



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
DE TECNOLOGÍA DIGITAL**



ESPECIALIDAD EN SISTEMAS INMERSOS

**IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL ELÉCTRICO UTILIZANDO UN SISTEMA
INMERSO (EMBEDDED SYSTEM) PARA UN REACTOR ELECTROQUÍMICO**

TESINA

**QUE PARA OBTENER LA
ESPECIALISTA EN SISTEMAS INMERSOS**

P R E S E N T A:

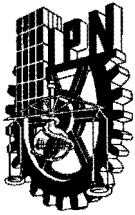
MARCO ANTONIO MENDOZA SANDOVAL.

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

M.C. TEODORO ÁLVAREZ SÁNCHEZ

AGOSTO 2013

TIJUANA, B.C., MÉXICO



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESINA

En la Ciudad de Tijuana, B.C. siendo las 10:00 horas del día 1 del mes de octubre del 2013 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesina, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CITEDI para examinar la tesina titulada:

IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL ELECTRÓNICO UTILIZANDO UN SISTEMA INMERSO (EMBEDDED SYSTEM) PARA UN REACTOR ELECTROQUÍMICO.

Presentada por el alumno:

MENDOZA
Apellido paterno

SANDOVAL
Apellido materno

MARCO ANTONIO
Nombre(s)

Con registro:

B	0	9	1	8	9	0
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

ESPECIALIDAD EN SISTEMAS INMERSOS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESINA**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesina

M. C. TEODORO ÁLVAREZ SÁNCHEZ

DR. ROBERTO HERRERA CHARLES

M. C. JOSÉ MARÍA MONTOYA FLORES

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DRA. MIREYA SARAÍ GARCÍA VÁZQUEZ

COLEGIO DE PROFESORES DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
DE TECNOLOGÍA DIGITAL
DIRECCIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 28 del mes de agosto del año 2013, el (la) que suscribe Marco Antonio Mendoza Sandoval , alumno(a) del Programa de Especialidad en Sistemas Inmersos, con número de registro B091890, adscrito(a) al CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE TECNOLOGÍA DIGITAL - IPN, manifiesto(a) que es el (la) autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesina bajo la dirección del (de la, de los) **M.C. Teodoro Álvarez Sánchez** y cede los derechos del trabajo titulado “IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL ELÉCTRICO UTILIZANDO UN SISTEMA INMERSO (EMBEDDED SYSTEM) PARA UN REACTOR ELECTROQUÍMICO” , al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección Av. del parque 1310, Mesa de Otay, Tijuana Baja California 222510, México o a la dirección electrónica: mmendoza668@gmail.com, posgrado@citedi.com.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

MARCO ANTONIO MENDOZA SANDOVAL.
Nombre y firma del alumno(a)

La dedico la tesina:

A mi familia: Tatiana, Sofia, Mauricio y amigos.

Agradecimientos.

A mí Mamá, Papá, gracias a ellos soy una persona profesionalista y un hombre de bien.

A los compañeros de la especialidad y profesores de CITEDI-IPN.

IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL ELÉCTRICO UTILIZANDO UN SISTEMA INMERSO PARA UN REACTOR ELECTROQUÍMICO

RESUMEN.

Diseño y Construcción de un Sistema Inmerso para el control electrónico de un reactor electroquímico utilizando un microcontrolador el cual fue necesario primero comprender el funcionamiento de un reactor electroquímico, para ello se describen los procesos de coagulación, floculación, teoría de electrolisis.

Segundo etapa, se seleccionaron los componentes del sistema de control. Una comparativa de microcontroladores comerciales y así como el uso de la teoría del funcionamiento del sensor de turbidez.

Tercera etapa, la programación del microcontrolador se realizó en lenguaje C++, se realizaron varios programas de prueba para activar los puertos de entrada y salida, así como el convertidor analógico digital.

Cuarta etapa, el diseño de la tarjeta (PCB) fue diseñada usando el CAD PCB Wizard, y se diseño de forma modular de modo que pueda se pueda escalar o intercambiar de una manera más sencilla.

Quinta etapa, se realizaron varias pruebas con distintos sensores de turbidez para la elección de un sensor adecuado para la aplicación.

El sistema inmerso fue realizado de forma modular, permitiendo agregar diferentes módulos de propósito específico, así como la conexión de varios sensores en forma modular.

Para controlar la electrocoagulación-floculación, fue necesario comprender los procesos químicos. La reacción electroquímica del reactor cumple con los parámetros de calidad del agua debido a los resultados obtenidos del análisis de ph, Turbidez y Demanda Química de Oxígeno. Por medio de estos se puede comprobar la remoción de los sólidos disueltos y el funcionamiento de la electrocoagulación.

EMBEDDED SYSTEM OF AN ELECTRIC CONTROL IMPLEMENTATION TO AN ELECTROCHEMICAL REACTOR CONTROLLER

ABSTRACT.

Design and construction of an embedded controller for an electrochemical reactor based on microcontroller. First, the behavior of this system is described: coagulation process, flocculation, and electrolysis.

Second stage, control system components were selected. Commercial microcontrollers were compared, and turbidity sensor theory was applied.

Third stage, microcontroller was programmed in C++ language. Various tests were designed and implemented on input and ports, as well as the ADC (analog to digital converter) module.

Fourth stage, the PCB board was designed using PCB Wizard CAD software. A modular design approach was chosen in order to gain scalability and adaptability.

Fifth stage, many tests were performed with different candidate turbidity sensors in order to select the appropriate one for the application.

The embedded system was implemented modularly, allowing different special purpose modules connected serially, as well as modular sensor systems.

In order to control electro coagulation-flocculation, it was necessary to understand the underlying chemical process. The electro-chemical reaction satisfies water quality standards. This can be verified by means the ph, turbidity and chemical oxygen demand results measured. Also, dissolved solid removal and electro coagulation can be verified in this manner.

CAPÍTULO 1

1. Introducción.....	5
1.1 Antecedentes.....	5
1.2 Objetivo de la investigación.....	6
1.2.1 Objetivo general.....	6
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.2.3 Organización de la tesina.....	6

CAPÍTULO 2

2. Marco teórico.....	7
2.1 Coagulación y floculación.....	7
2.2 Electrólisis.....	7
2.3 La Electrocoagulación-floculación.....	8
2.4 Caracterización del sistema de control.....	11
2.5 Comparación de microcontroladores comerciales.....	12
2.6 Fundamento del sensor de turbidez.....	13

CAPÍTULO 3

3. Desarrollo.....	14
3.1 Programación del microcontrolador.....	14
3.2 Diseño de tarjeta PCB del microcontrolador.....	16
3.3 Programa de control.....	19
3.4 Diseño y construcción de la etapa de potencia.....	22

CAPÍTULO 4

<i>4. Resultados</i>	26
<i>4.1 Resultado</i>	26
<i>4.2 Análisis de parámetros</i>	27
CONCLUSIONES	30
BIBLIOGRAFÍA	31
ANEXO I	32
ANEXO II	36

LISTA DE FIGURAS, PROTOTIPO

Figura 1. Proceso de electrólisis.	8
Figura 2. a) Generación del coagulante b) Floculación.	9
Figura 3. a) Flotación de las partículas b) Sedimentación.	9
Figura 4. Diagrama a bloques del sistema.	11
Figura 5. Principio de reflexión.	13
Figura 6. Diagrama de simulaciones ADC para el sensor de turbidez.	16
Figura 7. Resistor polarizador.	17
Figura 8. Diseño de la tarjeta en PCB Wizard.	18
Figura 9. a) Pistas del circuito en negativo b) Tarjeta prototipo.	18
Figura 10. Diagrama de flujo de programa de control.	21
Figura 11. Diagrama a bloques del circuito electrónico.	22
Figura 12. Integrado ULN2803.	23
Figura 13. Circuito de acoplamiento conectado al puerto C para activar el actuador.	23
Figura 14. Amplificador no inversor.	24
Figura 15. Circuito de la fotorresistencia y amplificador al microcontrolador.	24
Figura 16. LM317 en configuración de corriente constante.	25
Figura 17. Linealidad de circuito regulador.	25
Figura 18. Tanque y sus componentes.	26
Figura 19. a) Se muestra el agua sin tratar y b) Se muestra el agua tratada después de 45 minutos.	27
Figura 20. Comportamiento del ph con respecto al tiempo.	28
Figura 21. Gráfica de turbidez con respecto al tiempo.	28
Figura 22. Demanda química de oxígeno con respecto al tiempo.	29
Figura 23. Tarjeta módulo de potencia.	32
Figura 24. Circuito impreso.	33
Figura 25. Vista previa de tarjeta con dispositivos.	33

Figura 26. Resina fotosensible.....	34
Figura 27. Removedor de resina.....	34
Figura 28. Grabación de circuito impreso en tarjeta de cobre.	35
Figura 29. Tarjeta con componentes.....	35
Figura 30. Muestras de agua con diferente dosis de turbidez.	36
Figura 31. a) Señal que se obtuvo del fototransistor y led infrarrojo b) Señal que se obtuvo del led ultra brillante y fotorresistencia.	37

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Comparación de microcontroladores.....</i>	<i>12</i>
--------------------------------------------------------	-----------

CAPÍTULO 1

1. Introducción.

1.1 Antecedentes.

Existen técnicas conocidas para el tratamiento de aguas residuales, las cuales incluyen procesos biológicos por nitrificación y extracción de fósforo, además de una variedad de procesos físico-químicos que requieren de adición de compuestos químicos. Los procesos más utilizados son filtración, aeración, intercambio iónico, precipitación química, oxidación química, absorción por carbono, ultrafiltración, ósmosis inversa, electrodiálisis y gasificación.

