 devices

Free & Unlimited Technical Support

1.1.1. Worldwide Acceptance

FCC Approval (USA) Refer to Appendix A [p23] for FCC Requirements. Systems that include XBee/XBee-PRO Modules inherit MaxStream's Certifications.

ISM (Industrial, Scientific & Medical) 2.4 GHz frequency band

Manufactured under **ISO 9001:2000** registered standards

XBee/XBee-PRO RF Modules are optimized for use in **US, Canada, Australia, Israel and Europe** (contact MaxStream for complete list of approvals).



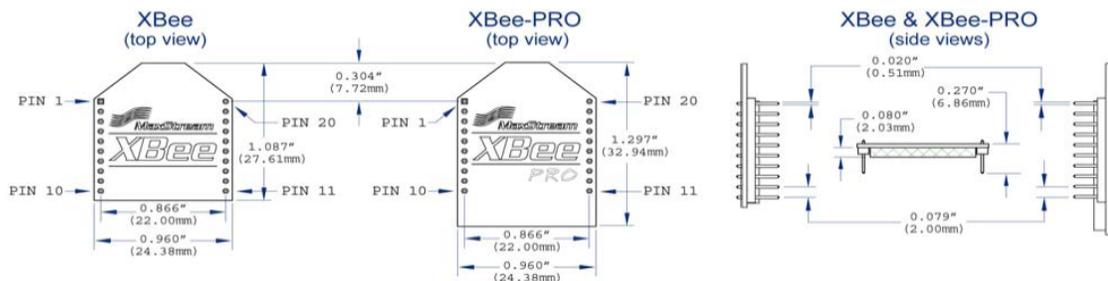
1.2. Specifications

Table 1-01. Specifications of the XBee/XBee-PRO OEM RF Modules

Specification	XBee	XBee-PRO
Performance		
Indoor/Urban Range	up to 100 ft. (30 m)	Up to 300' (100 m)
Outdoor RF line-of-sight Range	up to 300 ft. (100 m)	Up to 1 mile (1500 m)
Transmit Power Output	1mW (0 dBm)	60 mW (18 dBm) conducted, 100 mW (20 dBm) EIRP
RF Data Rate	250,000 bps	250,000 bps
Interface Data Rate (software selectable)	1200 - 115200 bps (non-standard baud rates also supported)	1200 - 115200 bps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-92 dBm (1% packet error rate)	-100 dBm (1% packet error rate)
Power Requirements		
Supply Voltage	2.8 – 3.4 V	2.8 – 3.4 V
Transmit Current (typical)	45 mA (@ 3.3 V)	270 mA (@ 3.3 V)
Receive Current (typical)	50 mA (@ 3.3 V)	55 mA (@ 3.3 V)
Power-down Current	< 10 µA	< 10 µA
General		
Operating Frequency	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)	0.960" x 1.297" (2.438cm x 3.294cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)
Antenna Options	U.FL Connector, Chip Antenna or Whip Antenna	U.FL Connector, Chip Antenna or Whip Antenna
Networking & Security		
Supported Network Topologies	Point-to-Point, Point-to-Multipoint, Peer-to-Peer and Mesh (coming soon)	Point-to-Point, Point-to-Multipoint, Peer-to-Peer and Mesh (coming soon)
Number of Channels (software selectable)	16 Direct Sequence Channels	13 Direct Sequence Channels
Filtration Options	PAN ID, Channel and Source/Destination Addresses	PAN ID, Channel and Source/Destination Addresses
Agency Approvals		
FCC Part 15.247	OUR-XBEE	pending
Industry Canada (IC)	pending	pending
Europe	pending	pending

1.3. Mechanical Drawings

Figure 1-01. Mechanical drawings of the XBee/XBee-PRO OEM RF Modules (antenna options not shown)
 XBee and XBee-PRO RF Modules are pin-for-pin compatible.