Los dispositivos que realizan el proceso de tratamiento de aguas residuales tienen un alto costo, son de uso y tamaño industria y requieren una supervisión constante de personal especializado.

La descarga y el tratamiento de las aguas residuales son una prioridad actual en Tijuana, Baja California.

En países con un alto desarrollo urbano como USA, Alemania y China, entre otros, experimentan una necesidad crítica por el tratamiento de aguas residuales por el incremento de la población, urbanización y cambios climáticos.

En países subdesarrollados como México la demanda de agua potable es crítica; los ríos, canales, presas y otros tipos de depósitos de agua son constantemente contaminados por descargas de residuos industriales, además de otro tipo de actividades y procesos naturales.

1.2 Objetivo de la investigación.

1.2.1 Objetivo general.

Diseño y Construcción de un Sistema Inmerso para el control electrónico de un reactor electroquímico utilizando un microcontrolador.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Comparación de microcontroladores en el mercado para seleccionar el más adecuado.
- Realizar prototipos de sensor de turbidez y seleccionar el más adecuado.
- Realizar pruebas con el convertidor analógico-digital del microcontrolador y el sensor seleccionado con prototipo modular con pantalla LCD.
- Diseñar, construir y probar un prototipo de fuente de corriente constante.
- Diseñar y construir un prototipo modular, con etapa de potencia (Driver, relevadores).

1.2.3 Organización de la tesina.

El capítulo 1 se menciona los objetivos de la investigación, en el capítulo 2 se presenta la introducción a los procesos de coagulación, el proceso de floculación, la teoría de electrólisis, la electrocoagulación-floculación, la caracterización de los componentes del sistema de control, la comparación de microcontroladores comerciales y el fundamento del sensor de turbidez. En el capítulo 3 se presenta parte del programa de prueba del microcontrolador para realizar la medición de sensor de turbidez, el diseño de la tarjeta (PCB) para el microcontrolador funcione como módulo, la selección del sensor de turbidez realizando varios experimentos, el programa de control inmerso en el microcontrolador y para finalizar el diseño, construcción de la etapa de potencia y las conclusiones del trabajo realizado.

CAPÍTULO 2

2. Marco teórico.

Los parámetros del proyecto son: el proceso de coagulación-floculación, la electrólisis y el microcontrolador para realizar el control.

2.1 Coagulación y floculación.

La *Coagulación* consiste en la dosificación directa de una solución coagulante, como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, entre otros, al agua gris para cambiar el comportamiento de las partículas en suspensión. El agua contaminada contiene sólidos en suspensión por ello no es cristalina.

La coagulación y la floculación son procesos para eliminar gran parte del material suspendido, esto hace que las partículas que anteriormente tendían a repelerse unas de otras, sean atraídas las unas a las otras, formándose partículas de mayor tamaño.

La coagulación ocurre durante una mezcla rápida o el proceso de agitación que inmediatamente sigue a la adición del coagulante.

El proceso de *Floculación* que sigue a la coagulación, es un tratamiento físico en el cual se promueve el choque de partículas coagulantes para hacer posible la formación de partículas de mayor tamaño que pueden separarse por sedimentación o filtración [1].

2.2 Electrólisis.

Es un proceso que tiene lugar cuando se aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos y se realiza una reacción oxidación-reducción. La diferencia de potencial aplicada a los electrodos depende del electrolito y del material que constituye los electrodos. Si el agua no es destilada, la electrólisis no sólo separa el oxígeno y el hidrógeno, sino los demás componentes que estén presentes como sales, metales y algunos otros minerales [5].

2.3 La Electrocoagulación-floculación.

La electrocoagulación-floculación es una técnica que involucra la adición electrolítica para la generación de iones metálicos coagulantes directamente, se utiliza un mezclador para realizar la floculación. Los iones metálicos permiten que los contaminantes se aglomeren de la misma forma que si se adicionara un producto químico como podría ser el sulfato de aluminio o cloruro férrico, entre otros [1].

Se utilizan electrodos sumergidos en un líquido o electrolito, los electrodos se denominan ánodo y cátodo como se muestra en la figura 1, se hace conducir una corriente a través de ellos causando la reacción electroquímica; en el cátodo se utiliza un metal inerte, donde se realiza la hidrólisis del agua, generando el ion hidrógeno y el ion hidroxilo como se muestra en la ecuación 1.

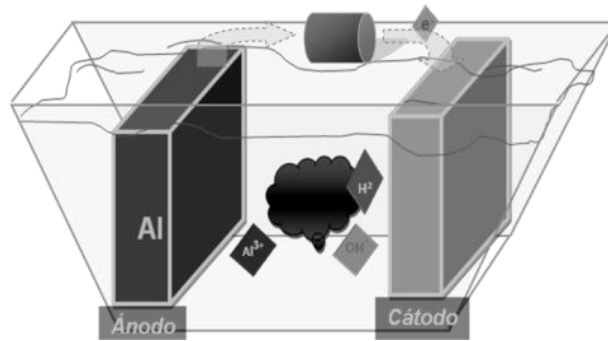
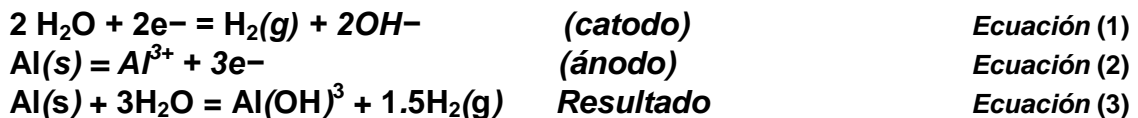
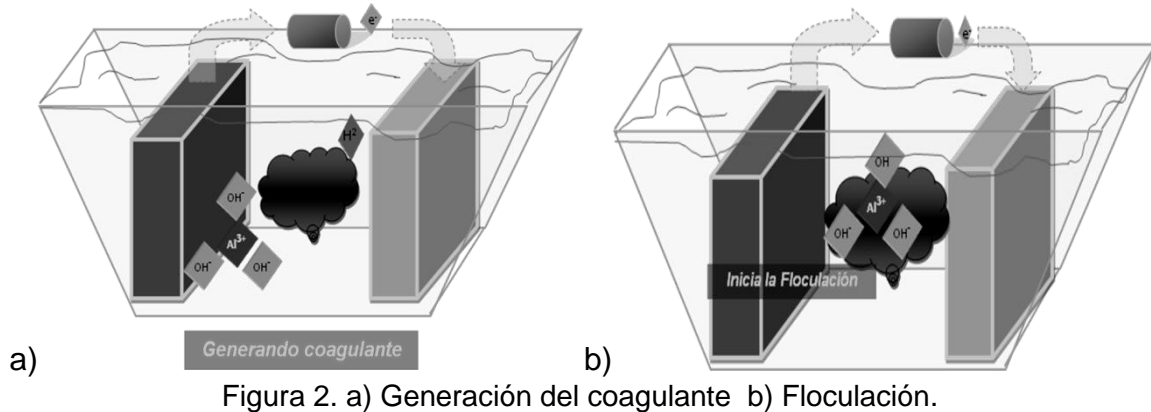


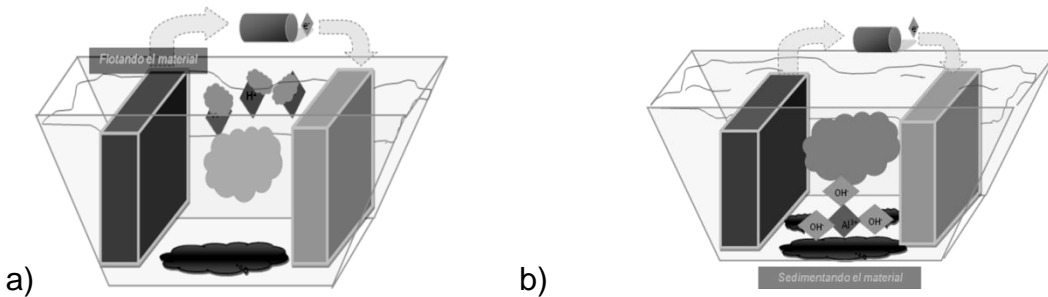
Figura 1. Proceso de electrólisis.

El ánodo es de aluminio, el cual se oxida y genera el ion Al^{3+} (ecuación 2 y en la figura 2a). Este se complementa con tres moléculas de ion hidroxilo generados en el cátodo, formándose Hidroxilo de Aluminio que es el agente coagulante que atrapa las partículas suspendidas en el agua gris como se muestra en la figura 2b y ecuación 3.





El proceso de floculación inicia con la aglomeración de las partículas suspendidas y se estimula mediante un mezclador, con el mezclador la aglomeración de partículas coaguladas es homogénea en todo el reactor. Las partículas ganan mayor peso y por gravedad son sedimentadas, aquellas que no lo son, son llevadas a la superficie por las burbujas del gas hidrógeno. Este proceso se observa en la figura. 3.



Algunas de las ventajas de la electrocoagulación-floculación son:

- Promueve el movimiento de pequeños coloides dentro del campo magnético generados en el reactor electroquímico y la turbulencia creada por la burbuja.
- Promueve el proceso de separación debido a la producción de burbujas de hidrógeno producidas en el cátodo, la cual puede llevar a los sólidos a la parte de arriba de la solución, donde pueden ser fácilmente tomados y removidos.

- Con este método se genera un residuo de menor tamaño comparado con la coagulación química, debido a que se realiza una reacción instantánea (in-situ) en el agua.
- Tiene un modo de operación más sencillo por no ser necesaria la adición de agentes químicos, además que la dosificación de coagulante es fácil de controlar.