Pin Signals

Figure 1-03. XBee®/XBee-PRO® RF Module Pin Numbers

(top sides shown - shields on bottom)

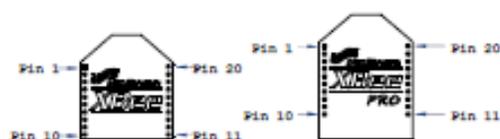


Table 1-02. Pin Assignments for the XBee and XBee-PRO Modules

(Low-asserted signals are distinguished with a horizontal line above signal name.)

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DO8*	Output	Digital Output 8
5	<u>RESET</u>	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI	Output	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator
7	PWM1	Output	PWM Output 1
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ / DI8	Input	Pin Sleep Control Line or Digital Input 8
10	GND	-	Ground
11	AD4 / DIO4	Either	Analog Input 4 or Digital I/O 4
12	CTS / <u>DIO7</u>	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP	Output	Module Status Indicator
14	VREF	Input	Voltage Reference for A/D Inputs
15	Associate / AD5 / DIO5	Either	Associated Indicator, Analog Input 5 or Digital I/O 5
16	<u>RTS</u> / AD6 / DIO6	Either	Request-to-Send Flow Control, Analog Input 6 or Digital I/O 6
17	AD3 / DIO3	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0	Either	Analog Input 0 or Digital I/O 0

* Function is not supported at the time of this release

Design Notes:

- Minimum connections: VCC, GND, DOUT & DIN
- Minimum connections for updating firmware: VCC, GND, DIN, DOUT, RTS & DTR
- Signal Direction is specified with respect to the module
- Module includes a 50k Ω pull-up resistor attached to RESET
- Several of the input pull-ups can be configured using the PR command
- Unused pins should be left disconnected

Electrical Characteristics

Table 1-03. DC Characteristics (VCC = 2.8 - 3.4 VDC)

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
V _{IL}	Input Low Voltage	All Digital Inputs	-	-	0.35 * VCC	V
V _{IH}	Input High Voltage	All Digital Inputs	0.7 * VCC	-	-	V
V _{OL}	Output Low Voltage	I _{OL} = 2 mA, VCC ≥ 2.7 V	-	-	0.5	V
V _{OH}	Output High Voltage	I _{OH} = -2 mA, VCC ≥ 2.7 V	VCC - 0.5	-	-	V
I _{IN}	Input Leakage Current	V _{IN} = VCC or GND, all inputs, per pin	-	0.025	1	μA
I _{OZ}	High Impedance Leakage Current	V _{IN} = VCC or GND, all I/O High-Z, per pin	-	0.025	1	μA
TX	Transmit Current	VCC = 3.3 V	-	45 (XBee) 215, 140 (PRO, Int)	-	mA
RX	Receive Current	VCC = 3.3 V	-	50 (XBee) 55 (PRO)	-	mA
PWR-DWN	Power-down Current	SM parameter = 1	-	< 10	-	μA

Table 1-04. ADC Characteristics (Operating)

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
V _{REFH}	VREF - Analog-to-Digital converter reference range		2.08	-	V _{DDAD} *	V
I _{REF}	VREF - Reference Supply Current	Enabled	-	200	-	μA
		Disabled or Sleep Mode	-	< 0.01	0.02	μA
V _{INDC}	Analog Input Voltage ¹		V _{SSAD} - 0.3	-	V _{DDAD} + 0.3	V

1. Maximum electrical operating range, not valid conversion range.

* V_{DDAD} is connected to VCC.

Table 1-05. ADC Timing/Performance Characteristics¹

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
R _{AS}	Source Impedance at Input ²		-	-	10	kΩ
V _{AIN}	Analog Input Voltage ³		V _{REFL}		V _{REFH}	V
RES	Ideal Resolution (1 LSB) ⁴	2.08V ≤ V _{DDAD} ≤ 3.6V	2.031	-	3.516	mV
DNL	Differential Non-linearity ⁵		-	±0.5	±1.0	LSB
INL	Integral Non-linearity ⁶		-	±0.5	±1.0	LSB
E _{ZS}	Zero-scale Error ⁷		-	±0.4	±1.0	LSB
F _{FS}	Full-scale Error ⁸		-	±0.4	±1.0	LSB
E _{IL}	Input Leakage Error ⁹		-	±0.05	±5.0	LSB
E _{TU}	Total Unadjusted Error ¹⁰		-	±1.1	±2.5	LSB