Para conocer el nivel de contaminación del agua es necesario analizar muestras tomadas a diferentes tiempos del proceso, los parámetros de estudio son: ph, demanda química de oxígeno y turbidez.

Como referencia de los límites permisibles se asociarán los resultados con la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT1 que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas. [3,*].

A continuación se describe cada uno de los parámetros calidad de agua:

ph.- Es un indicador de la acidez y alcalinidad de una sustancia, la cual determina el número de iones libres de hidrógeno (acidez) y el número de iones hidroxilos libres (alcalinidad) en una sustancia. La acidez es una de las propiedades más importantes del agua, es por ello que en las aguas tratadas se lleva a cabo el análisis de ph.

Demanda química de oxígeno.- La **DQO** es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar todos los sólidos suspendidos en el agua gris. Es por tanto una medida representativa de la contaminación, siendo un parámetro a controlar y además de darnos una idea real del grado de toxicidad.

Turbidez.- Se refiere a la falta de transparencia de un líquido, debido a la presencia de sólidos en suspensión. Dichos sólidos son atribuidos al nivel de suciedad y contaminación del líquido [2].

*Los límites permisibles de la turbidez esta determinada por NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA 1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano; límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, 5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

2.4 Caracterización del sistema de control.

El sistema inmerso controla los parámetros del reactor como son: el nivel del agua, la medición de la turbidez, la duración del tratamiento, adicionalmente tiene una interface para el usuario para hacerle saber que acción se está realizando y además de darle el control de la medición de turbidez. Para lograr el control del reactor, el sistema debe de consistir en tres partes:

1. Control electrónico.
2. Actuadores.
3. Sensores.

Basado en lo anterior se muestra el diagrama a bloques del sistema completo, como se ve en la figura 4, donde se pueden apreciar los botones del usuario para tener acceso al manejo del sistema, la pantalla de LCD muestra el estado del sistema, las acciones que se están realizando; la fuente de poder que alimentará al circuito de control y a los actuadores, se muestra las etapas que integran al control electrónico, el transmisor de información RF que captará los datos seriales de control para su posterior transmisión y el reactor donde se colocan los actuadores y los sensores.

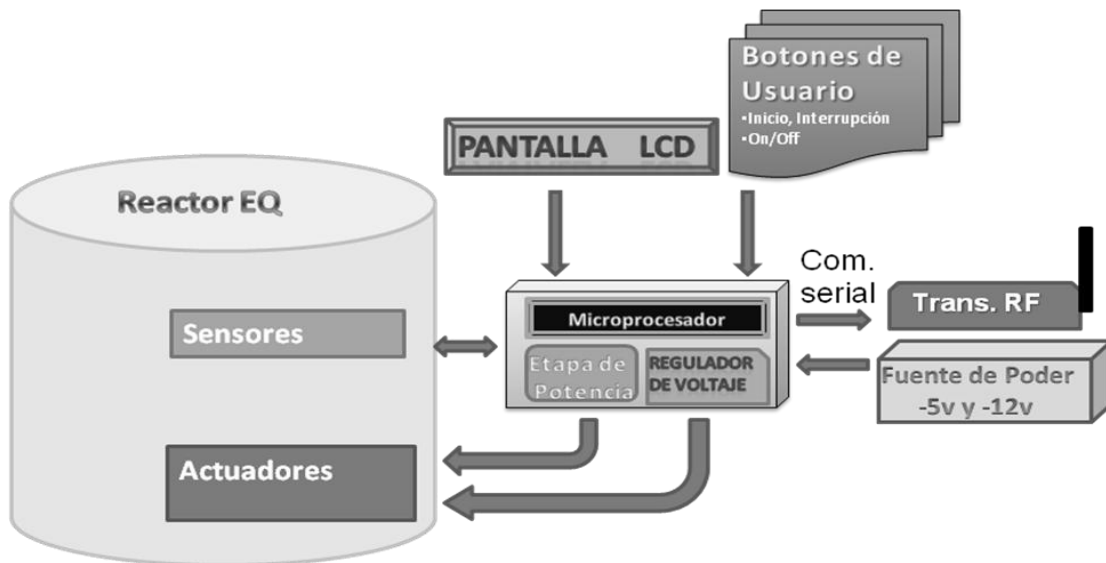


Figura 4. Diagrama a bloques del sistema.

Las características que debe contar el reactor, son:

- Un canal de ADC de 10 bits para dar lectura al sensor de turbidez
- Comunicación serial
- Puerto de 4 bits para entrada (botones)
- Puerto de 4 bits para salida (actuadores)

- Puerto libre a expansión

2.5 Comparación de microcontroladores comerciales.

Después de la definición de las características del control electrónico, la siguiente etapa es la selección del microcontrolador apropiado para dicha aplicación. Para ello se realizó la tabla 1.

COMPARACIÓN DE MICROCONTROLADORES														
Device	Max. Frecuency (Mhz)	Memory Type	Flash Memory size(kByte)	EEPROM size(Kbyte)	RAM size(Byte)	10-Bit ADCs	I/Os	CS	UARTs	8-bit Timers	16-Bit Timers	VDD min.(volt)	Num. PINS	Packages
NEC														
UPD78F9502MA-CACA	10	Flash	4	0	128	4	8	0	1	1	1	2	10	
SM Microelectronics														
STM8S103F2	16	Flash/EEPROM	4	1	2K	4	16(9)	SPI, I2C	1	1	2	2,9	20	TSSOP20, VQFN20
STM8S103F3	16	Flash/EEPROM	8	1	2K	4	16(9)	SPI, I2C	1	1	2	2,9	20	TSSOP20, VQFN21
STM8S105k4	16	Flash/EEP	16	1	2	7	25(8)	SPI, I2C	1	1	3	2,9	32	LQFP32, VQFN32
ATMEL														
ATmega88	20	Flash/EEP	8	0,512	1K	6	23	1	1	2	1	1.8 o 2.6	28	
ATmega168	20	Flash/EEP	16	0,512	1k	6	23	1	1	2	1	1.8 o 2.7	28	
ATtiny13A	20	Flash/EEP	1	0,064	64	4	6	0	0	1	0	1,8	6	PDIP8, SOIC8, QFN20, QFN10
ATtiny2313	10	Flash/EEP	2	0,128	128	0	18	1	1	1	1	1,8	18	PDIP20, SOIC20, QFN20
ATtiny24	10	Flash/EEP	2	0,128	128	4	12	1	0	1	1	1,8	12	PDIP14, SOIC12, QFN20
Attiny44A	10	Flash/EEP	4	0,256	256	8	12	1	0	1	0	1,8	12	PDIP14, SOIC14, QFN20, VQFN20
MICROCHIP														
PIC16F877	20	Flash/EE	16	256 xBytes	368 x 8bytes	8	3	1	1	2	2	2	40	

Tabla 1. Comparación de microcontroladores.

Observando la tabla 1 y haciendo comparaciones, se seleccionó el PIC16F877 de microchip por las siguientes características:

- 1) Tiene ADC interno
- 2) Tiene comunicación serial
- 3) Cuenta con 5 puertos de I/O
- 4) Utiliza lenguaje " C "
- 5) Se puede encontrar muy fácilmente
- 6) Programador disponible
- 7) Compatible Pin a Pin con PIC16C73B/74B/76/77

2.6 Fundamento del sensor de turbidez.

La turbidez se refiere a la falta de transparencia de un líquido debido a la presencia de sólidos en suspensión. Dichos sólidos son atribuidos al nivel de suciedad y contaminación del líquido. Por ello es necesario un sensor para medirla y comprobar que efectivamente se realizó el tratamiento al agua. El funcionamiento del sensor está basado en el principio de la reflexión que es el cambio de dirección de un rayo o una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio inicial. El contenedor del reactor es de acrílico y es superficie de separación, se proyecta un haz de luz que varía su reflexión debido a las partículas en suspensión del agua.

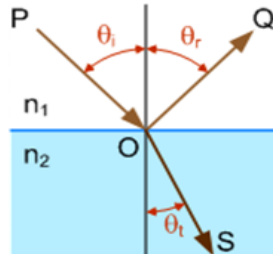


Figura 5. Principio de reflexión.

CAPÍTULO 3

3. Desarrollo.

3.1 Programación del microcontrolador.

Como compilador se utilizó “PCW Compiler IDE” Versión 3.43 [7]. Se realizó un programa de prueba para comparar la resolución de los posibles sensores de turbidez y la medición de su señal por el canal 0 del convertidor analógico digital del microcontrolador y se mostró el resultado en la pantalla.

A continuación se describe el programa empleado para la medición de los voltajes del convertidor ADC. En esta sección se menciona el microcontrolador que se va a utilizar, la velocidad de reloj, la resolución del convertidor de 10 bits, la librería de LCD que se utilizará y la configuración de los puertos.

Programa:

```
#include <16F877A.h>
#device ADC=10
#use delay(clock=4000000)
#include <LCD.c>
#fuses HS, NOWDT, NOPUT, NOLVP, NOBROWNOUT, NOWRT, NOPROTECT
#use fast_io(A)
#use fast_io(B)
#use fast_io(C)
#use fast_io(D)
#use fast_io(E)

#byte porta = 5
#byte portb = 6
#byte portc = 7
#byte portd = 8
#byte porte = 9
```

A continuación se muestra el programa principal, en él se invoca la configuración del convertidor analógico digital, se selecciona el canal de lectura, qué fuente utilizará como reloj, inicializa la función del LCD.

```
void main(){
    int16 q;
    float p;
    setup_adc_ports(AN0);           // canal 0 analógico
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL); //fuente de reloj RC
    lcd_init();                     //inicializa el LCD
```

Para dar lectura al canal del convertidor se colocó un ciclo “for” infinito, se da selección al canal utilizado; en la variable “q1” guarda la medición del convertidor; después el valor se convierte a voltaje y se guarda en la variable “p1”; se realizan tres operaciones iguales con el propósito de realizar un promedio de la señal antes de ser mostrada en el LCD.

```
for(;;){
    set_adc_channel(0); // habilitación canal 0

    q1=read_adc();
    p1 = 5.0 * q1 / 1023.0;
    delay_us(20);
    q2=read_adc();
    p2 = 5.0 * q2 / 1023.0;
    delay_us(20);
    q3=read_adc();
    p3 = 5.0 * q3 / 1023.0;
    delay_us(20);
    p=p1+p2+p3;
    p=p/3;
    q=q1+q2+q3;
    q=q/3;

    printf(lcd_putc, "\fADC = %4ld",q);
    printf(lcd_putc, "\nVoltaje = %01.2fV",p);
    delay_ms(100); } }
```

Para asegurar el funcionamiento, se utilizó el simulador de hardware de microcontroladores ISIS Proteus versión 7.4 SP3, con él que se comprueba la funcionalidad del programa implementado [7].

En el puerto D se conecta la pantalla LCD que muestra los resultados de la medición; en el canal 0 se conecta un potenciómetro variable para simular la señal del sensor. En la figura 6 se muestra la simulación.

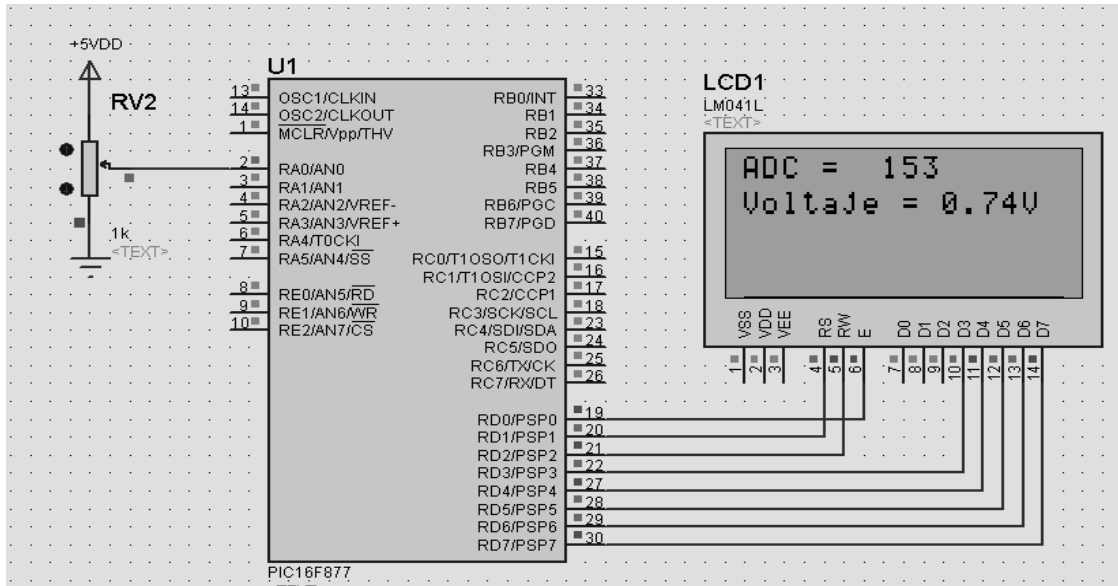


Figura 6. Diagrama de simulaciones ADC para el sensor de turbidez.

3.2 Diseño de tarjeta PCB del microcontrolador.

Se utilizó el programa PCB Wizard, es una herramienta CAD para crear y simular circuitos electrónicos y tiene una amplia biblioteca de dispositivos [6].

Se diseñó la tarjeta modular para que el microcontrolador funcione apropiadamente y tener acceso a los puertos. El propósito de esta tarjeta es utilizarla para medir los niveles de voltaje del sensor de turbidez prototipo.

La interface al usuario es una pantalla LCD de 4 líneas y 16 caracteres, donde se notifican las acciones que se están realizando en el proceso. La pantalla se conecta directamente al puerto D del microcontrolador debido a que los niveles de voltaje digitales son válidos para la pantalla y se programó el puerto para esta función.

Se agregaron dos botones para que el operador tenga la opción de inicio del tratamiento, medir turbidez en cualquier momento del tratamiento y detener el proceso.

El circuito de entrada de estos datos es sencillo, están conectados al puerto B del Microcontrolador, la entrada es un interruptor o un botón. Para asegurar el nivel de la entrada se coloca una resistencia polarizadora como se muestra en la figura 7. Cuando el interruptor está abierto, la salida de voltaje del circuito sujetará hasta 0V a través de la resistencia. Cuando el interruptor está en corto la salida está conectada directamente a 5V, la resistencia previene que la fuente de poder esté en corto con la tierra.

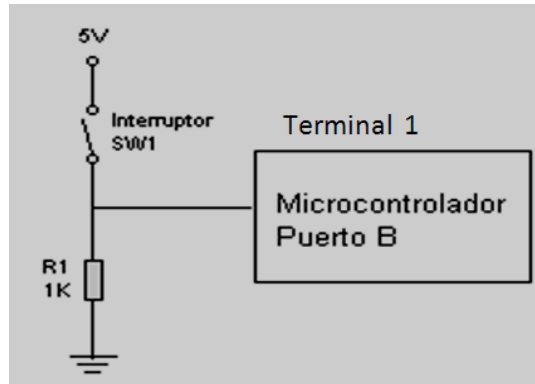


Figura 7. Resistor polarizador.

Como se indica en la figura 8, se puede polarizar el microcontrolador con Vcc (terminal de polarización positiva) terminal 11 y a tierra la terminal 12, el cristal conecta a las terminales 13 y 14, éstas van conectadas por medio de capacitores de 22 pF (pico faradios) a tierra (nodo común conectado al negativo de la fuente de voltaje), las terminales del puerto A son enviadas a un conector hembra de una sola línea, posteriormente son conectados a un divisor de voltaje con resistencia de $1K\Omega$ (1000 Ohms), debido a que en este puerto se encuentran los canales del convertidor analógico digital, de esta manera se pueden enviar señales analógicas sin tener que poner un divisor de voltaje, el puerto B es de la terminal 33 a la 40 y tienen la misma configuración que el anterior porque se utilizan como salida para controlar los actuadores.

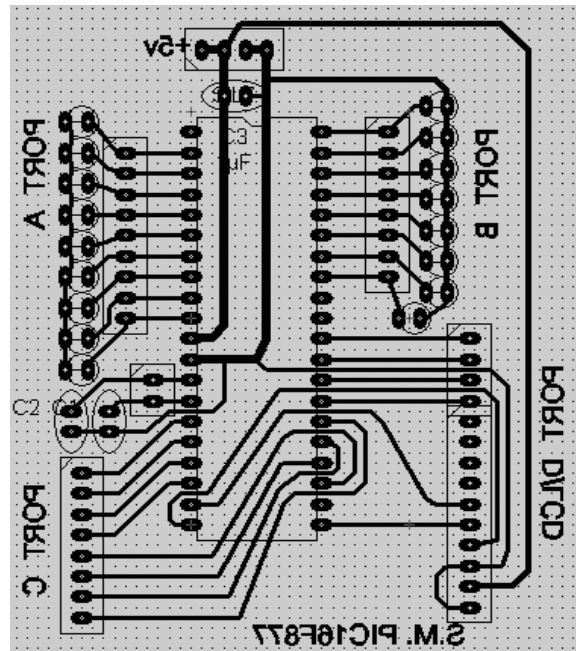


Figura 8. Diseño de la tarjeta en PCB Wizard.

El puerto D es la salida a la pantalla de cristal liquido con siglas en ingles LCD, por ello se colocó una terminal hembra de 14, ésta además polariza a la pantalla y su contraste. Una vez finalizado el diseño, PCB Wizard convierte a pistas el negativo del circuito como muestra la figura 9a, se traspasa el diseño a una tarjeta de cobre para.

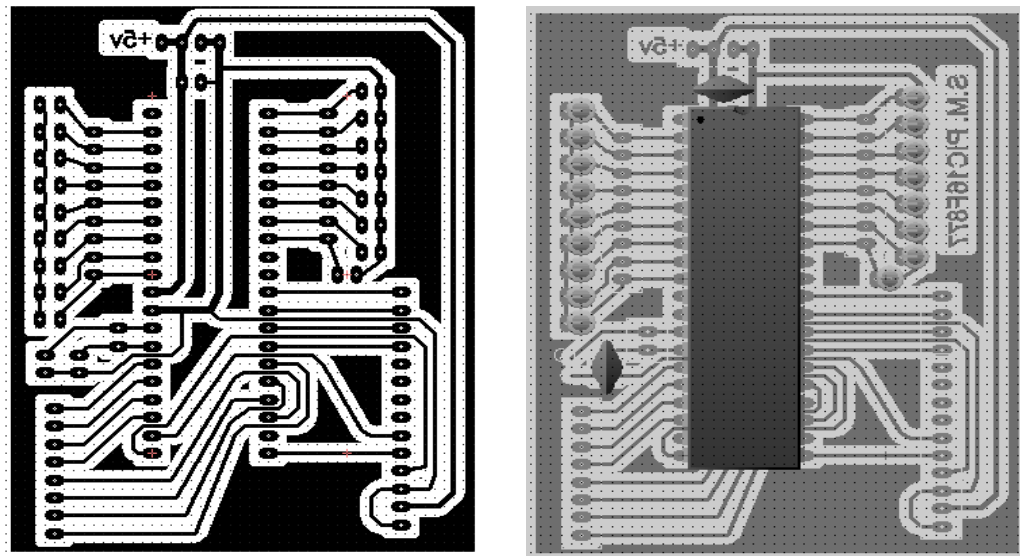


Figura 9. a) Pistas del circuito en negativo b) Tarjeta prototipo.

Otra opción que brinda la herramienta es la muestra del prototipo finalizado, con los componentes en su lugar, como muestra la figura 9b.

3.3 Programa de control.

La programación se realizó en lenguaje C con el programa PCW compilador porque tiene las librerías del microcontrolador que se utiliza [7]. Antes de iniciar el programa del control, fue necesario comprobar el funcionamiento del convertidor analógico, de los puertos de Entrada/Salida y para comprobar el funcionamiento de la pantalla LCD se envían mensajes a la misma, para evitar errores de entrada y salida de datos, debido a que algunos puertos están compartidos, tienen diferentes funciones y puede ser necesario desactivarlas.

Una vez comprobado el funcionamiento de los puertos, se asignaron los componentes a los puertos de entrada/salida del microcontrolador.

- Puerto A: el canal A0 se utiliza para recibir la señal generada por el sensor de turbidez. Y es activada la función del convertidor analógico/digital.

- Puerto B: Se encuentran las entradas del sistema, tiene la siguiente asignación:
 - B0 Botón de Iniciar proceso activado con 1 booleano.
 - B1 Interruptor de tanque vacío activado con un 1 booleano.
 - B2 Interruptor de tanque lleno activado con un 1 booleano.
 - B3 Botón de reiniciar proceso activado con un 1 booleano.

- Puerto C: se seleccionó para los actuadores del sistema, ya que tiene ocho terminales.
 - A continuación se describe cada uno:
 - C1 Bomba de agua de entrada activado con un 1 booleano.
 - C2 Electrodo y mezclador activado con un 1 booleano.
 - C3 Activación de Laser activado con un 1 booleano.
 - C4 Bomba de extracción de agua del reactor activado con un 1 booleano.
 - C5 Válvula de purga activado con un 1 booleano.

C6 Rx. Recepción de datos serial

C7 Tx. Transmisión de datos serial.

- Puerto D: será conectado directamente a las terminales de la pantalla de LCD, en la programación se seleccionó previamente este puerto para esta función.

El diagrama de flujo del programa de control, se muestra en la figura 10, y se describe a continuación:

1. Al encender el sistema se envía el mensaje de inicio, el siguiente mensaje es: “Presione el botón uno para iniciar tratamiento”, para que el usuario inicie el tratamiento.
2. Al ser presionado el botón uno, el sistema inmerso revisa el nivel del agua por medio de los flotadores, si está vacío el tanque, se enciende la bomba de agua de entrada para llenarlo y se cierra automáticamente cuando el tanque está lleno.
3. Una vez lleno, el sistema de control enciende el led y el amplificador, mide la señal del sensor para medir la turbidez del agua. Si es mayor a 45 FAU se inicia el proceso de electrocoagulación con una duración de 15 min., después se vuelve a medir la turbidez, si es mayor a 45 FAU se volverá a tratar por otros quince minutos, hasta obtener una lectura menor a 45 FAU que es la turbidez deseada.

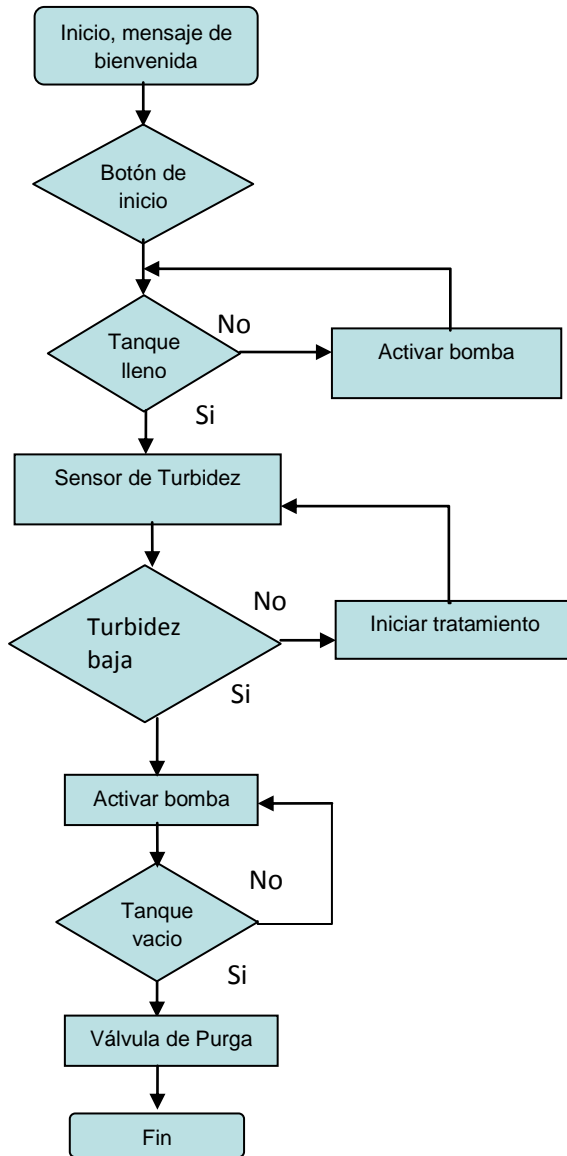


Figura 10. Diagrama de flujo de programa de control.

3.4 Diseño y construcción de la etapa de potencia.

Para tener un panorama del control electrónico se muestra el siguiente diagrama a bloques en la figura 13, donde se aprecia la forma en cómo fluyen los datos hacia el microcontrolador, los actuadores y los sensores.

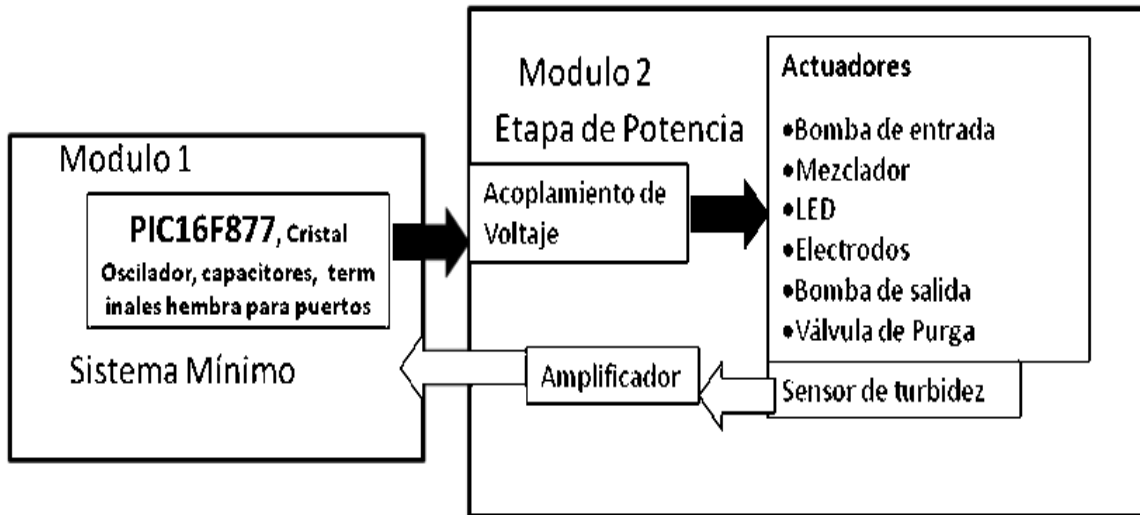


Figura 11. Diagrama a bloques del circuito electrónico.

En el puerto C se asignaron los actuadores, cada terminal del puerto va conectada módulo de potencia para activar a su respectivo relevador, el módulo como tiene como entrada al integrado ULN2803 figura 12, tiene ocho transistores NPN tipo darlington conectados internamente a tierra, es ideal para conectar niveles de voltaje bajo como microcontroladores, compuertas digitales a dispositivos de alta corriente/voltaje como lámparas, relevadores, etc.

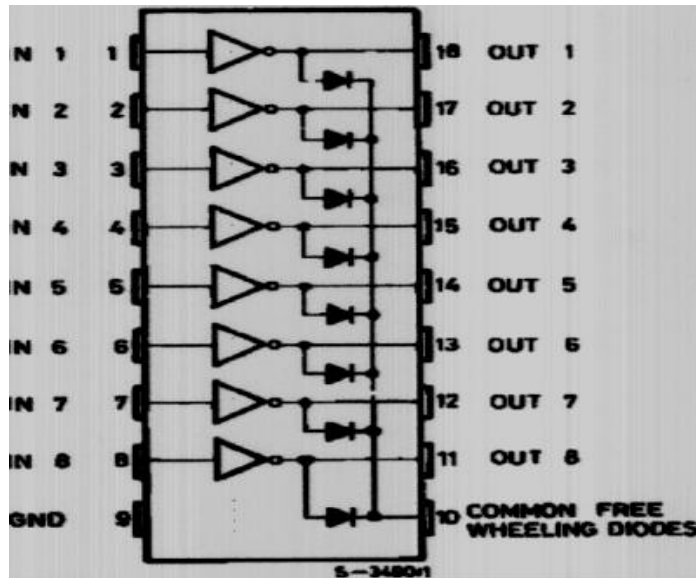


Figura 12. Integrado ULN2803.

La conexión de los transistores es en colector abierto y además de un diodo de retroalimentación para suprimir el ruido de las cargas figura 13.

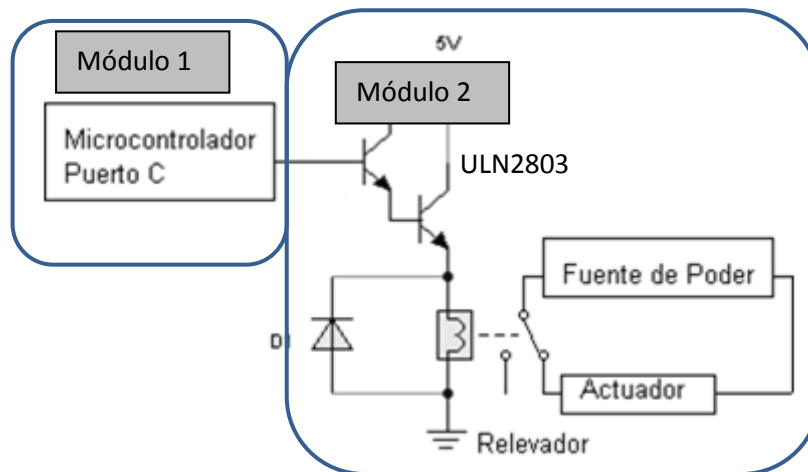


Figura 13. Circuito de acoplamiento conectado al puerto C para activar el actuador.

Esta configuración se utilizó para la bomba de agua que se utiliza para llenar el depósito, la electro válvula para sacar los lodos al finalizar el proceso, una bomba de VCD que extrae el agua del depósito, además de dos motores desalineados para hacer vibrar a los electrodos para remover las burbujas de ellos, la activación de los electrodos y por ultimo al un motor de VCD acoplado a un agitador.

El circuito del sensor de turbidez va conectado un amplificador operacional no inversor con una ganancia de 5, porque la señal se encuentra en el rango de 0.20V a 0.30V, figura 14.

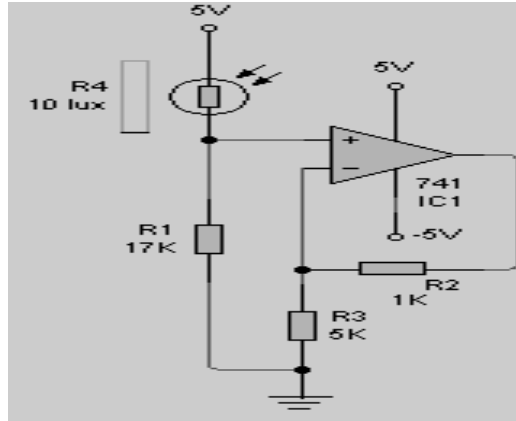


Figura 14. Amplificador no inversor.

El puerto A del microcontrolador, internamente tiene 8 canales ADC de 10 bits, el canal 0 del puerto se conecto al divisor de voltaje proveniente del amplificador, como se muestra en la figura 15.

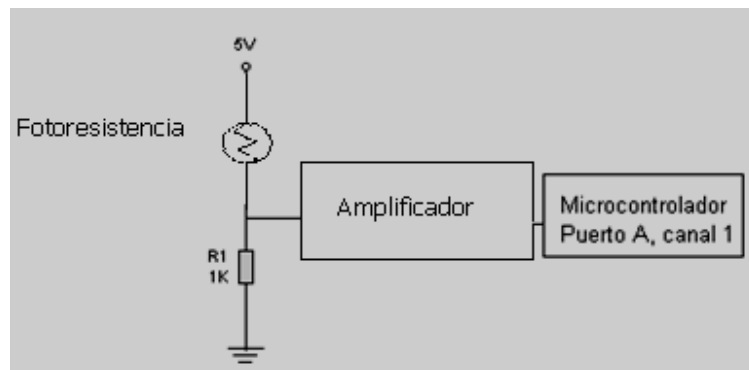


Figura 15. Circuito de la fotorresistencia y amplificador al microcontrolador.

La reacción hace que disminuya la conductividad del agua, al suministrar un voltaje de alimentación constante se afecta a la corriente suministrada, disminuyéndola con el paso del tiempo. Para evitarla se colocó un regulador de corriente para mantener la corriente constante en los electrodos, a pesar de la conductividad del agua. Se utilizó el integrado LM317 con la configuración de corriente constante como se muestra en la figura 16.

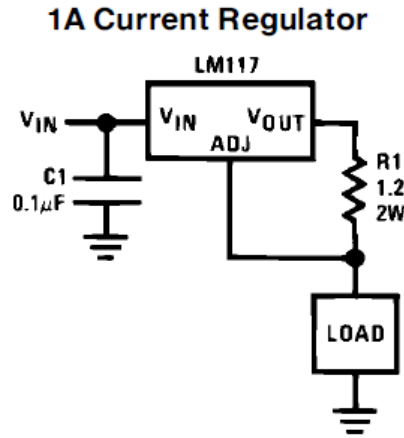


Figura 16. LM317 en configuración de corriente constante.

Debido a que existe variación en la conductividad, realizamos varias pruebas para comprobar su linealidad, al colocarle diferentes valores de resistencia como carga desde 1.7Ω a 17Ω . Una gráfica para tener una mejor visualización se muestra en la figura 17.

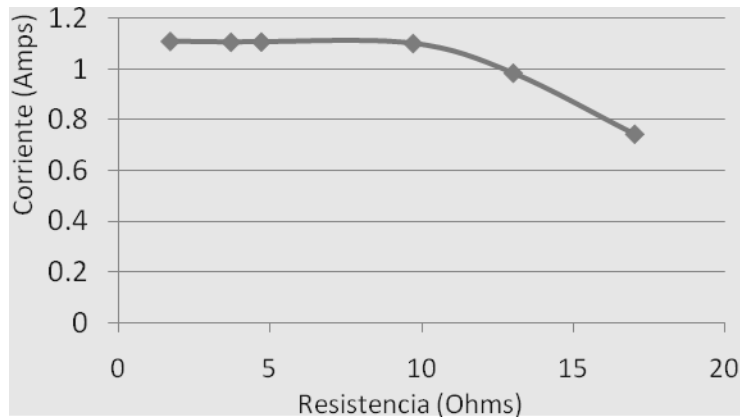


Figura 17. Linealidad de circuito regulador.

CAPÍTULO 4

4. Resultados.

4.1 Resultado.

Una vez construido y probado el sistema de control, éste se conecta a los actuadores y sensores del reactor y al regulador de voltaje variable que suministra la corriente a los electrodos.

El sistema de control es energizado por una fuente de voltaje de 5V, que también energiza algunos actuadores.

En base al diseño que se propuso en el desarrollo, se construyó el tanque y se colocaron los componentes como lo muestra la figura 18, en ella se puede apreciar la bomba de salida y los flotadores hechos de cubos de material unicel.

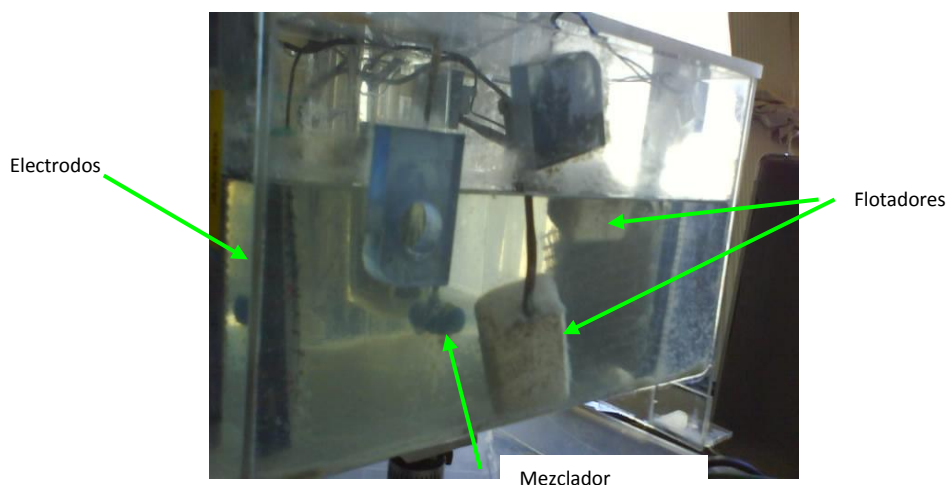
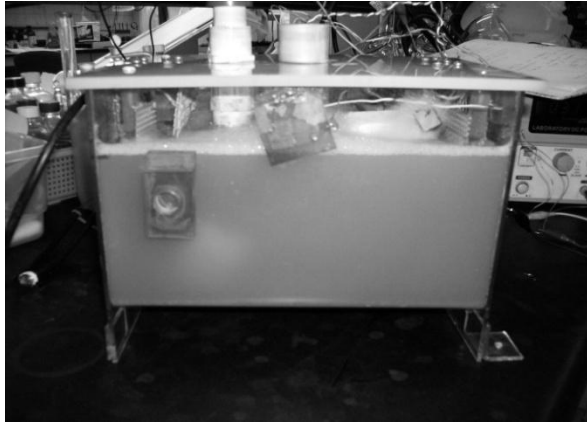
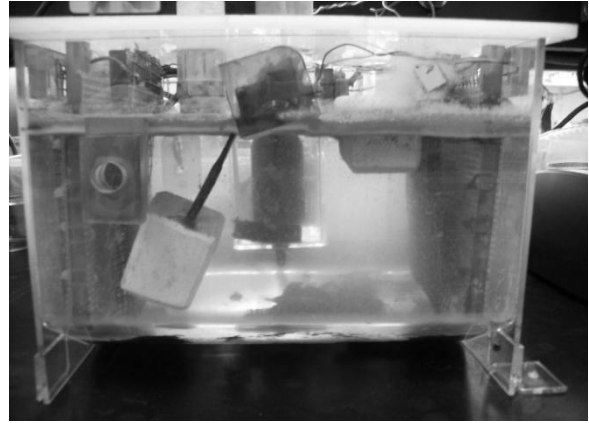


Figura 18. Tanque y sus componentes.

En la figura 19, se aprecian fotos del agua tratada con el reactor; el agua sin tratar tiene una turbidez aproximada de 800 FAU (unidad de turbidez). Aproximadamente a los 45 minutos de inicio del proceso, el sensor de turbidez mide 42 FAU, figura 19b, por lo que termina el tratamiento. La espuma en la parte superior son los sólidos suspendidos por el gas hidrógeno y en el fondo se encuentran los lodos.



a)



b)

Figura 19 a) Se muestra el agua sin tratar y b) Se muestra el agua tratada después de 45 minutos.

4.2 Análisis de parámetros.

Para comprobar la calidad del agua después del tratamiento, se realizó el análisis de ph, turbidez y DQO, que son los parámetros más importantes para el tratamiento de aguas. Se tomaron 5 muestras de agua tratada, con un intervalo de 15 minutos cada una, con el objetivo de observar el desarrollo del proceso con respecto al tiempo, se tomó la primera muestra en el tiempo cero, se dio tratamiento al agua durante 1 hora, pero en el reactor se observó una turbidez óptima a los 45 minutos. Una vez analizadas las muestras se colocaron los resultados en una tabla y se graficaron.

Comportamiento del ph.- En la figura 20 se muestra la gráfica del ph con respecto al tiempo, se puede observar que no hubo gran alteración con respecto al agua inicial, ya que la gran mayoría de los iones hidroxilos producidos en el cátodo fueron utilizados por el ion de Al^{3+} para la generación del coagulante, por lo que no es alterado el nivel de hidrógeno del agua.

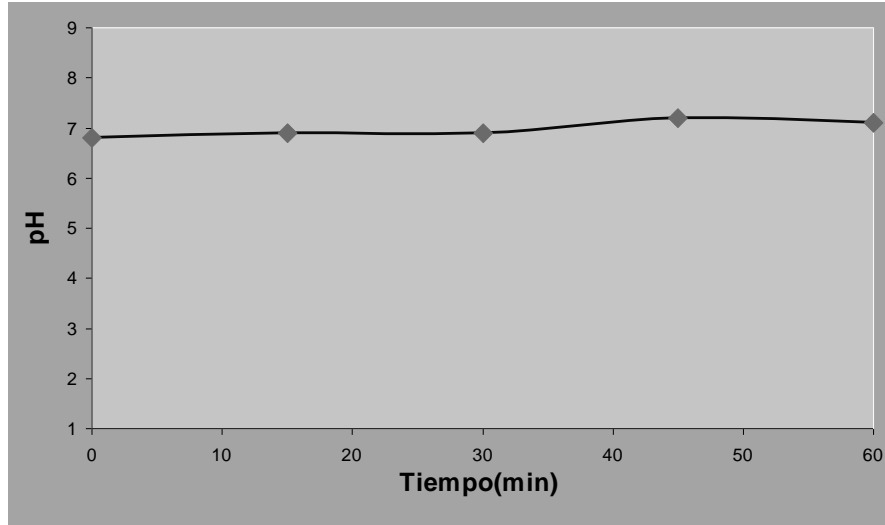


Figura 20 Comportamiento del ph con respecto al tiempo.

Turbidez.- En la figura 21, se muestra la turbidez con respecto al tiempo, al inicio del tratamiento y hasta los 15 minutos se aprecia una pendiente que se atribuye a la generación de coagulante, después se aprecia una pendiente más inclinada debido a la previa generación de coagulante. A partir de los 30 minutos se aprecia una leve disminución de turbidez debido a que ya no se encuentra gran cantidad de sólidos suspendidos en el agua, la turbidez medida en este tiempo es de 45 FAU.

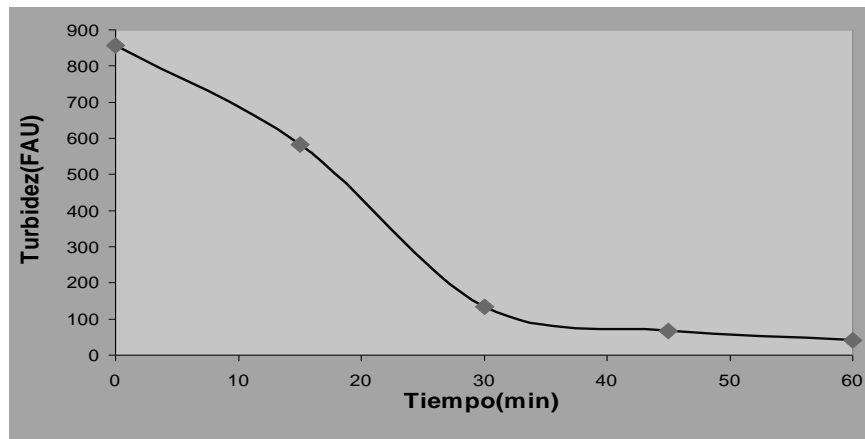


Figura 21 Gráfica de turbidez con respecto al tiempo.

Demanda química de oxígeno, DQO. Los resultados se muestran en la figura 22, donde se aprecia que a los treinta el minutos existe una gran disminución en la oxidación de la materia orgánica, después de ese punto se observa una pequeña

disminución, se atribuye a que la mayor parte de los contaminantes fueron oxidados en los primeros treinta minutos.

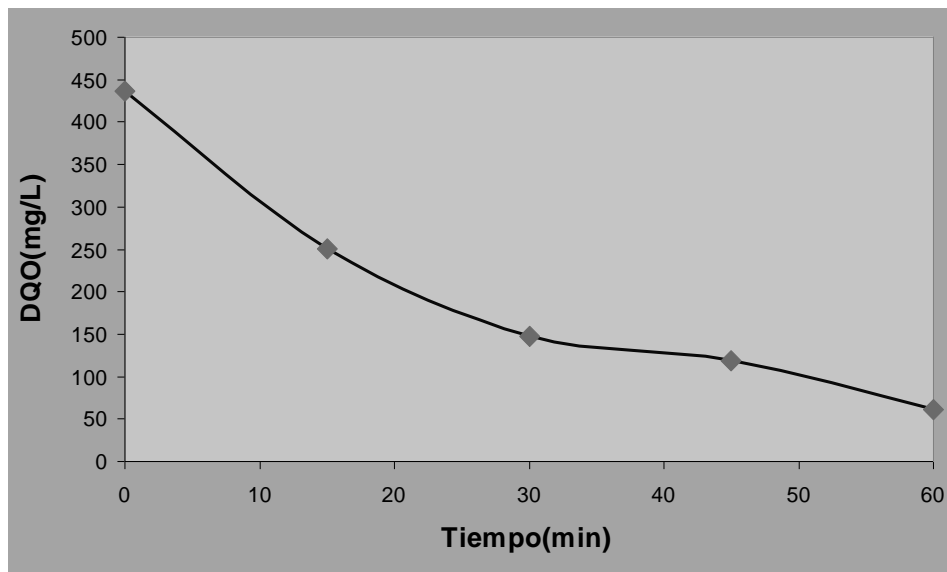


Figura 22 Demanda química de oxígeno con respecto al tiempo.

El diseño y funcionamiento del sistema inmerso para controlar el reactor electroquímico, tuvo éxito en su aplicación.

El diseño del sistema cumple con los parámetros de calidad del agua, debido a los resultados obtenidos del análisis de ph, turbidez y demanda química de oxígeno, con esto se comprueba la remoción de los sólidos disueltos y funcionamiento de la electrocoagulación.

CONCLUSIONES

Algunas de las principales características que debe contar nuestro sistema inmerso es la opción de ampliarse en forma modular, esto quiere decir que podemos modificar a nuestro sistema original al agregar diferentes módulos de propósito específico utilizando la comunicación serial, por ejemplo una tarjeta de circuito impreso donde este únicamente un microcontrolador dedicado a la lectura del sensor y se comunique de forma serial a microcontrolador principal, con el propósito de agilizar el remplazado del microcontrolador en caso de una falla catastrófica o actualización.

Otra característica del sistema es la modularidad de los sensores que se pueden implementar en nuestro sistema, es adaptable para sensor tipo ph, conductividad, turbidez, etc. Debido al microcontrolador que ha sido seleccionado, tiene puertos disponibles y comunicación serial.

Para el diseño del prototipo del sensor de turbidez fue necesario entender el método de reflexión y realizar método de experimentación, amplificar la señal del sensor, y al medir la señal, la resolución del convertidor analógico-digital debe tener una amplia resolución y una etapa de filtración de ruido.

En la etapa de potencia, la corriente para los electrodos, es importante mantenerla constante para que la reacción sea uniforme.

El método de electrocoagulación-floculación es sencillo de controlar, monitorear, y no requiere de agentes químico. Aun que para lograr su aplicación fue necesario realizar mucha investigación y entendimiento del proceso.

La reacción electroquímica del reactor cumple con los parámetros de calidad del agua, debido a los resultados obtenidos del análisis de ph, turbidez y demanda química de oxígeno, con ellos se comprueban la remoción de los sólidos disueltos y funcionamiento de la electrocoagulación.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

1. Un primer curso de ingeniería electroquímica.
Autor: Frank Walsh
Editorial: club universitario
2. Calidad del agua.
Autor: Jairo Alberto Romero Rojas
Editorial: Alfa – omega

FUENTES DE INTERNET

1. <http://www.cofepris.gob.mx/mj/documentos/nom2.htm>
2. <http://www.angelfire.com/me2/ciberquimia/electrolisis.html>
3. www.ucol.mx/.../normas_semarnat/NOM_001-1996-semarnat.pdf
4. <http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/LSED/2002-03/Micros/downloads/trabajo.pdf>
5. <http://www.monografias.com/trabajos-ppt/tutorial-isis-proteus/tutorial-isis-proteus.shtml>
6. <http://electronicautil.blogspot.com/2008/06/livewire-y-pcbwizard.html>
7. http://www.cursos.ucv.cl/eie48700/referencias/CCS_C_Manual.pdf

ANEXO I

Construcción de la tarjeta prototipo.

Para la construcción de la tarjeta prototipo, se utilizó el programa PCB Wizard, con los circuitos integrados mencionados previamente, la tarjeta resultante se muestra en la figura 23.

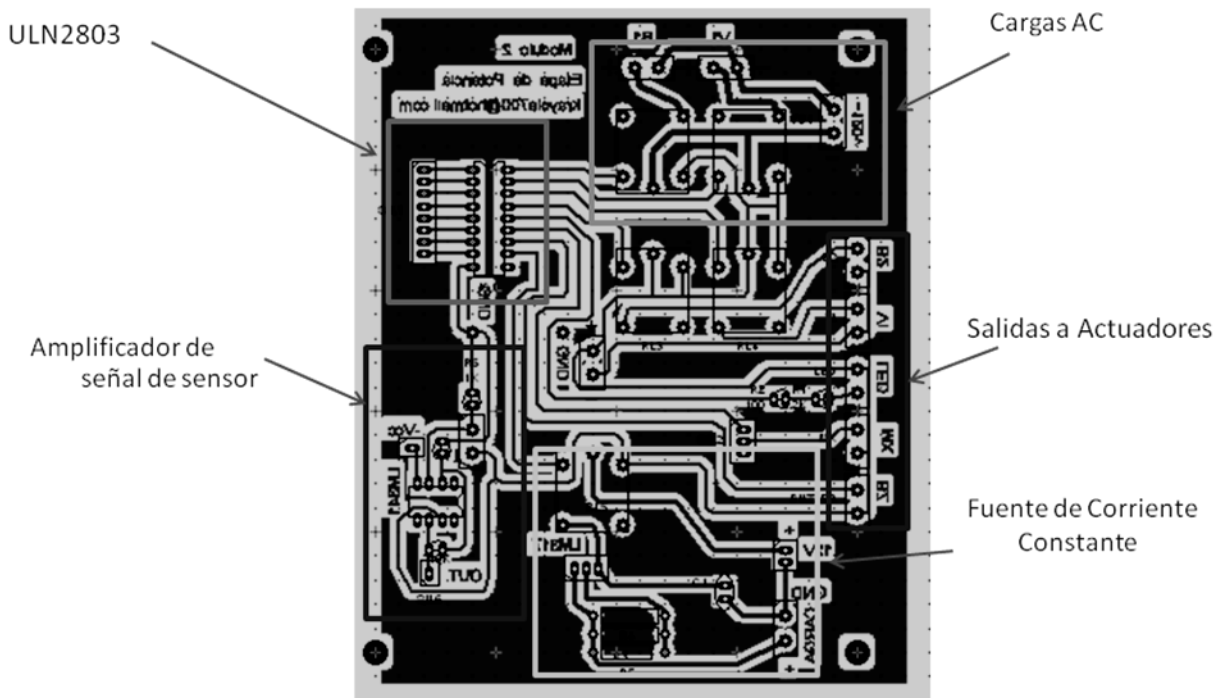


Figura 23. Tarjeta módulo de potencia.

En la parte superior derecha se encuentran los conectores de las cargas de AC y la alimentación. Del lado izquierdo superior está el conector para enlazar el módulo principal, las cuales van conectadas a las entradas del integrado ULN2803, en la parte inferior izquierda se colocó el amplificador operacional, en la parte inferior derecha el circuito regulador de corriente para los electrodos. A la derecha de la tarjeta se colocaron los conectores de los actuadores. Con este diseño se genera el dibujo de las pistas del circuito impreso, figura 24. Además de una vista previa de la tarjeta con los dispositivos distribuidos, figura 25.

fotosensible en pliego de papel y solo se cortar un pedazo según nuestras necesidades.



Figura 26 Resina fotosensible.

Sobre el acetato y la tarjeta se coloca una placa de vidrio o material transparente, para exponerlos a la luz del día o a luz fluorescente, con el propósito de transportar el circuito del acetato a la tarjeta PCB, el siguiente paso es revelar la PCB, para ello se sumerge en la solución de revelado, el cual remueve la resina figura 27 y deja expuestas las pistas del circuito impreso figura 28.



Figura 27 Removedor de resina.

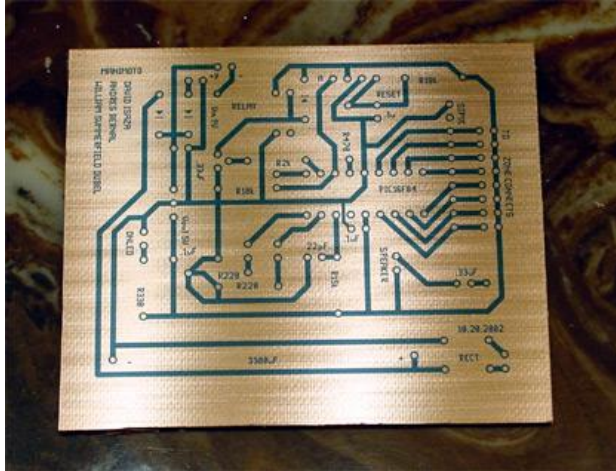


Figura 28. Grabación de circuito impreso en tarjeta de cobre.

Para finalizar se limpia la tarjeta con agua, y se sumerge en ácido férrico, para eliminar el exceso de cobre, dejando solamente las pistas del circuito. El siguiente paso es colocar los componentes electrónicos en su lugar y soldarlos. Como muestra la figura 29.



Figura 29. Tarjeta con componentes.

ANEXO II

Pruebas de sensores.

Con la tarjeta terminada y el programa anteriormente mencionado se realizaron varias pruebas para seleccionar los transductores óptimos para el proceso, al medir su variación de voltaje con respecto a la turbidez. Se utilizaron 4 muestras de agua, con diferente dosis de turbidez figura 30, para realizar la prueba de los transductores.



Figura 30. Muestras de agua con diferente dosis de turbidez.

Existen distintos dispositivos utilizados como transmisores, para la aplicación utilizaremos los siguientes:

- Led azul ultra brillante
- Laser rojo
- Led infrarrojo

Y como receptores utilizamos:

- Fotorresistencia
- Fototransistor
- Fototransistor con filtro IR

Los resultados de las pruebas son los siguientes:

- La combinación láser y fotorresistencia no funcionó, lo mismo con el fototransistor.
- La combinación del led y fototransistor, tampoco funcionó para la reflexión.

Al utilizar el fototransistor y led infrarrojo se obtuvo variación en la señal, como se muestra en la gráfica de la figura 31a.

Con la combinación del led ultra brillante y la fotorresistencia se obtuvo una variación de voltaje con respecto a la turbidez, como se muestra en la figura 31b, al comparar las gráficas se observa que la reacción es más lenta. A partir de las observaciones de las gráficas seleccionamos como sensor el fototransistor y el led infrarrojo ya que tiene una respuesta más rápida. El sensor prototipo se colocó parte externa de una cara del reactor, para obtener la medición de la turbidez del agua.

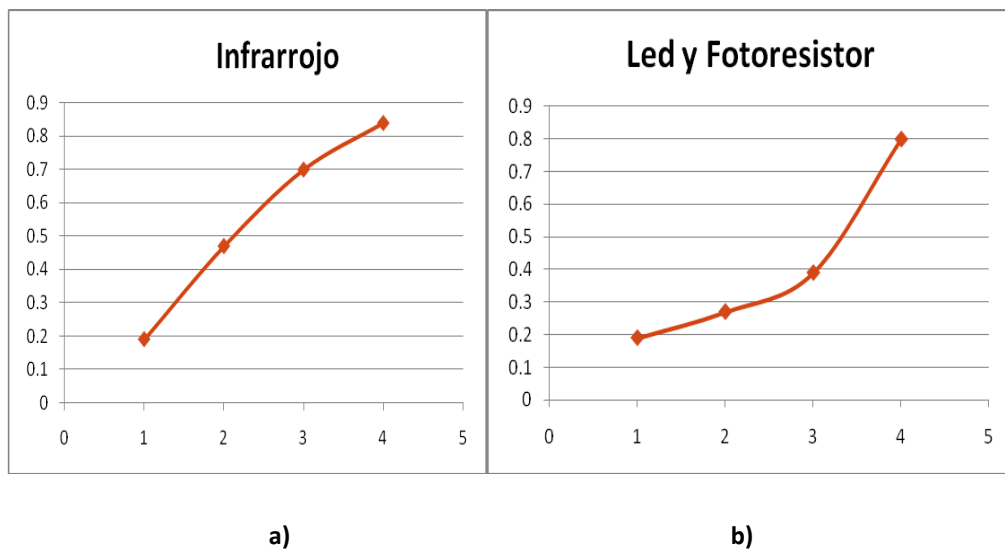


Figura 31. a) Señal que se obtuvo del fototransistor y led infrarrojo b) Señal que se obtuvo del led ultra brillante y fotorresistencia.