1. All ACCURACY numbers are based on processor and system being in WAIT state (very little activity and no IO switching) and that adequate low-pass filtering is present on analog input pins (filter with 0.01 μF to 0.1 μF capacitor between analog input and VREFL). Failure to observe these guidelines may result in system or microcontroller noise causing accuracy errors which will vary based on board layout and the type and magnitude of the activity.

Data transmission and reception during data conversion may cause some degradation of these specifications, depending on the number and timing of packets. It is advisable to test the ADCs in your installation if best accuracy is required.

2. R_{AS} is the real portion of the impedance of the network driving the analog input pin. Values greater than this amount may not fully charge the input circuitry of the ATD resulting in accuracy error.

3. Analog input must be between V_{REFL} and V_{REFH} for valid conversion. Values greater than V_{REFH} will convert to \$3FF.

4. The resolution is the ideal step size or 1LSB = (V_{REFH} - V_{REFL}) / 1024

5. Differential non-linearity is the difference between the current code width and the ideal code width (1LSB). The current code width is the difference in the transition voltages to and from the current code.

6. Integral non-linearity is the difference between the transition voltage to the current code and the adjusted ideal transition voltage for the current code. The adjusted ideal transition voltage is (Current Code - 1/2) * (1 / ((V_{REFH} + E_{FS}) - (V_{REFL} + E_{ZS}))).

7. Zero-scale error is the difference between the transition to the first valid code and the ideal transition to that code. The ideal transition voltage to a given code is (Code - 1/2) * (1 / (V_{REFH} - V_{REFL})).

8. Full-scale error is the difference between the transition to the last valid code and the ideal transition to that code. The ideal transition voltage to a given code is (Code - 1/2) * (1 / (V_{REFH} - V_{REFL})).

9. Input leakage error is error due to input leakage across the real portion of the impedance of the network driving the analog pin. Reducing the impedance of the network reduces this error.

2. RF Module Operation

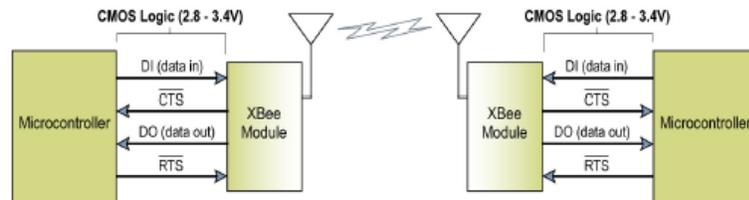
Serial Communications

The XBee®/XBee-PRO® RF Modules interface to a host device through a logic-level asynchronous serial port. Through its serial port, the module can communicate with any logic and voltage compatible UART; or through a level translator to any serial device (For example: Through a Digi proprietary RS-232 or USB interface board).

UART Data Flow

Devices that have a UART interface can connect directly to the pins of the RF module as shown in the figure below.

Figure 2-01. System Data Flow Diagram in a UART-interfaced environment
(Low-asserted signals distinguished with horizontal line over signal name.)

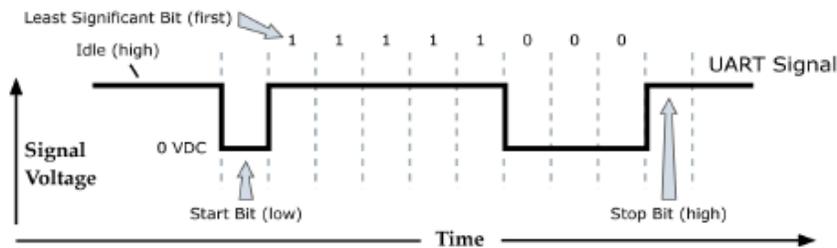


Serial Data

Data enters the module UART through the DI pin (pin 3) as an asynchronous serial signal. The signal should idle high when no data is being transmitted.

Each data byte consists of a start bit (low), 8 data bits (least significant bit first) and a stop bit (high). The following figure illustrates the serial bit pattern of data passing through the module.

Figure 2-02. UART data packet 0x1F (decimal number "31") as transmitted through the RF module
Example Data Format is 8-N-1 (bits - parity - # of stop bits)



Serial communications depend on the two UARTs (the microcontroller's and the RF module's) to be configured with compatible settings (baud rate, parity, start bits, stop bits, data bits).

The UART baud rate and parity settings on the XBee module can be configured with the BD and SB commands, respectively. See the command table in Chapter 3 for details.

Sensor pH



Global Water
800-876-1172 • globalw.com

pH Sensor

a. pH sensor specifications.

Output:	4-19mA
Range:	0-14 pH
Accuracy:	2% of full scale
Operating Voltage:	10-36VDC
Current Draw:	16.6 mA plus sensor output
Warm Up Time:	3 seconds minimum
Operating Temperature:	-5° to +55°C
Pressure Rating:	0-100 psi
Size of Probe:	1 1/4" diameter x 10" long
Weight:	1 lb.

- b. The sensing element is covered with a protective cap while at the Global Water facility to prevent the sensor from becoming damaged. This cap must be removed prior to sensor installation or the readings will be in error. To remove the cap, remove the protective shield and remove the rubber cap covering the sensing element. Replace the protective shield. Note: Save the cap for future use.
- c. This sensor has a removable sensing electrode. If the sensor is reading incorrectly, after following the basic maintenance steps, the electrode should be removed and the metal contacts cleaned. If this does not improve the sensor's results the electrode should be replaced. To remove the sensing electrode loosen the set screw holding the sensor shield and remove the shield from the sensor. Unscrew the sensing electrode from the sensor housing. Clean the metal contacts of the electrode with a clean cloth. If the electrode is replaced with a new electrode the sensor must be recalibrated to work correctly.
- d. The pH sensor is a three-wire sensor. Three wire sensors use the red wire for positive voltage, the white wire for the output signal, and the black wire for ground. **Warning: Always connect the sensor with the power turned off.**



MICROCHIP PIC18F2455/2550/4455/4550

28/40/44-Pin High-Performance, Enhanced Flash USB Microcontrollers with nanoWatt Technology

Universal Serial Bus Features:

- USB V2.0 Compliant
- Low Speed (1.5 MB/s) and Full Speed (12 MB/s)
- Supports Control, Interrupt, Isochronous and Bulk Transfers
- Supports up to 32 endpoints (16 bidirectional)
- 1-Kbyte dual access RAM for USB
- On-chip USB transceiver with on-chip voltage regulator
- Interface for off-chip USB transceiver
- Streaming Parallel Port (SPP) for USB streaming transfers (40/44-pin devices only)

Power-Managed Modes:

- Run: CPU on, peripherals on
- Idle: CPU off, peripherals on
- Sleep: CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8 μ A typical
- Sleep mode currents down to 0.1 μ A typical
- Timer1 oscillator: 1.1 μ A typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.1 μ A typical
- Two-Speed Oscillator Start-up

Flexible Oscillator Structure:

- Four Crystal modes including High Precision PLL for USB
- Two External Clock modes, up to 48 MHz
- Internal oscillator block:
 - 8 user-selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz
 - User-tunable to compensate for frequency drift
- Secondary oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Dual oscillator options allow microcontroller and USB module to run at different clock speeds
- Fail-Safe Clock Monitor
 - Allows for safe shutdown if any clock stops

Peripheral Highlights:

- High-current sink/source 25 mA/25 mA
- Three external interrupts
- Four Timer modules (Timer0 to Timer3)
- Up to 2 Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
 - Capture is 16-bit, max. resolution 6.25 ns (T_{OV16})
 - Compare is 16-bit, max. resolution 100 ns (T_{CC})
 - PWM output: PWM resolution is 1 to 10-bit
- Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module:
 - Multiple output modes
 - Selectable polarity
 - Programmable dead time
 - Auto-Shutdown and Auto-Restart
- Enhanced USART module:
 - LIN bus support
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module supporting 3-wire SPI™ (all 4 modes) and I²C™ Master and Slave modes
- 10-bit, up to 13-channels Analog-to-Digital Converter module (A/D) with programmable acquisition time
- Dual analog comparators with input multiplexing

Special Microcontroller Features:

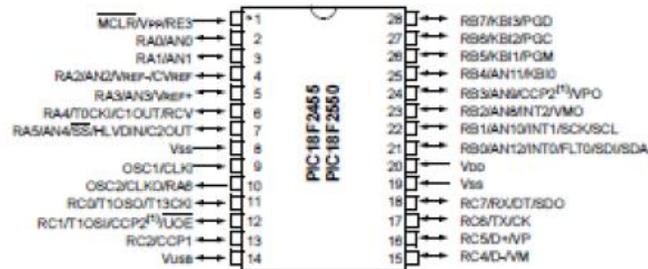
- C compiler optimized architecture with optional extended instruction set
- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory typical
- Flash/Data EEPROM Retention: > 40 years
- Self-programmable under software control
- Priority levels for interrupts
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 41 ms to 131s
- Programmable Code Protection
- Single-Supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
- Optional dedicated ICD/ICSP port (44-pin devices only)
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit AD (oh)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		USART	Comparators	Timers 8/16-bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI™	Master I ² C™			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

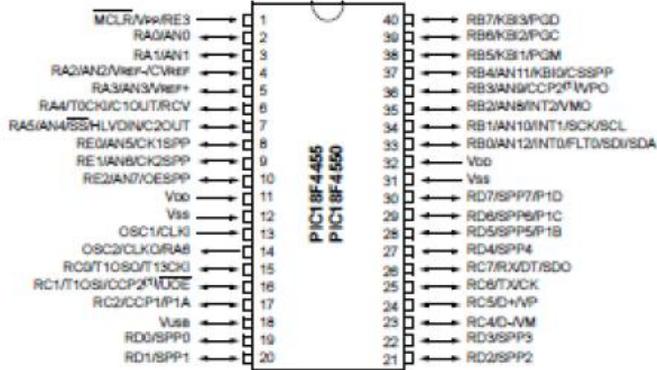
PIC18F2455/2550/4455/4550

Pin Diagrams

28-Pin PDIP, SOIC



40-Pin PDIP



Note 1: RB3 is the alternate pin for CCP2 multiplexing.

PIC18F2455/2550/4455/4550

TABLE 1-1: DEVICE FEATURES

Features	PIC18F2455	PIC18F2550	PIC18F4455	PIC18F4550
Operating Frequency	DC – 48 MHz			
Program Memory (Bytes)	24576	32768	24576	32768
Program Memory (Instructions)	12288	16384	12288	16384
Data Memory (Bytes)	2048	2048	2048	2048
Data EEPROM Memory (Bytes)	256	256	256	256
Interrupt Sources	19	19	20	20
I/O Ports	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C, D, E
Timers	4	4	4	4
Capture/Compare/PWM Modules	2	2	1	1
Enhanced Capture/ Compare/PWM Modules	0	0	1	1
Serial Communications	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART
Universal Serial Bus (USB) Module	1	1	1	1
Streaming Parallel Port (SPP)	No	No	Yes	Yes
10-bit Analog-to-Digital Module	10 Input Channels	10 Input Channels	13 Input Channels	13 Input Channels
Comparators	2	2	2	2
Resets (and Delays)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT			
Programmable Low-Voltage Detect	Yes	Yes	Yes	Yes
Programmable Brown-out Reset	Yes	Yes	Yes	Yes
Instruction Set	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled			
Packages	28-pin PDIP 28-pin SOIC	28-pin PDIP 28-pin SOIC	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP