

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**MARTIN ADOLFO PAPALEO TAMAYO
STEPHEN ENRIQUE RODRÍGUEZ**



**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA CALI
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2011**

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**MARTIN ADOLFO PAPALEO TAMAYO
STEPHEN ENRIQUE RODRÍGUEZ**

**Proyecto de grado para obtener el título de: INGENIERO
ELECTRÓNICO**

**Director
Ing. HELMER MUÑOZ**



**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA CALI
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2011**

Este trabajo de grado, en la modalidad de Proyecto de investigación, es aceptado como uno de los requisitos para obtener el título de Ingeniero Electrónico en la Universidad de San Buenaventura Cali.

Ing. Helmer Muñoz Valderrama

[Nombres, apellidos y título académico ó cargo del jurado]

[Nombres, apellidos y título académico ó cargo del jurado]

Santiago de Cali, 9 de Junio del 2011

DEDICATORIA

*El trabajo invertido se lo dedico
a mi MAMÁ que vivió el inicio
de este proyecto pero falleció
antes de su culminación.
A mi papá por su apoyo.*

Stephen Enrique Rodríguez Ortegaón

*Dedico este proyecto a mis padres William Rafael
Y Clara Inés Tamayo por el apoyo que me
Brindaron en toda mi carrera. También a mi
Abuelo Martín Tamayo y a mi Tío Edisson Tamayo
Que fueron unos ejemplos a seguir en mi vida.
Y al resto de mi familia que de una u otra
forma intervinieron para alcanzar esta meta.
A todos les digo MUCHAS GRACIAS*

Martin Adolfo Papaleo Tamayo

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto de grado desean expresar un agradecimiento a las siguientes personas que colaboraron durante todo el proceso de elaboración, revisión y culminación de este trabajo:

A nuestro asesor el Ingeniero Helmer Muñoz Valderrama por el apoyo, colaboración y dedicación prestados durante el desarrollo de este proyecto.

A los profesores Ing. Juan Carlos Cruz, Ing. Erika Sarria, Ing. Carlos Héctor y el Ing. Carlos Porras por brindarnos en algún momento su colaboración para desarrollar este proyecto.

Igualmente a todos los profesores con los cuales interactuamos en algún momento de nuestra carrera, gracias por brindarnos sus conocimientos.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCION	18
1.1	OBJETIVOS	19
1.2	OBJETIVO GENERAL	19
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.4	METODOLOGÍA	19
1.5	ALCANCE DEL PROYECTO	19
2.	DESARROLLO DEL MODELO	21
2.1	TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	21
2.2	PARTÍCULAS COLOIDALES	21
	2.2.1 Potencial Zeta	23
	2.2.2 Modelo de la doble capa	23
2.3	COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN	24
	2.3.1 REACTIVOS COAGULANTES Y FLOCULANTES MAS COMUNES	26
2.4	ELECTROCOAGULACIÓN	27
	2.4.1 Tipos De Reactores Para Electrocoagulación	28
	2.4.2 Justificación teórica	29
2.5	FUNDAMENTO ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS	29
	2.5.1 Alimentación (Sistemas De Tensión)	29
	2.5.2 Fuentes de DC para Circuitos	31
	2.5.3 Medición de Corriente	31
	2.5.4 Tiristores (SCR)	35
	2.5.5 Puente Rectificador Controlado Monofásico	40
	2.5.6 Aplicaciones Microcontroladas (PIC)	41
3.	MODELO TEÓRICO	468
3.1	ALIMENTACIÓN	48
	3.1.1 Alimentación Bifilar	48
	3.1.2 Transformador 220 V a 12 V	48
	3.1.3 Fuente De Corriente Directa	48
3.2	PROCESO	50

3.3	RECTIFICACIÓN Y DISPARO	52
3.3.1	Puente regulado	52
3.3.2	Inversor de polaridad	55
3.4	ADQUISICIÓN Y ADECUACIÓN DE SEÑAL	57
3.4.1	Lectura De Corriente	57
3.4.2	Amplificación de Señal con Amplificador Operacional	58
3.4.3	Rectificador De Precisión	59
3.5	CONTROLADOR	62
3.5.1	Detección De Cruce Por Cero	62
3.5.2	Unidad De Control	62
3.5.3	Teclado	66
3.5.4	Display	67
4.	DESARROLLO DEL MODELO	69
4.1	ALIMENTACIÓN	69
4.3	RECTIFICACIÓN Y DISPARO	70
4.4	ADQUISICIÓN Y ADECUACIÓN DE SEÑAL	73
4.4.1	Lectura de corriente	73
4.4.2	Amplificación de Señal con Amplificador Operacional	75
4.4.3	Rectificador De Precisión	76
4.5.1	Detección De Cruce Por Cero	84
4.5.2	Aplicación microcontrolada	87
5.	CONCLUSIONES	94
	BIBLIOGRAFIA	97
	ANEXOS	100

LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1.</i> Etapas de tratamiento de aguas residuales _____	21
<i>Ilustración 2.</i> Etapas de tratamiento de aguas residuales _____	22
<i>Ilustración 3.</i> Las partículas cargadas se repelen entre sí _____	22
<i>Ilustración 4.</i> Las partículas con carga reducida o eliminada se aglomeran para sedimentarse _____	23
<i>Ilustración 5.</i> Capa difusa _____	23
<i>Ilustración 6.</i> Desestabilización del coloide y compresión de la capa difusa (procesos de depuración) _____	25
<i>Ilustración 7.</i> Fuerza de atracción y repulsión (desestabilización). _____	26
<i>Ilustración 8.</i> Diagrama esquemático de una celda de electrocoagulación de dos electrodos _____	28
<i>Ilustración 9.</i> Clasificación de sistemas de reactores de electrocoagulación. _____	28
<i>Ilustración 10.</i> Generador trifásico _____	30
<i>Ilustración 11.</i> Sumatoria de dos fases _____	30
<i>Ilustración 12.</i> Esquema fuente de alimentación DC. _____	31
<i>Ilustración 13.</i> Medición de corriente con resistencia Shunt _____	32
<i>Ilustración 14.</i> Medición de corriente con transformador tipo ventana. _____	32
<i>Ilustración 15.</i> Representación de las corrientes _____	33
<i>Ilustración 16.</i> Rectificador de precisión para entradas positivas _____	34
<i>Ilustración 17.</i> Rectificador de precisión para entradas negativas _____	34
<i>Ilustración 18.</i> Filtro activo Sallen-Key _____	35
<i>Ilustración 19.</i> Representación gráfica del tiristor _____	35
<i>Ilustración 20.</i> Curva característica del funcionamiento del tiristor _____	36
<i>Ilustración 21.</i> Efectos de la corriente de compuerta sobre el voltaje de bloqueo en sentido directo _____	37
<i>Ilustración 22.</i> Convertidor monofásico de tiristor con carga resistiva. (a) Izquierda, (b) derecha. _____	37
<i>Ilustración 23.</i> Disparo del tiristor en $\pi/2$ _____	38
<i>Ilustración 24.</i> Aislamiento por transformador de pulso con lógica AND _____	39
<i>Ilustración 25.</i> Circuito de protección de compuerta _____	39
<i>Ilustración 26.</i> Red Snubber _____	40
<i>Ilustración 27.</i> Puente rectificador controlado de onda completa _____	40
<i>Ilustración 28.</i> Representación de la potencia entregada _____	41
<i>Ilustración 29.</i> Partes principales de un microcontrolador _____	42
<i>Ilustración 30.</i> Relación entre ALU, registro W y memoria de datos en PIC _____	43
<i>Ilustración 31.</i> Diagrama de bloques de Microcontrolador _____	43
<i>Ilustración 32.</i> Señal análoga digitalizada _____	44
<i>Ilustración 33.</i> Aplicación microcontrolada _____	44
<i>Ilustración 34.</i> Diagrama de bloques general del proyecto _____	46
<i>Ilustración 35.</i> Diagrama de bloques específico del proyecto _____	47
<i>Ilustración 36.</i> Transformador de 220 V a 12 V _____	48
<i>Ilustración 37.</i> Fuente de corriente directa _____	49
<i>Ilustración 38.</i> Medición de los voltajes de salida de la fuente de corriente directa diseñada _____	50
<i>Ilustración 39.</i> Diseño del tanque _____	52
<i>Ilustración 40.</i> Configuración de los disipadores en los tiristores _____	53
<i>Ilustración 41.</i> Circuito de disparo _____	54
<i>Ilustración 42.</i> Red Snubber _____	55
<i>Ilustración 43.</i> Circuito de inversión _____	56
<i>Ilustración 44.</i> Diagrama de tiempo _____	56
<i>Ilustración 45.</i> Esquema de la etapa de rectificación y disparo _____	57
<i>Ilustración 46.</i> Forma de conexión de transformadores de medida _____	58

<i>Ilustración 47. Circuito del amplificador inversor</i>	59
<i>Ilustración 48. Rectificador de precisión</i>	60
<i>Ilustración 49. Circuito diseñado del rectificador de precisión</i>	61
<i>Ilustración 50. Esquema de la etapa de adquisición y adecuación de señal</i>	61
<i>Ilustración 51. Circuito de detección de cruce por cero</i>	62
<i>Ilustración 52. División simétrica de voltajes en señal analógica</i>	64
<i>Ilustración 53. Diagrama de bloques de disparo de Puente Controlado</i>	65
<i>Ilustración 54. Esquema de entradas y salidas del PIC</i>	66
<i>Ilustración 55. Pulsadores como entradas al PIC.</i>	67
<i>Ilustración 56. Esquema de conexión de display LCD para un PIC</i>	68
<i>Ilustración 57. Diseño final de la fuente de alimentación.</i>	69
<i>Ilustración 58. Esquema de cortes para el tanque de acrílico</i>	70
<i>Ilustración 59. Circuito de rectificación y disparo</i>	71
<i>Ilustración 60. Disparo de un tiristor con generador de pulsos</i>	71
<i>Ilustración 61. Disparo controlado de dos fases</i>	72
<i>Ilustración 62. Relación de corriente entre primario y secundario del transformador de intensidad</i>	74
<i>Ilustración 63. Relación entre corriente en primario y voltaje en secundario con resistencia de 0.1 Ohm</i>	74
<i>Ilustración 64. Circuito de amplificación y simulación</i>	75
<i>Ilustración 65. Linealidad de amplificación de voltajes</i>	76
<i>Ilustración 66. Circuito rectificador de precisión</i>	77
<i>Ilustración 67. Simulación del circuito rectificador de precisión</i>	77
<i>Ilustración 68. Visualización del efecto atenuador en la señal</i>	78
<i>Ilustración 69. Linealidad en rectificación de voltajes</i>	79
<i>Ilustración 70. Simulación de entrada versus salida del filtro</i>	79
<i>Ilustración 71. Circuito propuesto para la etapa de adquisición y adecuación de señal</i>	80
<i>Ilustración 72. Circuito del filtro Sallen Key</i>	80
<i>Ilustración 73. Análisis de frecuencia del filtro Sallen Key</i>	81
<i>Ilustración 74. Entrada y salida del filtro</i>	81
<i>Ilustración 75. Diseño del circuito final para la etapa de adquisición y adecuación de señal</i>	82
<i>Ilustración 76. Relación entre la corriente en el primario y el voltaje de salida del circuito de adquisición y adecuación de señal</i>	83
<i>Ilustración 77. Simulación de la detección del cruce por cero</i>	84
<i>Ilustración 78. Circuito de detección de cruce por cero propuesto</i>	84
<i>Ilustración 79. Prueba del circuito de cruce por cero propuesto inicialmente</i>	85
<i>Ilustración 80. Prueba para la medición del retraso de cruce por cero</i>	85
<i>Ilustración 81. Simulación del circuito de cruce por cero</i>	86
<i>Ilustración 82. Verificación del cruce por cero</i>	87

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Características de los materiales de fabricación del tanque</i>	50
<i>Tabla 2. Comparativa de voltajes medidos y calculados</i>	69
<i>Tabla 3. Valores de voltaje y corriente en diferentes tiempos de disparo</i>	72
<i>Tabla 4. Corriente en el primario y secundario según el número de vueltas</i>	73
<i>Tabla 5. Comparativa de voltajes medidos y calculados</i>	76
<i>Tabla 6. Comparativa de voltajes</i>	78
<i>Tabla 7. Valores obtenidos para el voltaje de salida en la etapa de adecuación y adquisición de señal</i>	83

LISTA DE DIAGRAMAS DE FLUJO

<i>Diagrama de Flujo 1. Ciclo inicial</i>	<i>88</i>
<i>Diagrama de Flujo 2. Ciclo de validación</i>	<i>89</i>
<i>Diagrama de Flujo 3. Ciclo de disparo de los tiristores</i>	<i>90</i>
<i>Diagrama de Flujo 4. Ciclo de inversión de los contactores</i>	<i>90</i>
<i>Diagrama de Flujo 5. Ciclo de las interrupciones</i>	<i>91</i>
<i>Diagrama de Flujo 6. Diagrama de estados de teclados</i>	<i>93</i>

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. ANTECEDENTES DE ELECTROCOAGULACIÓN COMO TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	100
ANEXO 2. INVESTIGACIONES RELACIONADAS CON LA ELECTROCOAGULACIÓN	102
ANEXO 3. DISEÑO PCB PARTE DIGITAL	103
ANEXO 4. SEÑO PCB PARTE ANÁLOGA	104
ANEXO 5. PRINCIPALES OBRAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	105
ANEXO 6.	108
ANEXO 7.	109
ANEXO 8. ESTADÍSTICAS	114
ANEXO 9. PIC 18LF458	115
ANEXO 10. ESQUEPA PARTE DIGITAL	1156
ANEXO 11. ESQUEPA PARTE ANALOGA	1157
ANEXO 12. COSTOS DEL PROYECTO	1158
ANEXO 13. PRUEBAS DEL PROYECTO	1159

GLOSARIO

- **Amplificador Operacional:** Un amplificador operacional (A.O u op.amp) es un circuito electrónico que cuenta dos dos entradas y una salida. Su salida idealmente es la diferencia de sus estradas multiplicada por una ganancia.
- **Contraión:** Un contraión es el ion que acompaña una especie iónica con el fin de mantener la neutralidad eléctrica.
- **DBO:** La demanda biológica de oxígeno (DBO), es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión.
- **Electrodo:** Un electrodo es un conductor utilizado para hacer contacto con una parte *no metálica* de un circuito.
- **Filtro electrónico:** Un filtro electrónico es aquel que es capaz de discriminar alguna frecuencia determinada o gama de frecuencia, de una señal eléctrica que pasa a través de él. Logrando modificar su tanto su fase como su amplitud.
- **Fuerza de Van der Waals:** En química física, la fuerza de van der Waals (o interacción de van der Waals), denominada así en honor al científico neerlandés Johannes Diderik van der Waals, es la fuerza atractiva o repulsiva entre moléculas (o entre partes de una misma molécula).
- **Risc:** En la arquitectura computacional, RISC (del inglés *reduced instruction set computer*) es un tipo de microprocesador con las siguientes características fundamentales:
 1. Instrucciones de tamaño fijo y presentado en un reducido número de formatos.

2. Sólo las instrucciones de carga y almacenamiento acceden a la memoria por datos.

Además estos procesadores suelen disponer de muchos registros de propósito general. El objetivo de diseñar máquinas con esta arquitectura es posibilitar la segmentación y el paralelismo en la ejecución de instrucciones y reducir los accesos a memoria. Las máquinas RISC protagonizan la tendencia actual de construcción de microprocesadores. PowerPC, DEC Alpha, MIPS, ARM, ... son ejemplos de algunos de ellos.

- **Silice:** La sílice es un material muy duro que se encuentra en casi todas las rocas, es un cristal común que se presenta naturalmente. La sílice es el componente principal de la Arena, arenisca, cuarcita, granito, etc.
- **Solubilizar:** Transformar químicamente una sustancia de tal modo de que pase de soluble a insoluble para un solvente dado.

RESUMEN

El desarrollo de procesos novedosos aumenta el espectro de alternativas para la disposición de desechos líquidos urbanos. La coagulación química es un método usual para tratamiento de aguas residuales en el cual se agregan agentes químicos para la desestabilización del equilibrio de sistemas coloidales y la generación de aglomeraciones que se precipitan o flotan. La electrocoagulación intenta reemplazarlo por medio de un proceso electrolítico en el que el coagulante se forma por reacciones de óxido-reducción entre los electrodos y el medio acuoso, activadas por la corriente eléctrica [16].

El electrocoagulador es un tanque de reacción en forma de celda con placas dispuestas paralelamente, el cual funciona como una fuente de corriente ajustada con un *set point* (referencia) por el usuario, al cual se le realiza un control para que mantenga el nivel de corriente aplicada sin importar la conductividad inicial ni las variaciones que presente a medida que avanza el proceso. Se presentan los diseños circuitales, mecánicos y la aplicación microcontrolada. El prototipo de sistema de electrocoagulación posibilita la realización de pruebas que maximicen la rentabilidad para la utilización en diversos sectores.

Palabras clave: Tratamiento de aguas residuales. Electrocoagulación. Electrólisis. Electrodos. Coagulación, Electroflotación.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al aumento de la población mundial y la consecuente disminución del agua potable disponible, la contaminación de los recursos hídricos representa un problema ambiental de alta preocupación en la actualidad [21]. Uno de los mayores problemas es el vertimiento de aguas residuales a los ríos, entendiéndose aguas residuales como aguas contaminadas producto del uso de los afluentes en actividades domésticas o industriales. Sólo en Colombia se calcula que el 9% de las aguas residuales son tratadas [11], y que en los países subdesarrollados un 70% de los desechos industriales se vierten al agua sin tratamiento [32], evidenciando su gran aporte negativo. En 2025, el consumo de agua destinada a uso industrial alcanzará los 1.170 km³/año, cifra que en 1995 se situaba en 752 km³/año. (Ver anexo 1)

La industria es uno de los factores más importantes en el desarrollo de las naciones y también el sector que más indiscriminadamente contamina los recursos hídricos. Es de vital importancia que se tomen medidas para el tratamiento y la reutilización de aguas residuales industriales para contribuir a un uso sostenible de esta, conscientes de su importancia como materia prima crítica para los procesos productivos y como recurso vital para los seres vivos.

La Declaración Ministerial del Tercer Foro Mundial del Agua reunido en Kyoto [15] propuso recaudar fondos siguiendo criterios de recuperación de costes que se adapten a las condiciones climáticas, medioambientales y sociales del lugar, así como el principio de “el contaminador paga”. Como respuesta nacional a estos compromisos, según el decreto 1299 de 2008, en Colombia todas las empresas deben tratar sus aguas residuales antes de ser vertidas a las afluentes [6]. Además existe un estímulo para las empresas que se acogen inmediatamente al decreto, garantizando una disminución de impuestos [12] y evitando multas cuantiosas.

A diferencia de las aguas residuales domésticas, las de procedencia industrial frecuentemente contienen sustancias que no se eliminan por tratamientos convencionales, bien por estar en concentraciones elevadas, o bien por su naturaleza química. Muchos compuestos orgánicos e inorgánicos que se han identificado en aguas residuales industriales son objeto de regulación especial debido a su toxicidad o a los efectos biológicos a largo plazo, razón por la cual el presente trabajo está enfocado en dichos vertimientos. (Ver anexo 2)

Desarrollar sistemas de tratamiento de aguas debe ser una prioridad para revertir o al menos detener la contaminación a corto plazo. Sistemas alternativos como la electrocoagulación surgen como propuestas económicas y ecológicas para dar solución al dilema.

La electroquímica ha resultado como una tecnología emergente capaz de ofrecer aplicaciones industriales con diversas ventajas. La electrocoagulación reemplaza métodos tradicionales como la coagulación química logrando mayor rentabilidad. Aguas residuales de diferentes procesos industriales han sido tratados con este sistema obteniendo respuestas satisfactorias en la eliminación de contaminantes [14], prueba de ello son los estudios realizados en los últimos años. (Véase anexo 3)

Los artículos documentados para este proyecto permiten vislumbrar que los estudios que llevan a cabo los químicos e ingenieros químicos y sanitarios se hacen de manera empírica, con métodos rudimentarios de variación de parámetros o peor aún sin ningún control sobre estos. Un prototipo de sistema de electrocoagulación permite hacer las pruebas necesarias facilitando el control sobre las variables deseadas; para caracterizar los tipos de aguas dependiendo de su procedencia, con el objetivo de minimizar consumo energético y optimizar el tratamiento, logrando hacer aplicable el proceso a gran escala.

La electrocoagulación es un sistema aún no muy desarrollado que ofrece gran ventaja sobre los sistemas físico-químicos ya que no necesita un suministro constante de químicos adicionales al agua contaminada. En todos los casos es posible disminuir la corriente aplicada utilizando parámetros como la conductividad del agua, empleando solo la corriente necesaria en el tiempo prudente y aplicando la alimentación en la rampa adecuada para evitar el esfuerzo en las placas de forma que prolonguen su vida útil. El prototipo de sistema de electrocoagulación provee un medio de pruebas a pequeña escala que permite la adecuación a cada proceso particular. El sistema de control permite obtener el resultado deseado de las variables, de manera precisa y ajustable por el usuario.

1.1 OBJETIVOS

1.2 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo electrónico de pequeña escala para electrocoagulador, con el cual se podrán realizar pruebas que validen el uso de esta tecnología en aguas residuales de diferentes sectores industriales.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar los procesos de coagulación y electrocoagulación en las plantas de tratamiento de aguas.
- Diseñar y especificar el tanque para el electrocoagulador.
- Construir y realizar montaje del electrocoagulador.
- Desarrollar la etapa de potencia para producir el efecto de electrolisis deseado.
- Diseñar una aplicación microcontrolada para el control del electrocoagulador.

1.4 METODOLOGÍA

Para materializar el cumplimiento de estos objetivos, se abordó metodológicamente el proyecto iniciando la recopilación de información y documentación, complementada con la asesoría de algunas personas cercanas al tema. Se elaboró un modelo del sistema a implementar con base en la revisión bibliográfica y los cálculos preliminares para el tanque, la unidad de potencia y el controlador; lo que permitió seleccionar los aspectos más relevantes a tener en cuenta para el diseño del sistema en general. Se hicieron pruebas independientes de los bloques que componen el sistema y finalmente se realizaron ajustes de desempeño.

1.5 ALCANCE DEL PROYECTO

El prototipo electrónico de electrocoagulador a pequeña escala permite hacer pruebas en un alto rango de valores de corrientes para aguas residuales con variados valores de conductancia reflejados en el nivel de impurezas. Este rango se ha definido según estudios consultados de valores típicos de corriente. El sistema puede manejar corrientes de 0 a 25 A, ajustados como una variable de entrada por medio de pulsadores y visualizado en una pantalla LCD.

Además de esto, se ha visualizado la posibilidad de utilizar comunicación CAN para transmitir la información que recibe el microcontrolador a un equipo de cómputo más avanzado que permita entre otras cosas, analizar estadísticas y

realizar graficas; aunque este es un trabajo aparte de investigación, el microcontrolador utilizado posee ese tipo de comunicación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de aguas residuales se lleva a cabo en varias etapas hasta llegar a la potabilización, utilizando las técnicas más adecuadas dependiendo del tipo de residuos que contengan. Ver Ilustración 1.

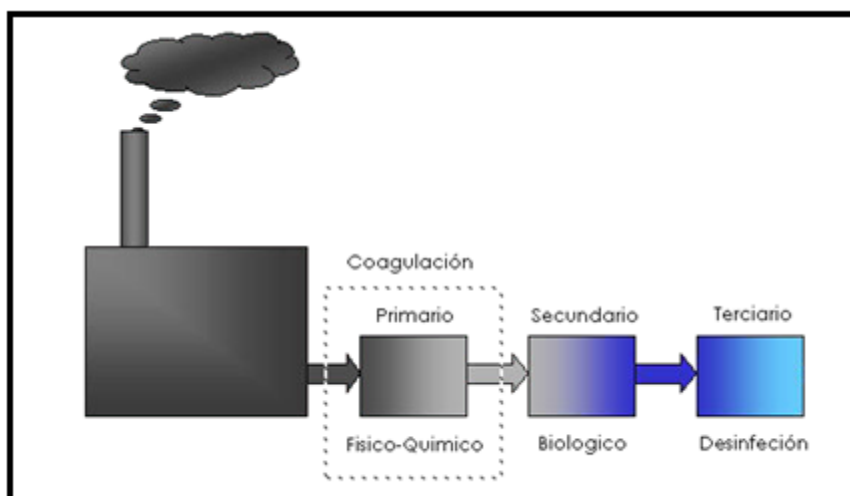


Ilustración 1. Etapas de tratamiento de aguas residuales

El tratamiento primario consiste en procesos físico-químicos para la remoción de partículas suspendidas como coloides, metales, aceites y grasas; en esta se encuentra la coagulación química y por ende la electrocoagulación. El tratamiento secundario se lleva a cabo para la supresión de materia orgánica biodegradable. El tratamiento terciario y desinfección se utilizan para la eliminación de microorganismos patógenos.

2.2 PARTÍCULAS COLOIDALES

En las aguas residuales que contienen arcillas, sílice, hierro, metales pesados, sólidos orgánicos como por ejemplo restos de animales muertos, entre otros; se pueden encontrar especies coloidales.

Se podría decir que el tamaño de los coloides es algo complejo, ya que se encuentran en medio de la solución verdadera y las partículas en suspensión. Se puede apreciar en la Ilustración 2 los límites, estos son aproximados ya que su tamaño lo determina su naturaleza y tamaño de la materia.

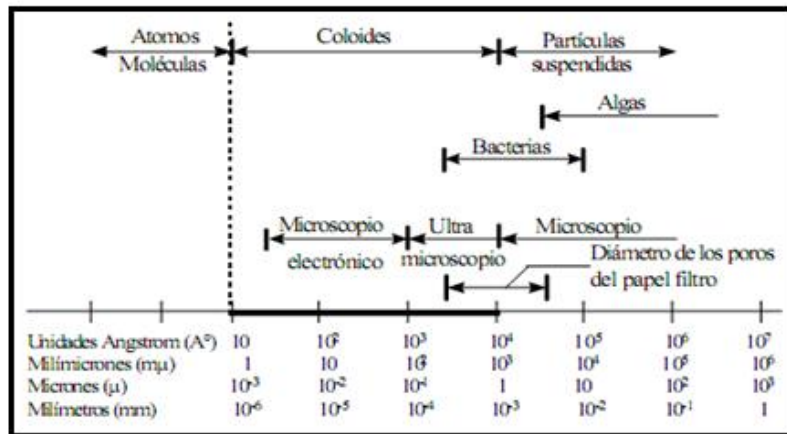


Ilustración 2. Etapas de tratamiento de aguas residuales

Fuente: Arboleda Valencia, Jorge "Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua" pp. 20-43. 1982.

"Por su tamaño microscópico, las fuerzas de unión en la superficie del coloide y el líquido son las que determinan su comportamiento. Uno de los mayores efectos de la superficie son los fenómenos electrocinéticos. Cada coloide tiene una carga eléctrica que suele ser de naturaleza negativa, aunque también puede ser positiva. Estas cargas producen fuerzas de repulsión electrostática entre los coloides vecinos. Si la carga es suficientemente elevada los coloides permanecen discretos, dispersos y en suspensión. Reduciendo o eliminando estas cargas se obtiene el efecto opuesto y los coloides se aglomeran y sedimentan [33]. Ver Ilustración 3 y Ilustración 4."

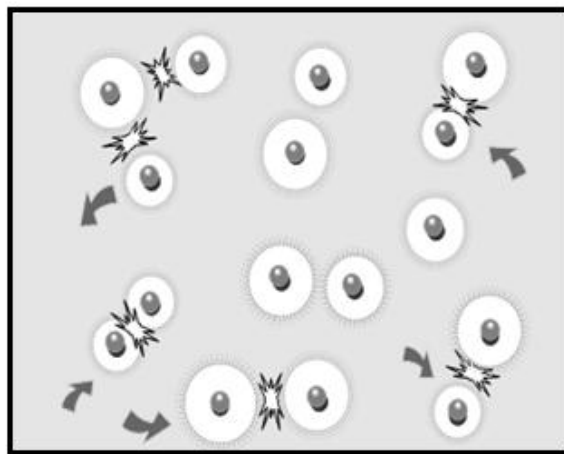


Ilustración 3. Las partículas cargadas se repelen entre sí

Fuente: Zeta-Meter, Inc. "Coagulation & Flocculation". 1993

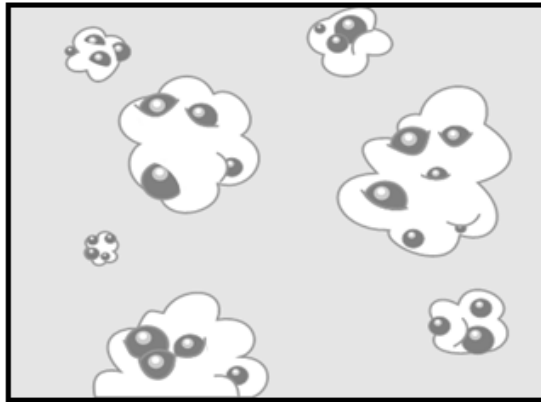


Ilustración 4. Las partículas con carga reducida o eliminada se aglomeran para sedimentarse

Fuente: Zeta-Meter, Inc. "Coagulation & Flocculation". 1993

2.2.1 Potencial Zeta

Es una medida que nos demuestra la estabilidad de una partícula e indica el potencial que es requerido para penetrar la capa de iones próxima a la partícula para desestabilizarla.

2.2.2 Modelo de la doble capa

El modelo de la doble capa es usado para representar la atmósfera iónica en la cercanía del coloide cargado y poder explicar cómo operan las fuerzas eléctricas de repulsión. Se puede entender este modelo como una cadena de etapas que ocurren en el contorno de un coloide negativo, si los iones que neutralizan sus cargas son inesperadamente separados, ver Ilustración 5.

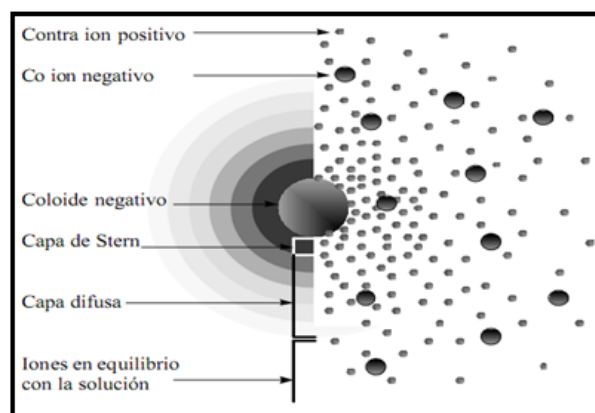


Ilustración 5. Capa difusa

Fuente: Zeta-Meter, Inc. "Coagulation & Flocculation". 1993

En el lado izquierdo de la gráfica se puede apreciar el cambio de densidad de carga alrededor del coloide. En el lado derecho se aprecia la distribución de los iones de carga positiva y negativa rodeando el coloide cargado.

La capa de Stern, es también conocida como la capa de contraiones; esto quiere decir que la atracción del coloide negativo hace que ciertos iones positivos formen una rígida capa contigua en el contorno de la superficie coloidal.

La capa difusa, es aquella donde se presenta una pérdida de iones negativos (coiones). Su agrupación se ve aumentada progresivamente al alejarse del coloide, mientras que por otro lado las fuerzas repulsivas del coloide son compensadas por los iones positivos, hasta lograr de nuevo el equilibrio. Esta capa puede ser representada como una atmosfera cargada encerrando al coloide. La densidad de carga es muy superior cerca del coloide y lentamente disminuye a cero cuando las concentraciones de iones positivos y negativos se parecen.

Los contraiones que están en la capa de Stern y la capa difusa, son aquellos que son denominados de *doble capa*. El espesor de la doble capa está limitado por el tipo y concentración de los iones de la solución.

2.3 COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

En distintas cantidades las aguas que son potables o residuales, contienen material suspendido, en estas podemos encontrar sólidos que se logran sedimentar en reposo, o sólidos dispersados que no sedimentan con facilidad. Se debe de tener muy en cuenta que una gran parte de estos sólidos que no se sedimentan con facilidad pueden ser los coloides. Ya que la repulsión impide que las partículas choquen y formen masas de mayor tamaño, a las cuales se les conoce como flóculos, las partículas no sedimentan. Los procedimientos de coagulación y floculación desequilibran los coloides y gracias a esto se puede conseguir la sedimentación. De manera tradicional esto se logra con la adición de agentes químicos y aplicando energía de mezclado.

Es conveniente resaltar las diferencias conceptuales entre los términos de coagulación y floculación, ya que se suele entrar en una confusión porque ambas operaciones habitualmente se producen de manera simultánea. Para esclarecer las ideas se especificará coagulación como la desestabilización de la suspensión coloidal, por otra parte la floculación se restringe a los fenómenos de transporte de las partículas coaguladas para inducir colisiones entre ellas originando su aglomeración. Por consiguiente se tiene que:

“Coagulación: Desestabilización de un coloide producida por la eliminación de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales, con la formación de núcleos microscópicos [5].”

“Floculación: *Aglomeración de partículas desestabilizadas primero en microflóculos, y más tarde en aglomerados voluminosos llamados flóculos [5].”*

Se puede apreciar en la Ilustración 6 como los coagulantes inhabilitan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide admitiendo la aglomeración y la formación de flóculos. Estos flóculos en un principio son pequeños, pero se empiezan a juntar y llegan al punto de formar aglomerados de mayor tamaño los cuales son capaces de precipitar. Si se busca la formación de comprimidos de mayor tamaño se añade un grupo de productos llamados floculantes. En el momento de que dos partículas semejantes se acercan, sus capas difusas empiezan a generar una fuerza de repulsión, el potencial de repulsión está en función de la distancia que los aparta y cae velozmente con el aumento de iones de carga inversa al de las partículas. Esto es posible conseguirlo solamente con los iones del coagulante (Ilustración 5). Entre las partículas hay un potencia de atracción E_a que es llamado fuerza de Van der Waals. Si hay una distancia superior a L entre las partículas estas no se atraerán, dado que E es la energía que las mantiene apartadas Ilustración 7.

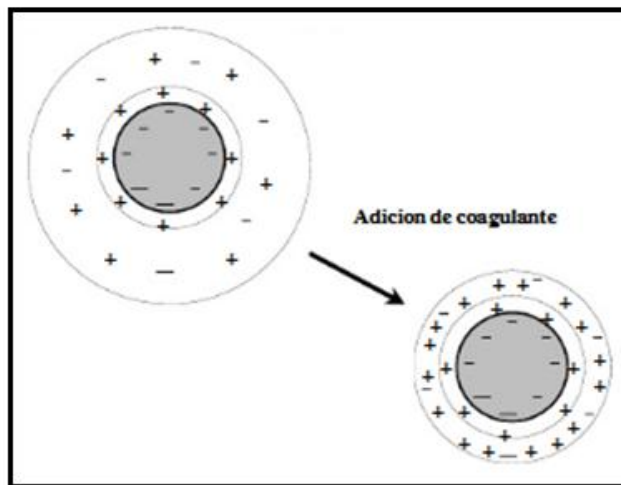


Ilustración 6.Desestabilización del coloide y compresión de la capa difusa (procesos de depuración)

Fuente: Procesos De Depuración De Aguas Residuales 2009-2010. TEMA 5, Pág. 12. [En línea]. [Consultado 22 Agosto 2010]. Disponible en internet: <http://www.scribd.com/doc/25943804/Coloides-Soluciones-y-Emulsiones>

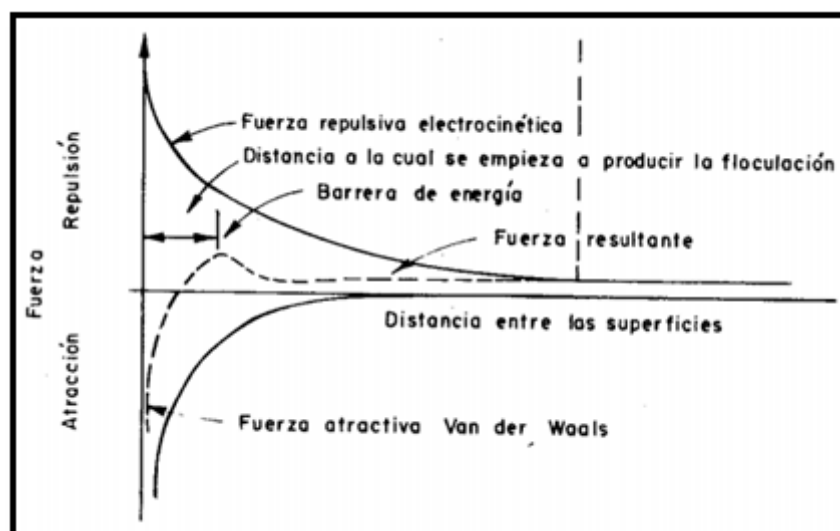


Ilustración 7. Fuerza de atracción y repulsión (desestabilización).

Fuente: Desestabilización de las partículas coloidales, Tema 2, Pág. 39. [En línea]. [Consultado 22 Agosto 2010]. Disponible en internet: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan/002320/002320-02b.pdf>

Podemos hablar de dos etapas donde se ve implicada la precipitación del coloide:

- Desestabilización, esta se basa en la teoría de química coloidal y de superficies.
- Transferencia de núcleos microscópicos para crear agregados espesos, esta teoría se basa en la mecánica de fluidos.

2.3.1 REACTIVOS COAGULANTES Y FLOCULANTES MAS COMUNES

2.3.1.1 Coagulantes Metálicos

Dentro de los coagulantes metálicos se tienen las sales de Aluminio y Hierro, son los más utilizados en los procesos de clarificación, la eliminación del DBO y fosfatos de aguas residuales. Estos tienen una gran ventaja, ya que a la hora de actuar hacen los papeles de coagulantes y floculantes. Pero al tener una gran ventaja también tienen una desventaja es demasiado sensibles a los cambios del pH, ya que la clarificación puede ser mala al no estar en el rango adecuado y esto conllevaría a solubilizar el aluminio y hierro.

A continuación se presentaran los más utilizados:

- Sulfato de Alúmina: comúnmente conocido como alumbre, en intervalos de 6 a 8 pH es efectivo. Origina un floculo de tamaño pequeño y de forma esponjosa, dada estas condiciones no se usa en precipitación previa de

aguas residuales ya que generaría una alta carga contaminante del agua. Su uso está generalizado en el tratamiento de agua potable y en la reducción de fosforo y coloides orgánicos.

- Sulfato Férrico: Es uno de los más conocidos, su estabilidad está en el rango de 4 a 11 pH. Origina flóculos de gran tamaño que se sedimentan con rapidez, es utilizado tanto para la precipitación en aguas industriales y urbanas. Tiene un problema al tratar aguas potables, ya que en algunos casos llega a producir problemas con la coloración.
- Cloruro Férrico: parecido al anterior, pero limitado en su aplicación ya que su rango de pH es más corto.

2.4 ELECTROCOAGULACIÓN

La electrocoagulación es un método electroquímico de tratamiento de aguas contaminadas donde un electrodo de sacrificio se corroe para que se lleve a cabo la coagulación [4].

Ya que la electrocoagulación es un proceso en el cual se ven involucrados fenómenos físicos y mecanismos químicos, es algo complicado. Este proceso implica tres etapas que están seguidas una de la otra:

- Primero, se realiza la formación del coagulante ya que el electrodo de sacrificio empieza su proceso de oxidación electrolítica.
- Segundo, se realiza la desestabilización de los contaminantes.
- Tercero, formación de los flocs.

La formación de los flocs se describe a continuación:

- Se realiza la compresión de la doble capa difusa, ya que los iones necesarios se han generado con la oxidación del ánodo de sacrificio.
- Se reduce la repulsión electrostática entre las partículas y esto ayuda a la coagulación.
- Se forman flóculos gracias al resultado de la coagulación, y estos forman una capa lodosa.

En el caso de la electrocoagulación no se agregan o no se hace uso de sustancias químicas. En la Ilustración 8, se puede apreciar un sistema de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro ya que estos son los más utilizados. El sistema de electrocoagulación ha demostrado que puede manejar una gran variedad de aguas residuales, como: galvanoplásticas, curtimbres, residuos de papeleras, agroindustriales; como también afluentes con contenido de cromo, plomo y mercurio, entre muchas otras clases de agua.

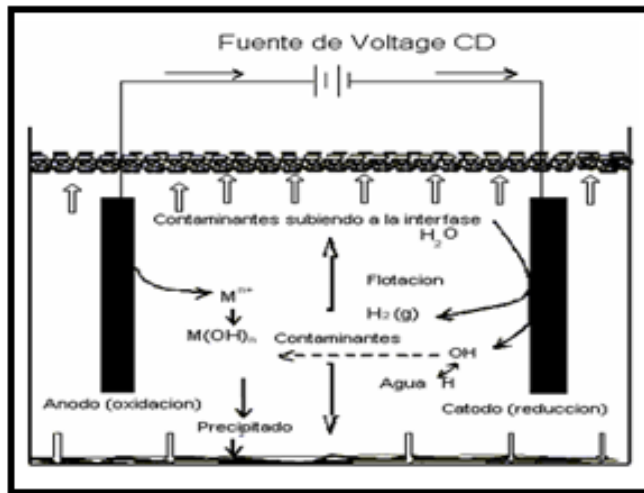


Ilustración 8.Diagrama esquemático de una celda de electrocoagulación de dos electrodos

Fuente: MOLLAH., Mohammad et al. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. En: Journal of Hazardous Materials. Vol. 114, No.1-3 (Oct. 2004); p. 202.

2.4.1 Tipos De Reactores Para Electrocoagulación

Los reactores se pueden clasificar como se muestra en la Ilustración 9. Por lo general los reactores son en flujo continuo, los reactores en tipo Batch trabajan típicamente con un volumen constante por ciclo de tratamiento.

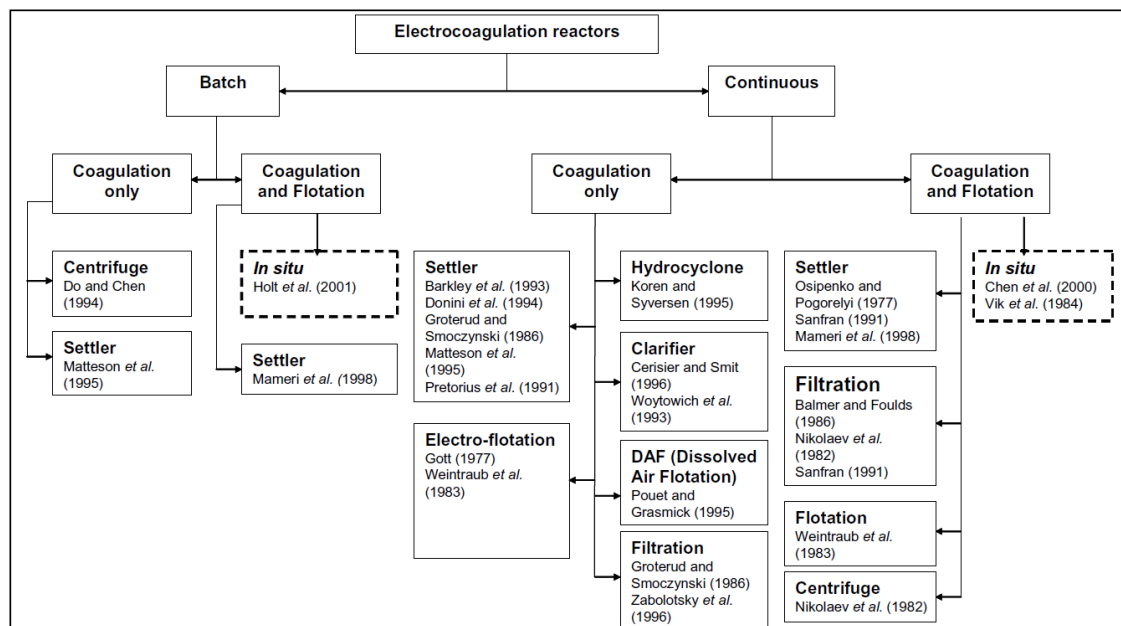


Ilustración 9.Clasificación de sistemas de reactores de electrocoagulación.

Fuente: HOLT, Peter K.; BARTON, Geoffrey W. and MITCHELL, Cynthia A. The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. En: Chemosphere. Vol. 59, No. 3 (Abr. 2005); p. 358.

2.4.2 Justificación teórica

Es de gran importancia aclarar que el agua residual en la celda electrolítica es la solución dieléctrica y está sometida a una electrolisis, pero ya que esta solución contiene sales en disolución esto posibilita la conducción eléctrica. Este modelo se puede considerar a través de la ley de Ohm.

$$V = I \times R$$

Donde:

I: Simboliza la intensidad de la corriente que circula.

R: Simboliza la resistencia que ofrece el electrolito dentro de la celda.

2.5 FUNDAMENTO ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

2.5.1 Alimentación (Sistemas De Tensión)

El electrocoagulador necesita suministrar energía eléctrica a diferentes etapas del sistema. Debido a que el proceso electrolítico requiere altos niveles de potencia, es adecuado utilizar una alimentación con mayor nivel de voltaje para disminuir el rango de corriente. La mayor parte de la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica se efectúa por medio de sistemas trifásicos precisamente porque que proporcionan mayor economía en las líneas debido a que se transporta gran potencia con bajos niveles de corriente. Una fuente trifásica de tensión está constituida por tres fuentes monofásicas de igual valor eficaz pero desfasadas 120° entre ellas.

En una topología de estrella, el sistema trifásico está compuesto por las tres líneas llamadas fases y además un neutro que representa un punto de referencia entre ellas. Entre cada fase y el neutro existen 120V y entre fases existen 208V como se visualiza en la Ilustración 10. Si se desea hacer uso del voltaje entre fases se toma como un sistema monofásico bifilar derivado de un sistema trifásico.

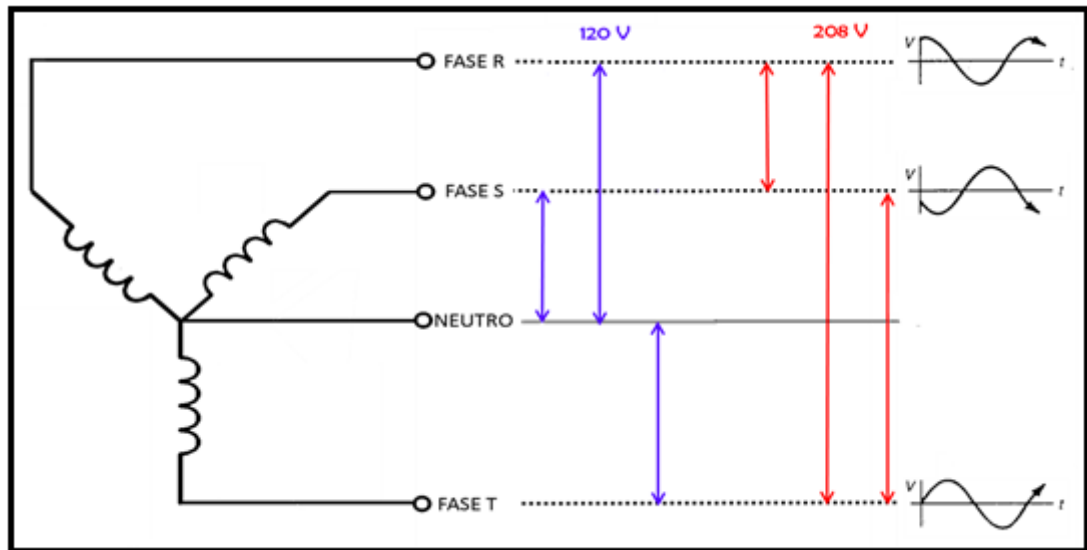


Ilustración 10. Generador trifásico

El voltaje obtenido entre las dos fases de un sistema monofásico bifilar es la suma vectorial de cada una de ellas, dando como resultado una señal con amplitud mayor y un cruce por cero no coincidente con ninguna. En la Ilustración 11 que se encuentra a continuación se puede apreciar la señal en una de las líneas de fase en color rojo y la otra línea de fase en color verde en contraste con la señal resultante en color azul.

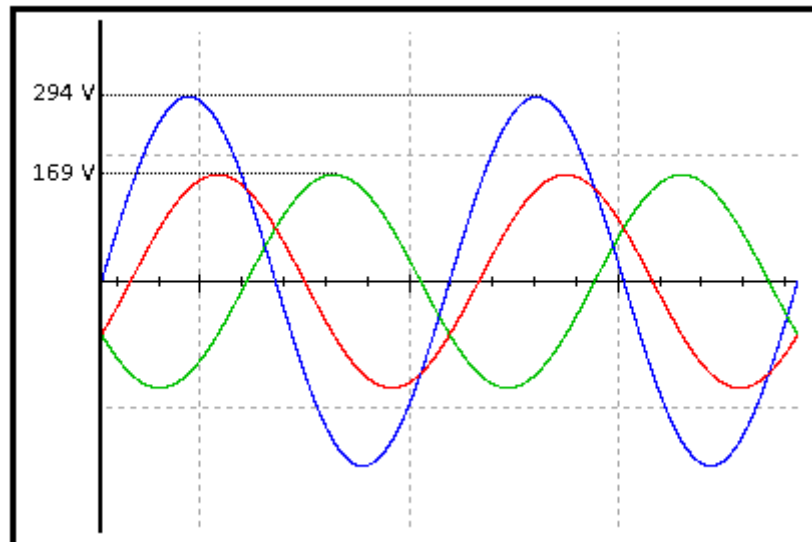


Ilustración 11. Sumatoria de dos fases

2.5.2 Fuentes de DC para Circuitos

En general los circuitos funcionan con alimentación continua, pero como se ha mencionado anteriormente, la electricidad se transporta en alterna. Por ello es necesario disponer de una etapa que haga la conversión entre las dos.

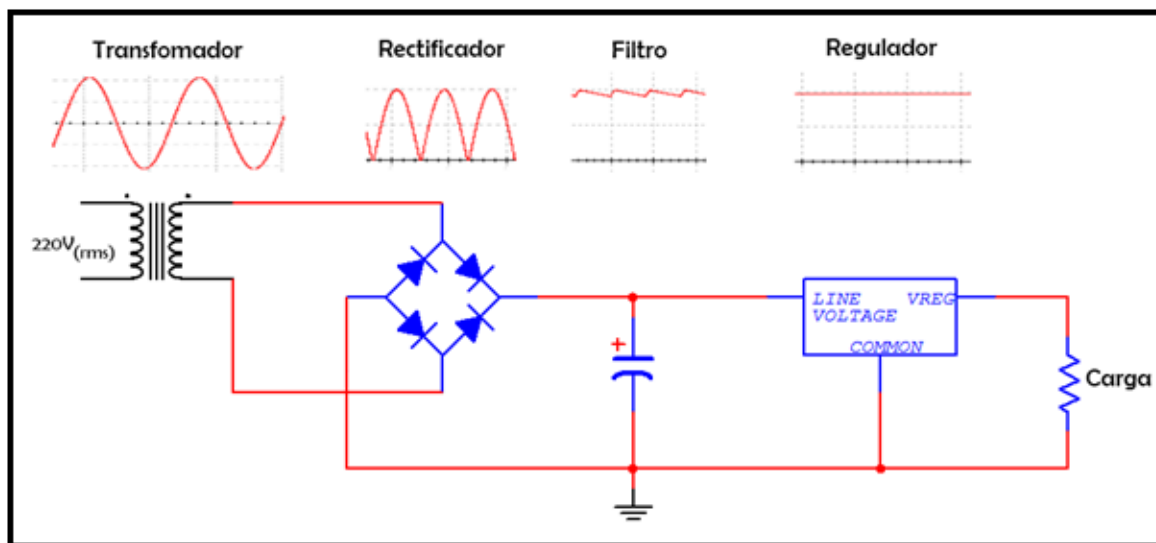


Ilustración 12. Esquema fuente de alimentación DC.

Por medio de un transformador la señal de la red de distribución se baja al nivel utilizado por la circuitería. Con un puente de diodos se hace el proceso de rectificación para cambiar la señal a continua. Un condensador que se descarga muy lentamente hace el proceso de filtrado para dejar la señal en un nivel aproximadamente fijo de DC con un ligero rizado. Finalmente se usa un regulador para tener una señal más pura y sin fluctuaciones para la carga. Ver Ilustración 12.

2.5.3 Medición de Corriente

La medición de intensidad de corriente es la parte más importante del sistema de electrocoagulación, porque es la variable que se va a controlar en las pruebas con cada tipo de agua residual. Existen varios métodos de medición dependiendo del tipo de corriente, pero para efectos de la entrega al microcontrolador, la salida debe ser una señal de voltaje.

En general para la medición de corriente continua se debe abrir el circuito, insertando en serie con la carga y la fuente, una resistencia muy pequeña (menor de 1 ohm) y de alta disipación para soportar potencia y no afectar la medida por causa de la temperatura. Además de eso se hace uso de una resistencia muy precisa en paralelo denominada resistencia Shunt o multiplicadora, ver Ilustración

13; que permite derivar la corriente para tomar una porción del valor real y así poder medir corrientes elevadas, como se muestra en la Ilustración a continuación:

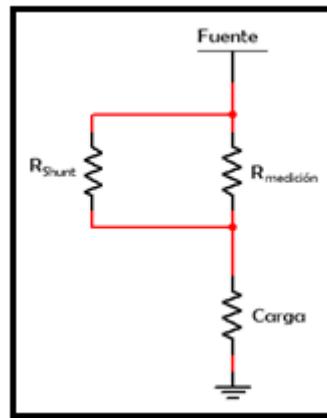


Ilustración 13. Medición de corriente con resistencia Shunt

Para la medición de corriente alterna se puede hacer uso de un transformador de corriente tipo ventana, que consiste en un núcleo toroidal cuyo primario posee pocas espiras y un secundario con muchas, en una proporción que hace posible la lectura de grandes intensidades, véase Ilustración 14. La línea de alimentación se hace pasar por el centro del toroide, lo que induce una f.e.m. debido al paso de corriente. Este es un método mucho más apropiado que una resistencia, porque aísla eléctricamente y no requiere abrir el circuito.

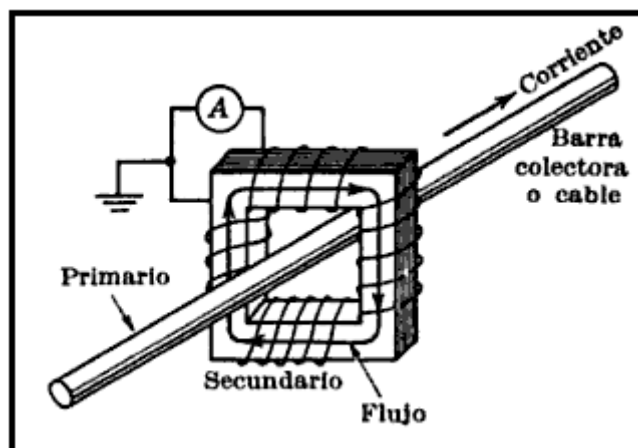


Ilustración 14. Medición de corriente con transformador tipo ventana.

Fuente: Dawes. Chester L. Electricidad industrial, Volumen 2. 1981. Pág. 268.

La corriente inducida I_i será una porción de la corriente de fase I_f representadas en la Ilustración 15. Para poder lograr la medición se debe colocar una resistencia en paralelo con el secundario. La señal inducida tiene naturaleza alterna por lo que posteriormente debe rectificarse y filtrarse para el ingreso al microcontrolador. Cabe resaltar que la medición debe ser muy precisa.

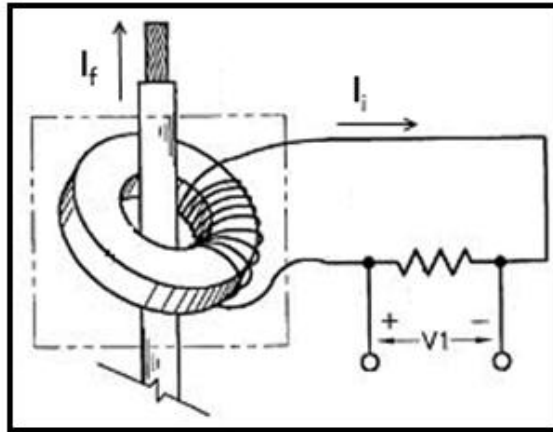


Ilustración 15. Representación de las corrientes

Fuente: A-C current transformer functional with a d-c current component present (United States Patent 6954060). Edel, Thomas G. 2005. Pág 2. <http://www.freepatentsonline.com/6954060.pdf>

2.5.3.1 Rectificador de Onda Completa de Precisión con Amplificadores Operacionales

Para valores pequeños de voltaje a escala de milivoltios el rectificador con diodos induce un error debido a la caída de tensión en ellos. El rectificador de precisión es una solución al problema, transmitiendo una polaridad de la señal e invirtiendo la otra, reflejando la señal de entrada a la salida con una sola polaridad. También se les conoce como circuito de valor absoluto. Los rectificadores de precisión se construyen con amplificadores operacionales.

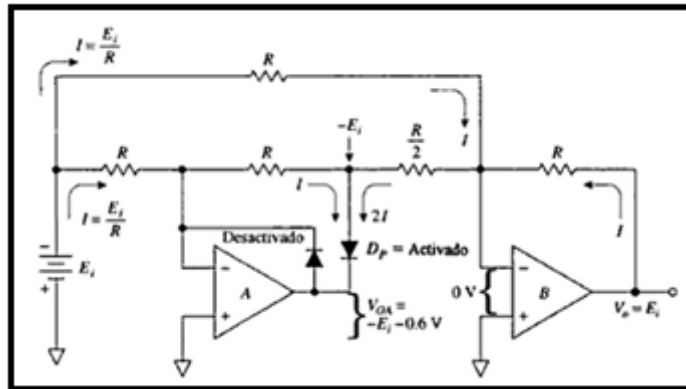


Ilustración 16. Rectificador de precisión para entradas positivas

Fuente: COUGHLIN, DRISCOLL. *amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales* 5 ed. 1999. Pág. 199.

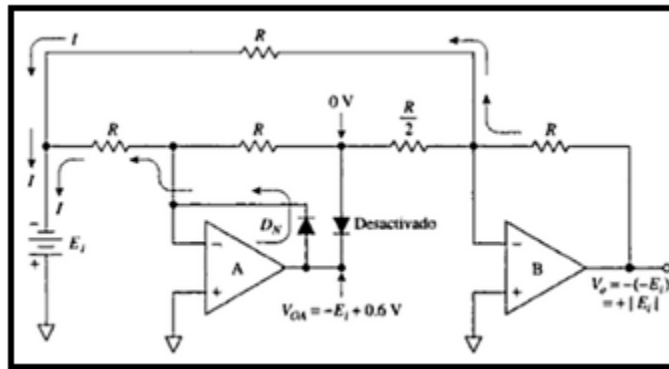


Ilustración 17. Rectificador de precisión para entradas negativas

Fuente: COUGHLIN, DRISCOLL. *amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales* 5 ed. 1999. Pág. 199.

En la Ilustración 16 para las entradas positivas el amplificador operacional A invierte E_i mientras que el amplificador operacional B suma la salida resultante en A con E_i para una salida E_i . En la Ilustración 17 la entrada es negativa, el amplificador operacional B invierte $-E_i$ para que finalmente se muestre la señal como $+E_i$. Por lo tanto se puede deducir que en el ciclo positivo la señal de entrada se refleja idéntica a la salida y en el ciclo negativo se invierte. En cada ciclo se cae un voltaje de 0.6V en el diodo que esté en funcionamiento.

2.5.3.2 Filtros Activos

Los filtros permiten o impiden el paso de ciertas frecuencias de señal. En algunos casos se les define como selectores de frecuencia, debido a que el diseño se realiza con respecto a una frecuencia principal o rango de frecuencias que se

desean aceptar o eliminar de una señal. Los condensadores e inductores permiten la realización de filtros pasivos, que pueden llegar a ser de gran tamaño, costosos y complejos. Los amplificadores operacionales permiten crear filtros activos obteniendo resonancia, un alto factor Q y amplificación con gran simpleza y sin utilización de inductores.

El ruido es una señal de muy alta frecuencia que se mezcla con la señal real, modificándola y distorsionando sus características. En la medición de corriente del electrocoagulador se desea la lectura de una señal de baja frecuencia (60 Hz), por ello se hace uso de un filtro pasabajos, que como indica su nombre elimina frecuencias altas que constituyen ruido. La configuración Sallen-Key presentada a continuación es simple y efectiva, véase Ilustración 18.

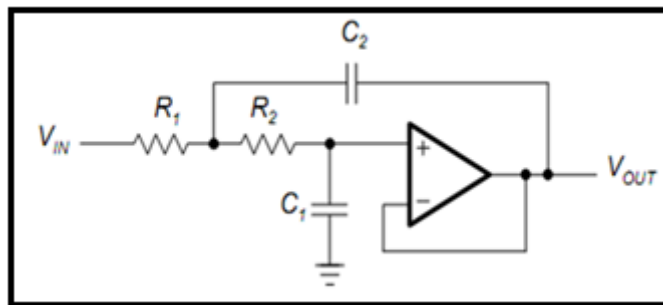


Ilustración 18. Filtro activo Sallen-Key

2.5.4 Tiristores (SCR)

El SCR (Silicon Controlled Rectifier o Rectificador Controlado de Silicio) es un dispositivo semiconductor que funciona como un conmutador. Está conformado por tres terminales denominados Ánodo, Cátodo y Compuerta, véase Ilustración 19. La conducción es en una sola dirección de Ánodo a Cátodo y es controlada por la Compuerta.

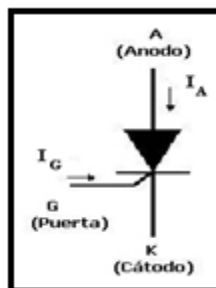


Ilustración 19. Representación gráfica del tiristor

La curva de funcionamiento permite visualizar el comportamiento en distintas etapas, véase Ilustración 20 y Ilustración 21.

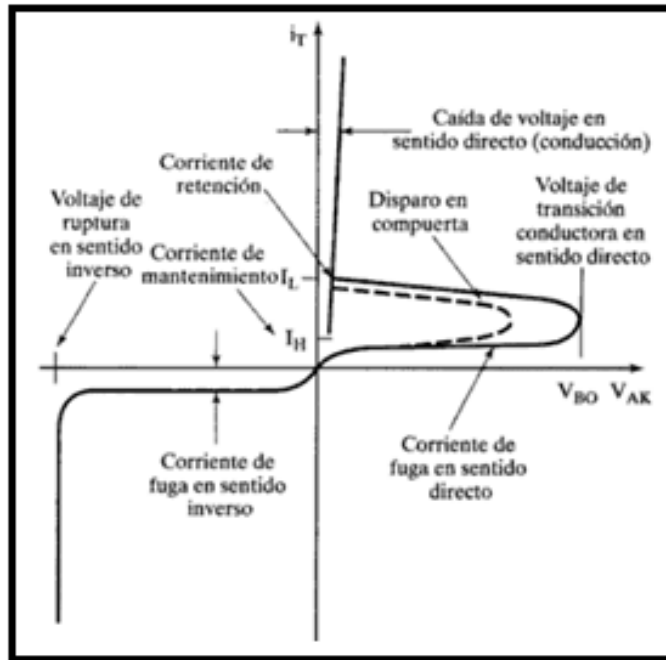


Ilustración 20.Curva característica del funcionamiento del tiristor

Fuente: RASHID. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones* 3 ed. 2004. Pág. 306

Cuando el voltaje del ánodo se hace positivo con respecto al cátodo, el dispositivo se encuentra en polarización directa, y se encontrará en estado de bloqueo con una corriente de fuga directa muy pequeña. Una vez se aplique el disparo por compuerta y se retire, la corriente en el ánodo debe sobrepasar la corriente de enganche I_L para mantener el tiristor en estado de conducción, después de activado, el voltaje ánodo – cátodo cae a un valor mínimo y funciona como un diodo común. Para permanecer en conducción la corriente de ánodo se debe mantener por encima de la corriente de mantenimiento I_H , en caso contrario se regresa al estado de bloqueo. Si se aumenta la tensión ánodo - cátodo sin corriente de compuerta hasta llegar a un voltaje V_{BO} , el dispositivo empieza a conducir y deja de ser controlado. El dispositivo también puede dispararse por efecto de altas temperaturas, razón por la que debe anclarse a un disipador.

Si se polariza en sentido inverso el tiristor permanecerá en estado de bloqueo, aumentando la tensión en sentido negativo cátodo - ánodo el dispositivo no permite la conducción hasta que se llegue a la tensión de ruptura donde se destruye.

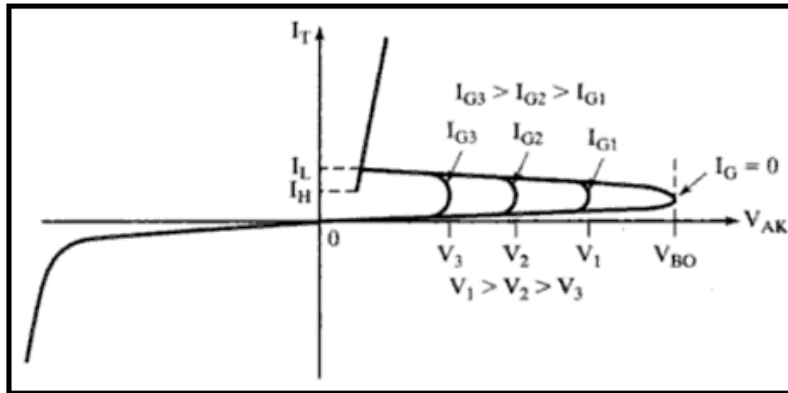


Ilustración 21. Efectos de la corriente de compuerta sobre el voltaje de bloqueo en sentido directo

Fuente: RASHID. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones* 3 ed. 2004. Pág.310

En la Ilustración 22(a) se puede ver un circuito simple con un tiristor y una entrada de señal análoga. En el ciclo positivo de la señal de entrada el tiristor se encuentra en polarización directa y se puede entrar en conducción, cuando se llegue a cero y empiece el ciclo negativo el tiristor entra en polarización inversa por lo que se desactiva. La potencia entregada a la carga es la mitad de la que puede entregar la fuente (ciclo positivo).

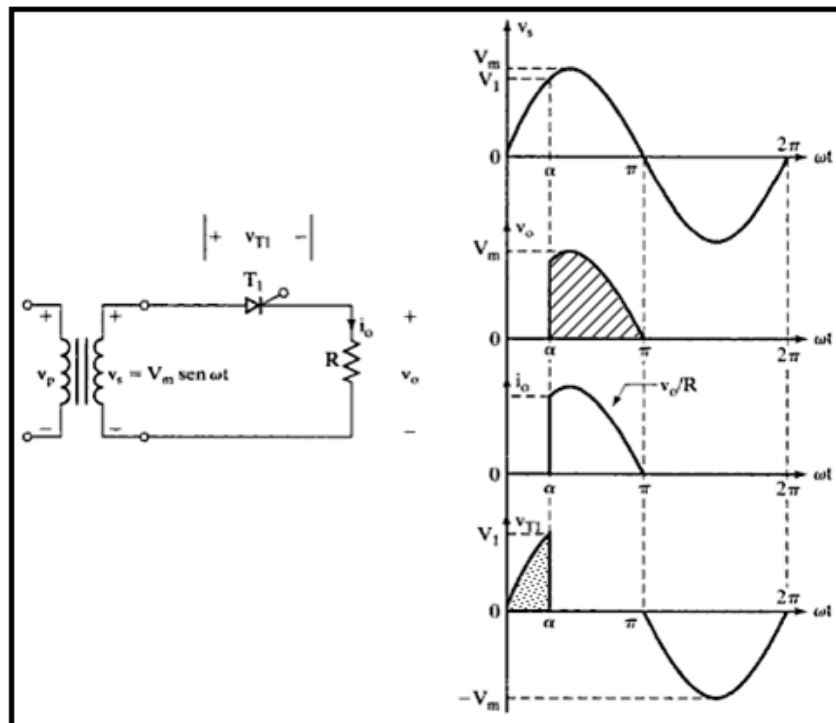


Ilustración 22. Convertidor monofásico de tiristor con carga resistiva. (a) Izquierda, (b) derecha.

Fuente: RASHID. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones* 2 ed. 1995. Pág. 131

Si se desea controlar la potencia entregada a una carga se puede regular la señal que se entrega con el tiristor, disminuyendo el tiempo de activación y es en este punto donde resulta muy útil para el electrocoagulador puesto que con esta técnica se puede variar la corriente que se suministra al agua contaminada desde valores muy pequeños hasta el máximo posible.

En la parte (b) se observa la salida en la resistencia R. El tiempo desde que la señal empieza a hacerse positiva hasta que se dispara el tiristor se conoce como ángulo de disparo (área punteada), y el tiempo en que la señal es aplicada en la carga se conoce como ángulo de conducción (área con líneas diagonales).

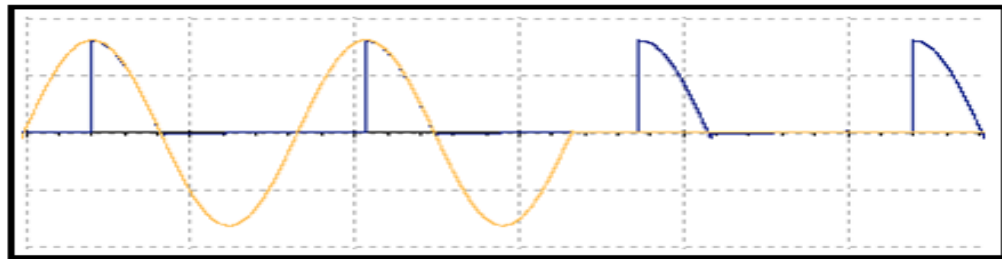


Ilustración 23. Disparo del tiristor en $\pi/2$

Vista en un osciloscopio la señal de entrada en color naranja y la señal de salida en color azul, disparando el tiristor en la mitad del ciclo positivo, Ilustración 23.

2.5.4.1 Circuitos De Disparo De Tiristor

En las terminales del tiristor aparecen distintos potenciales; el circuito de potencia (ánodo - cátodo) está sujeto a voltajes mayores a 100V mientras que el circuito de compuerta típicamente de 12 a 30V, motivo por el cual debe aislarse el tiristor y el circuito de disparo. El aislamiento se puede realizar con optoacopladores o transformadores de pulso, siendo el último de preferencia para uso industrial por ser más robusto. La Ilustración 24 muestra un circuito de disparo con compuerta AND el cual es aplicable para disparo con microcontrolador.

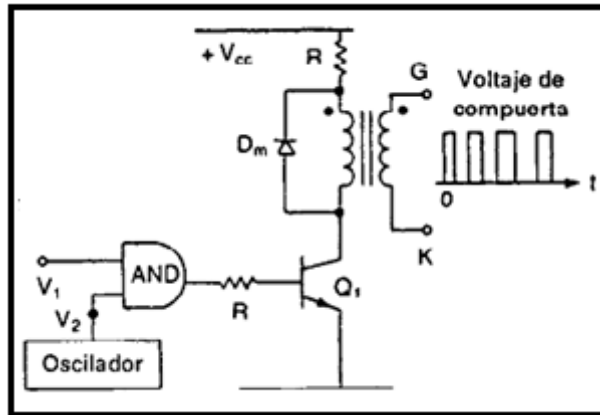


Ilustración 24. Aislamiento por transformador de pulso con lógica AND

Fuente: RASHID. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones* 2 ed. 1995. Pág.119

Cuando se aplica un pulso en la base del transistor, este se satura y el voltaje VCC aparece en el primario del transformador para luego producir un pulso en el secundario entre compuerta y cátodo del tiristor. Al retirar el pulso aparece un voltaje con polaridad inversa inducido por el transformador por lo que el diodo D_m conduce. El transformador de pulso también llamado transformador de Chopper, tiene un núcleo de Ferrita para poder trabajar a frecuencias altas (40KHz a 1MHz) sin saturarse; se utiliza de esta manera para que pueda recibir un tren de pulsos que disminuye pérdidas de corriente y asegura el disparo del tiristor.

2.5.4.2 Protección del Tiristor

En el bobinado secundario del transformador también debe colocarse un diodo de conmutación rápida, para proteger la compuerta de voltajes negativos. Véase Ilustración 25.

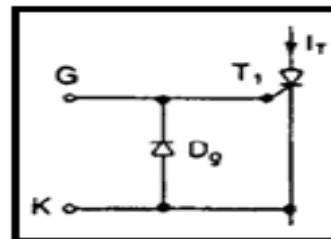


Ilustración 25. Circuito de protección de compuerta

Fuente: RASHID. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones* 2 ed. 1995. Pág.120

Si se aplica un escalón de voltaje a través del tiristor y la velocidad de elevación del voltaje ánodo - cátodo dv/dt es alto, el dispositivo puede dispararse. Un circuito RC en paralelo actúa como circuito de freno, limitando tales incrementos. Este circuito es llamado red Snubber. Ver Ilustración 26.

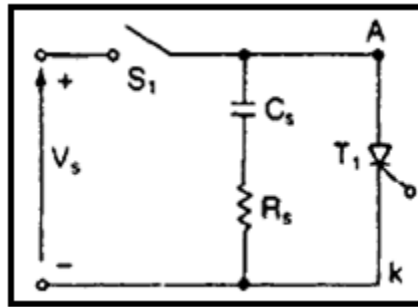


Ilustración 26.Red Snubber

Fuente: Fuente: RASHID. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones* 2 ed. 1995. Pág.103

2.5.5 Puente Rectificador Controlado Monofásico

La alimentación de las placas del electrocoagulador debe hacerse con la corriente en una sola dirección durante un lapso de tiempo, por lo tanto la señal circulante debe ser continua. La tensión utilizada es de tipo alterna por ello debe rectificarse, por otro lado, con un único tiristor solo se puede controlar media onda de la señal de alimentación como máximo. Para poder rectificar la tensión de entrada y además tener control total de la potencia entregada se pueden reemplazar los diodos de la etapa de rectificación con tiristores y a esto se le conoce como Puente Rectificador Controlado Monofásico Completo, ver Ilustración 27.

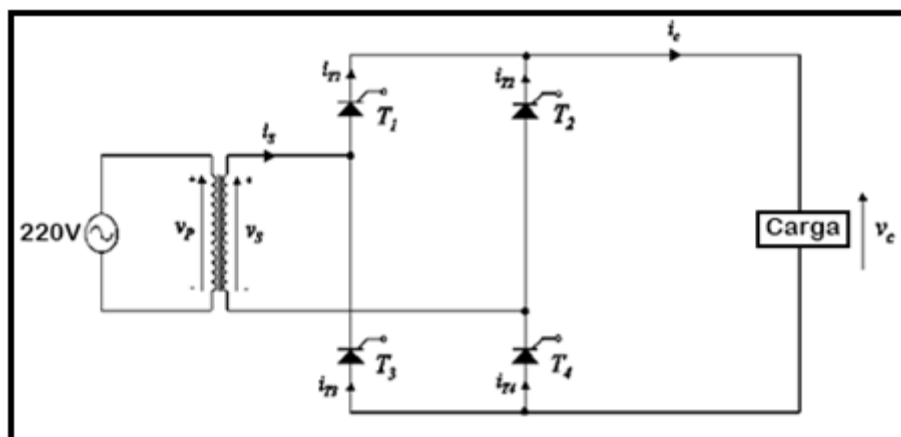


Ilustración 27.Puente rectificador controlado de onda completa

Fuente: RASHID. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones* 3 ed. 2004. Pág.139

En el ciclo positivo el disparo depende de los tiristores T1 y T4 y en el ciclo negativo de T2 y T3. Debido a la conmutación de los tiristores, cada par se desactivará en el momento en que entre en funcionamiento el otro, porque se encontraran en polarización inversa y polarización directa respectivamente.

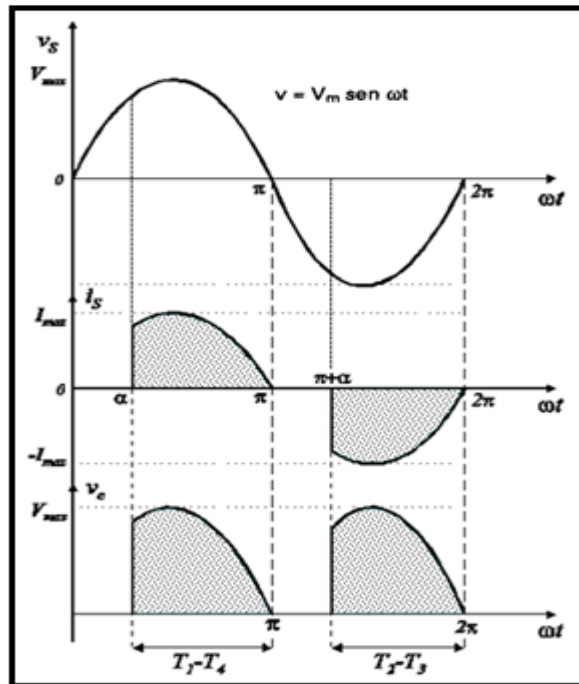


Ilustración 28. Representación de la potencia entregada

Fuente: RASHID. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones* 3 ed. 2004. Pág.310

En la Ilustración 28, el área punteada representa la potencia entregada a la carga durante el ángulo de conducción. Para conocer los valores de voltaje promedio se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right]}$$

2.5.6 Aplicaciones Microcontroladas (PIC)

Un conjunto de circuitos integrados hacen posible las labores de control, visualización e ingreso de información al sistema de electrocoagulación. Desde el

microcontrolador se llevan a cabo los procesos lógicos que son programados para que haga gestión de las entradas y salidas.

Se distinguen tres partes principales en un microcontrolador, la CPU (Unidad de Proceso Central), memoria y sistema I/O (entradas/salidas), ver Ilustración 29. En la memoria de programa se almacenan instrucciones que serán ejecutadas en un orden lógico por la CPU, de acuerdo a las variables de entrada. Toda la comunicación interna se realiza por medio de buses de direcciones y de control que ordenan la información del bus de datos e instrucciones. La comunicación externa o con periféricos depende del sistema I/O.

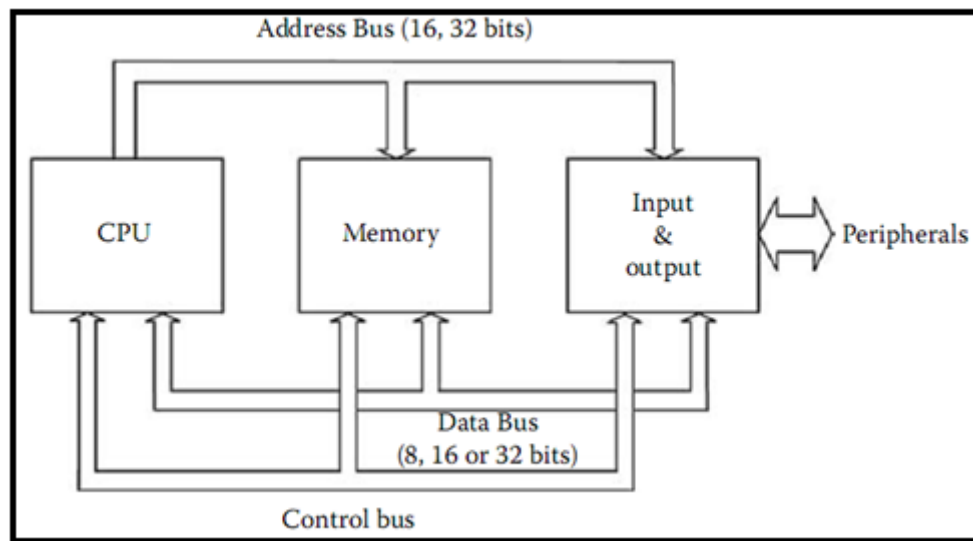


Ilustración 29. Partes principales de un microcontrolador

Fuente: Microcontrollers, Fundamentals and Applications with PIC. Pallas-Areny, Valdes-Perez. 2009. Pág. 2.

Al interior de la CPU los microcontroladores PIC poseen una ALU (Unidad Aritmético-Lógica) y utilizan un registro W que se necesita para la realización de todas sus operaciones. Además usan un registro STATUS para indicar características especiales en el valor de los resultados como lo son un acarreo o un resultado cero. Ver Ilustración 30.

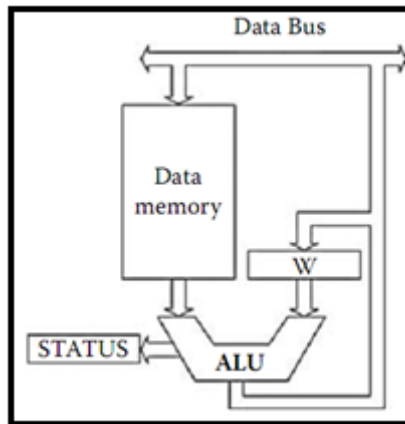


Ilustración 30. Relación entre ALU, registro W y memoria de datos en PIC

Fuente: Microcontrollers, Fundamentals and Applications with PIC. Pallas-Areny, Valdes-Perez. 2009. Pág. 17.

Los microcontroladores usan un cristal (XTAL) junto con un oscilador para generar una señal de reloj que sincroniza las operaciones internas; de la frecuencia generada depende la velocidad con que se realizan las operaciones. Así como las instrucciones se encuentran grabadas en la memoria ROM, también se dispone de una memoria RAM de lectura/escritura para uso del programa en ejecución. El watchdog es un temporizador que puede reiniciar todo el sistema si se llega a una bucle infinita no deseada. Los temporizadores e interrupciones son requerimientos del sistema para ejecutar subrutinas que no hacen parte de la secuencia cíclica del programa. Ver Ilustración 31.

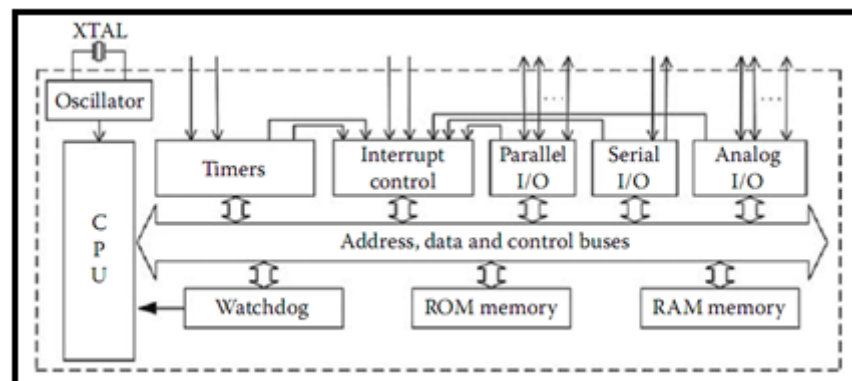


Ilustración 31. Diagrama de bloques de Microcontrolador

Fuente: Microcontrollers, Fundamentals and Applications with PIC. Pallas-Areny, Valdes-Perez. 2009. Pág. 4.

Los procesadores de este tipo pueden recibir entradas digitales y análogas, pero el proceso interno solo se realiza con valores binarios, por lo cual se hace una digitalización de las señales análogas con el bloque de conversión análogo-digital. La lectura de corriente suministrada por el electrocoagulador es una señal de tipo análoga porque deberá hacer uso de este recurso. La digitalización se hace con

un muestreo periódico de la señal análoga, en el que se le asigna un valor binario de acuerdo con una escala predefinida, como se muestra en la siguiente Ilustración, véase Ilustración 32:

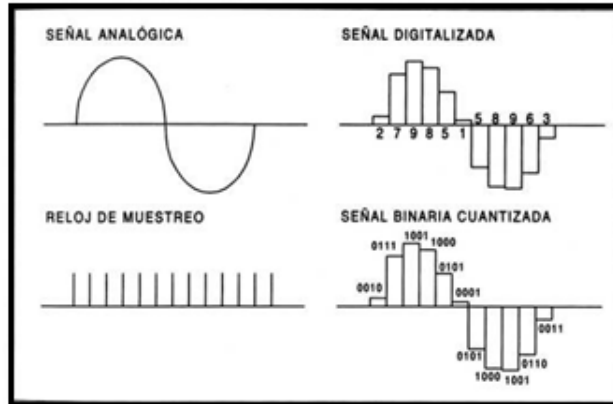


Ilustración 32. Señal análoga digitalizada

Fuente: www.sobreaudio.com. Señal digitalizada. [En línea]. [Consultado 25 Agosto 2010]. Disponible en internet: <http://www.sobreaudio.com/wp-content/uploads/2007/12/senal-digitalizada.jpg>

Para el electrocoagulador algunos parámetros se ajustan por medio de teclado que permiten al usuario tener control del proceso, mientras que otros ingresan como señales enviadas de circuitos complementarios del sistema; todo esto por puertos de entrada que se han adecuado para tal fin. Para lograr interacción con el controlador, el usuario debe tener información del estado del tratamiento y de las variables ingresadas, así que se envían los datos a un puerto de salidas para ser mostradas en un módulo de pantalla LCD, observar Ilustración 33. La interfaz de comunicación es manejada por drivers que contiene internamente esta última.

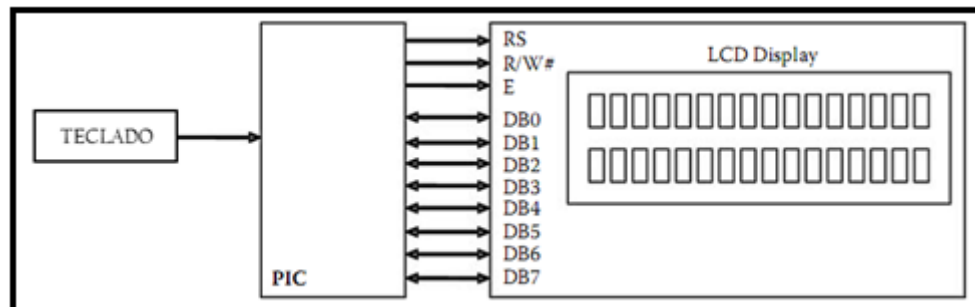


Ilustración 33. Aplicación microcontrolada

3. MODELO TEÓRICO

La mejor manera de entender cualquier tipo de sistema, equipo o dispositivo y sus unidades operativas, es manteniendo un ambiente grafico sencillo como lo es la descripción mediante diagramas de bloques. En la Ilustración 34. Se aprecia un diagrama de bloques general, y posteriormente en la Ilustración 35. Se desglosan en los circuitos que lo componen.

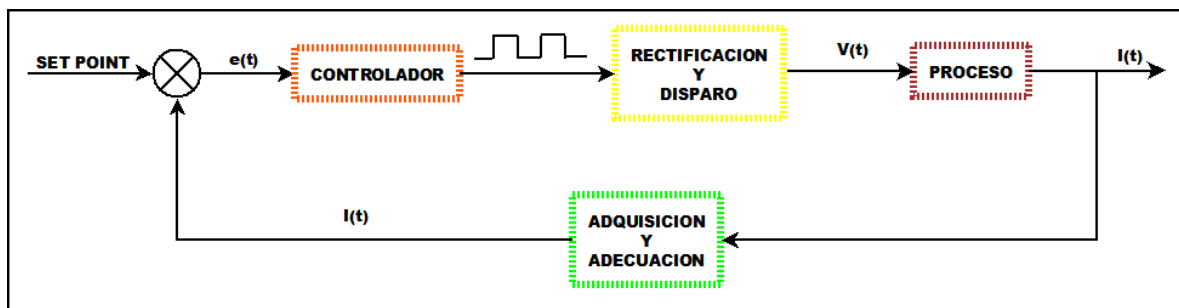


Ilustración 34. Diagrama de bloques general del proyecto

El controlador debe recibir un valor de referencia o *set point* para la corriente que se espera mantener constante. Una vez dada la señal de arranque, el microcontrolador espera la señal de cruce por cero que indica el inicio del ciclo positivo de la onda de corriente alterna y ajusta un valor de tiempo vinculado al ángulo de disparo de los tiristores; así se inicia la señal rampa en el tanque de electrocoagulación. Inmediatamente sea entregada la potencia a las placas, empezará a circular un flujo de corriente que será leído por el circuito de adquisición y adecuación para proporcionársela al microcontrolador por el conversor análogo/digital, quien compara el valor deseado con el valor leído y genera una señal de error que continúa aumentando, decrementando o manteniendo el tiempo de conducción. El sistema está pensado para manejar 25A pero todo el diseño es capaz de soportar 50A, en caso de querer ampliar el rango de utilización, basta con cambiar la restricción de corriente en el programa.

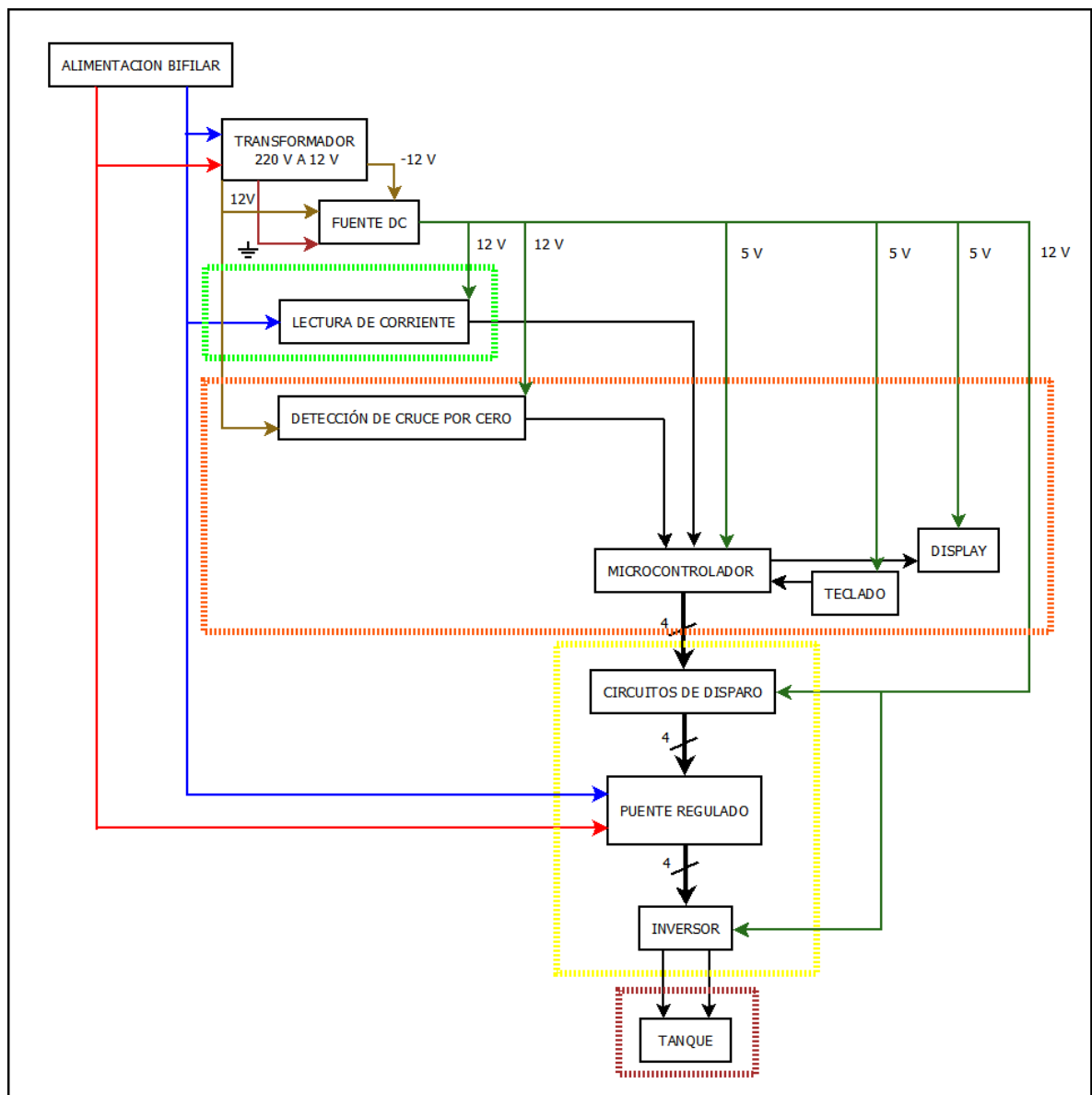


Ilustración 35. Diagrama de bloques específico del proyecto

3.1 ALIMENTACIÓN

3.1.1 Alimentación Bifilar

El prototipo fue diseñado para trabajar con una alimentación bifilar, tomando dos líneas sin neutro de una red trifásica, generando 208V_{AC}.

3.1.2 Transformador 220 V a 12 V

El transformador permite implementar las etapas de FUENTE DC y DETECCIÓN DE CRUCE POR CERO. Este transformador está diseñado para bajar 220V a 12V con referencia, tiene en la entrada 4 terminales 120V – neutro y 120V – neutro y en la salida tiene 3 terminales 12V – tap central – 12V como se muestra en la Ilustración 36. A fin de utilizar las dos fases de la alimentación bifilar, se puede realizar una adecuación uniendo las dos líneas de neutro para que finalmente la entrada quede como una sola señal de 208V. La escogencia de este transformador se realiza en base a dos factores:

- Disponibilidad en el mercado
- Mayor valor de voltaje DC requerido por los circuitos

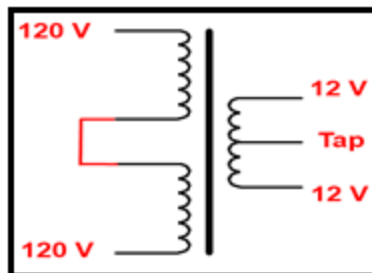


Ilustración 36. Transformador de 220 V a 12 V

3.1.3 Fuente De Corriente Directa

Varias etapas del proyecto requieren una fuente de alimentación de corriente directa. Se hace el diseño de una fuente que entrega varios voltajes de salida de acuerdo con las necesidades de cada circuito independiente. La entrada de esta etapa utiliza 12V AC provenientes del transformador y posteriormente se encuentran dispuestos reguladores que permiten entregar cada voltaje de manera muy precisa; estos son LM7812 para 12V, LM7912 para -12V y LM7805 para 5V, este último es una derivación del primero aprovechando la etapa de rectificación y filtrado realizada previamente. Esta fuente se puede apreciar en la Ilustración 37. Los cálculos para el diseño de la fuente son los siguientes:

- Se halla el voltaje máximo

$$V_{omax} = V_{RMS} * 1,4142$$

$$V_{omax} = 12 * 1,4142$$

$$V_{omax} = 17 V$$

$$V_{max} = V_{omax} - V_{diodos}$$

$$V_{max} = 17 V - 1.4 V = 15.8V$$

- Se calcula el condensador del filtro

$$C = \frac{I_{DC}}{2F * V_{RPP}}$$

$$C = \frac{250 mA}{(2 * 60) * 1}$$

$$C = 2083 \mu F \cong 2200 \mu F$$

- El puente de diodos se eligió con el valor máximo de la condición de 250 mA, ya que los puentes no son comerciales a este valor se eligió de 1 A.

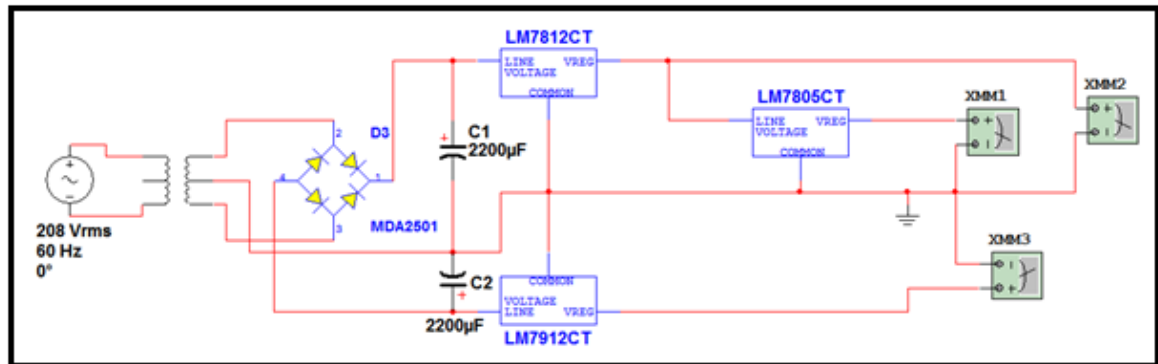


Ilustración 37.Fuente de corriente directa



Ilustración 38. Medición de los voltajes de salida de la fuente de corriente directa diseñada

3.2 PROCESO

En este proyecto el proceso se refiere únicamente al tanque donde se realiza el proceso de electrocoagulación y floculación. La estructura del recipiente debe ser un material dieléctrico para aislar las placas entre sí y no conducir al exterior la corriente inducida en el agua, además debe preverse calentamiento del agua durante la aplicación de la potencia. Con esta condición se estudiaron acrílico, teflón, baquelita y fibra de vidrio como posibles materiales para su fabricación (ver Tabla 1).

	Temperatura máxima de operación	Transparente	Costo
Baquelita	138°C	No	Medio
Teflón	260°C	No	Alto
Acrílico	130°C	Si	Bajo
Fibra de vidrio	450°C	No	Medio

Tabla 1. Características de los materiales de fabricación del tanque

Para el diseño del arreglo de placas se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Tipología de electrocoagulador
- Cantidad de placas
- Separación entre placas
- Áreas de coagulación
- Conducto para toma de muestras

Se escoge un electrocoagulador tipo Batch debido a que es un sistema pequeño y utiliza bajas cantidades de agua contaminada de prueba, adecuado para un

laboratorio o un centro de investigación, contrario a lo que sucede con un tipo continuo que requiere un afluente de agua constante.

En un electrocoagulador se utilizan varias placas, ya que para una buena disolución de iones metálicos, es preciso aumentar el área de los electrodos sin aumentar las dimensiones del tanque exageradamente. Con una alimentación de $187V_{DC}$ y 20 placas se obtiene entre cada subdivisión de par de placas:

$$V_{placas} = \frac{V_{DC}}{Subdivisiones} = \frac{187}{19} = 10V_s$$

Tomando placas de 20cm x 20cm se tiene que:

$$Area_{Total} = 20 \text{ placas} * 400 \text{ cm}^2 = 8000 \text{ cm}^2 = 0.8 \text{ m}^2$$

$$Densidad_{Corriente} = \frac{25A}{0.8 \text{ m}^2} = 31 \text{ A/m}^2$$

Si por algún motivo se deseara mayor voltaje entre placas o mayor densidad de corrientes se pueden retirar placas de los extremos.

Las distancias de separación entre placas menores a 1cm no son recomendables porque aumentan el tiempo del tratamiento. Para permitir la formación de flóculos de mayor tamaño se establece una distancia de 2cm.

Se considera una zona libre para aglomeración de espuma y flóculos de baja densidad que tienden a flotar y otra zona para sedimentación donde se acumulan los flóculos con mayor densidad que tienden a precipitarse, cada una de estas zonas es de 4cm; dejando así la zona media como de reacción, con un área transversal equivalente al de las placas. Además se liberan 2cm en los laterales de las placas para permitir flujo del agua contaminada. Finalmente se dispone un grifo para el desagüe del agua tratada en la parte baja de la zona de reacción. Véase Ilustración 39.

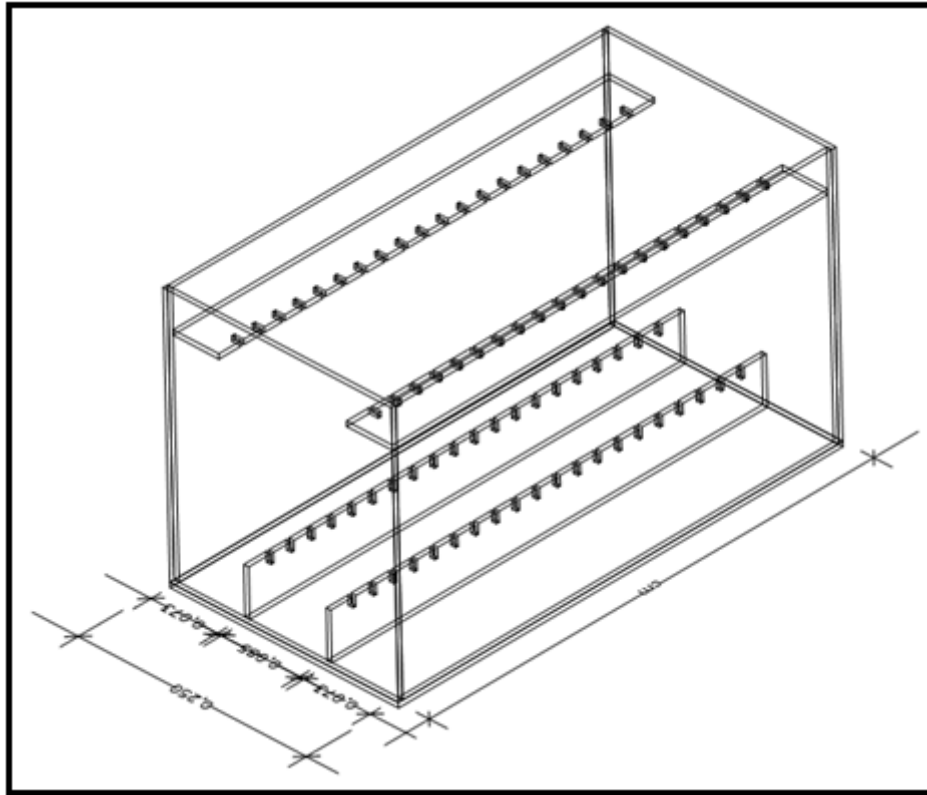


Ilustración 39.Diseño del tanque

3.3 RECTIFICACIÓN Y DISPARO

3.3.1 Puente regulado

El proceso requiere una alimentación de potencia de corriente continua variable o ajustable de acuerdo a la conductividad. Por esta razón se requiere un puente rectificador regulado, este puente regulado debería estar conformado por tiristores. Se evaluó la posibilidad de utilizar GTO (*Gate Turn-Off Thyristor* o *Tiristor apagado por compuerta*) y SCR (Tiristores); Se definió utilizar SCR puesto que solo requieren de un pulso de encendido porque el apagado se produce por conmutación natural y en los GTO es necesario un pulso adicional para el apagado. El SCR se tiene que buscar con las siguientes características:

- Corriente: 50 A
- Voltaje: 600 V
- Corriente de disparo por compuerta: alrededor de los 100 mA y 200 mA
- Se recomienda un encapsulado de tipo industrial.

El tiristor 50RIA60 cumple con las condiciones deseadas y por ello el diseño se hace en base a este.

Se requiere también de disipadores que permitan una distribución adecuada del calor para evitar disparos por temperatura. Debido a que estos tiristores son de ánodo roscado, es posible colocar dos de ellos en un solo disipador debido a la configuración del puente y los otros dos con disipadores separados como se muestra en la Ilustración 40.

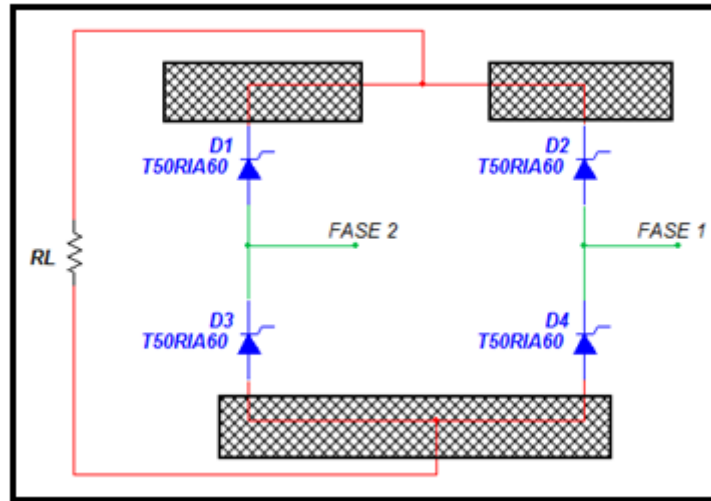


Ilustración 40. Configuración de los disipadores en los tiristores

Los disipadores usados son de aletas en los extremos y espacio en el medio para roscar el SCR.

3.3.1.1 Circuito de disparo

Los tiristores necesitan un pulso para que sean activados y entren en estado de conducción, en este proyecto el dispositivo que genera los pulsos es el microcontrolador. Se necesita que este pulso este aislado eléctricamente y además que la corriente entregada por el microcontrolador se adecue para asegurar que sea la suficiente para generar el disparo de los tiristores. Como se expuso anteriormente existe la posibilidad de usar acopladores ópticos y transformadores de pulso, pero es de preferencia el ultimo porque los optoacopladores necesitan una alimentación por separado, aumentan los costos del circuito.

De acuerdo a la hoja técnica del tiristor la corriente de compuerta debe ser aproximadamente 100mA, puesto que el microcontrolador puede entregar máximo 25mA esa corriente será amplificada con un transistor en corte-saturación (como interruptor). Se tiene que:

$$V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CE}$$

Donde V_{CC} es 12V de la fuente, I_C es la corriente de colector de 100mA que van a la compuerta del tiristor, R_C es una resistencia limitadora en colector y V_{CE} es el voltaje colector-emisor del transistor.

$$I_{Cmax} = \frac{V_{CC}}{R_C} \rightarrow R_C = \frac{12V}{100mA} = 120\Omega$$

La corriente de colector depende directamente de la corriente de base y la ganancia del transistor:

$$I_C = \beta I_B \rightarrow I_B = \frac{100mA}{200} = 0,5mA$$

Finalmente se halla la resistencia de base que estará conectada al pin del microcontrolador que es de 5V representaba con V_{BB} y el voltaje V_{BE} equivale al de caída en un diodo:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \rightarrow R_B = \frac{5 - 0,7}{0,5mA} = 8,6k\Omega$$

Dos tiristores del puente rectificador controlado se disparan simultáneamente, por ello se puede utilizar un mismo pulso, conectado a dos transistores paralelamente, necesitando multiplicar la corriente al doble y por tanto disminuir las resistencias de colector y base a la mitad, quedando cada circuito de disparo de la siguiente manera, ver Ilustración 41:

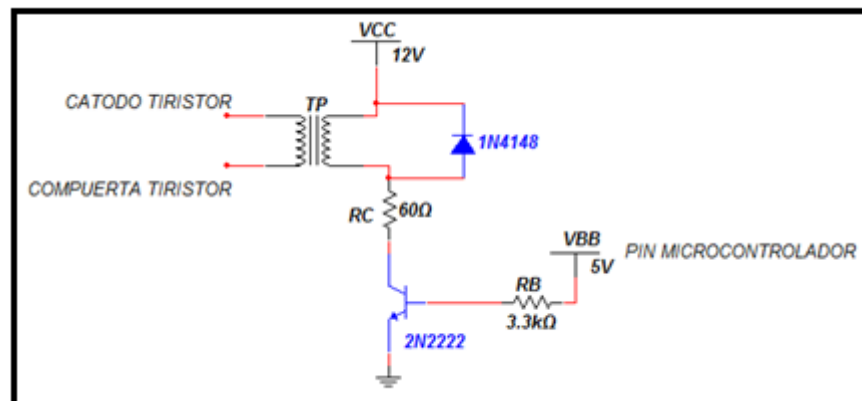


Ilustración 41.Circuito de disparo

La resistencia de base se aproxima por debajo para asegurar el mínimo deseado.

3.3.1.2 Protección del tiristor

Para la protección del dv/dt del tiristor se le conecta el arreglo de resistencia y condensador conocido como red Snubber, ver Ilustración 42; los valores de esta red para las aplicaciones industriales son típicos de 33Ω a $10W$ y $100nF$ a $630V$.

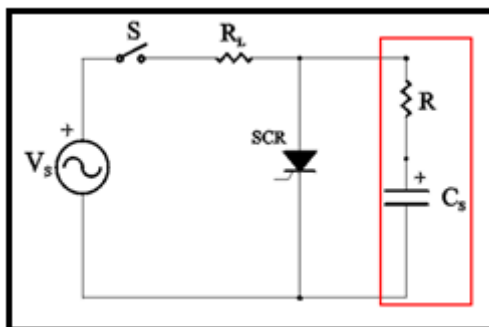


Ilustración 42.Red Snubber

También se ha mencionado la necesidad de usar diodos en los dos devanados del transformador de pulsos para la protección de voltajes inversos, estos diodos son de conmutación rápida como los 1N4148.

3.3.2 Inversor de polaridad

Como se mencionó antes, la circulación de corriente en un solo sentido a través del electrocoagulador produce un desgaste excesivo de las placas por una sola cara y además provoca que los coloides se adhieran a las paredes de la placa disminuyendo su vida útil. Para solucionar este problema se plantea invertir el sentido de la corriente a través de las placas de manera temporizada. Es necesario que la solución sea sencilla y robusta; para esto se utilizarán contactores electromagnéticos accionados por salidas digitales del microcontrolador de manera alternada. La forma como se hace la conexión de los contactores entre el puente rectificador controlado y la carga se presenta a continuación, ver Ilustración 43:

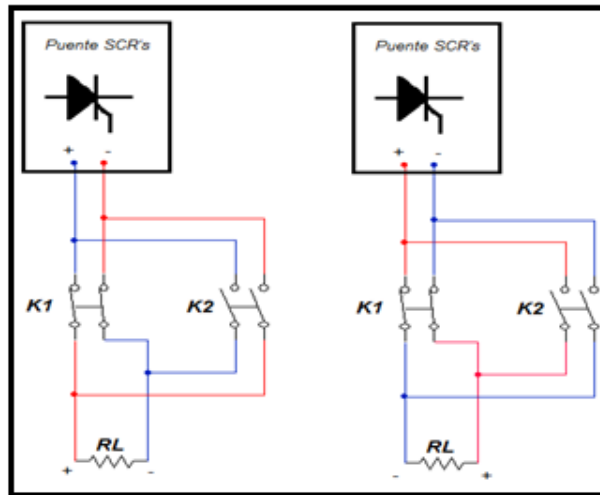


Ilustración 43.Circuito de inversión

Los contactores deben ser accionados sin energización en sus terminales, por lo tanto antes de hacer el arranque del proceso de electrocoagulación debe activarse el primero de ellos, luego iniciar el proceso de control para alcanzar el *set point* y transcurrido un tiempo t se inicia la disminución de la corriente también en rampa hasta llegar a un valor cero, para apagarlo e iniciar de la misma forma el segundo contactor. Esto se realiza periódicamente y se esquematiza en el siguiente diagrama de tiempos:

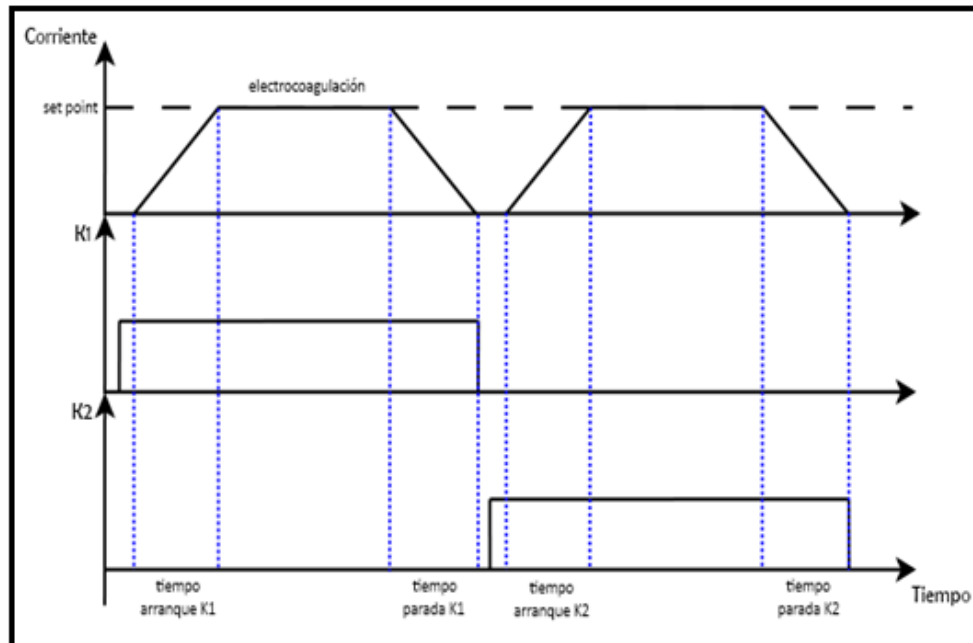


Ilustración 44.Diagrama de tiempo

Uniendo todos los circuitos de la etapa de rectificación y disparo se tiene el circuito diseñado a continuación, ver Ilustración 45:

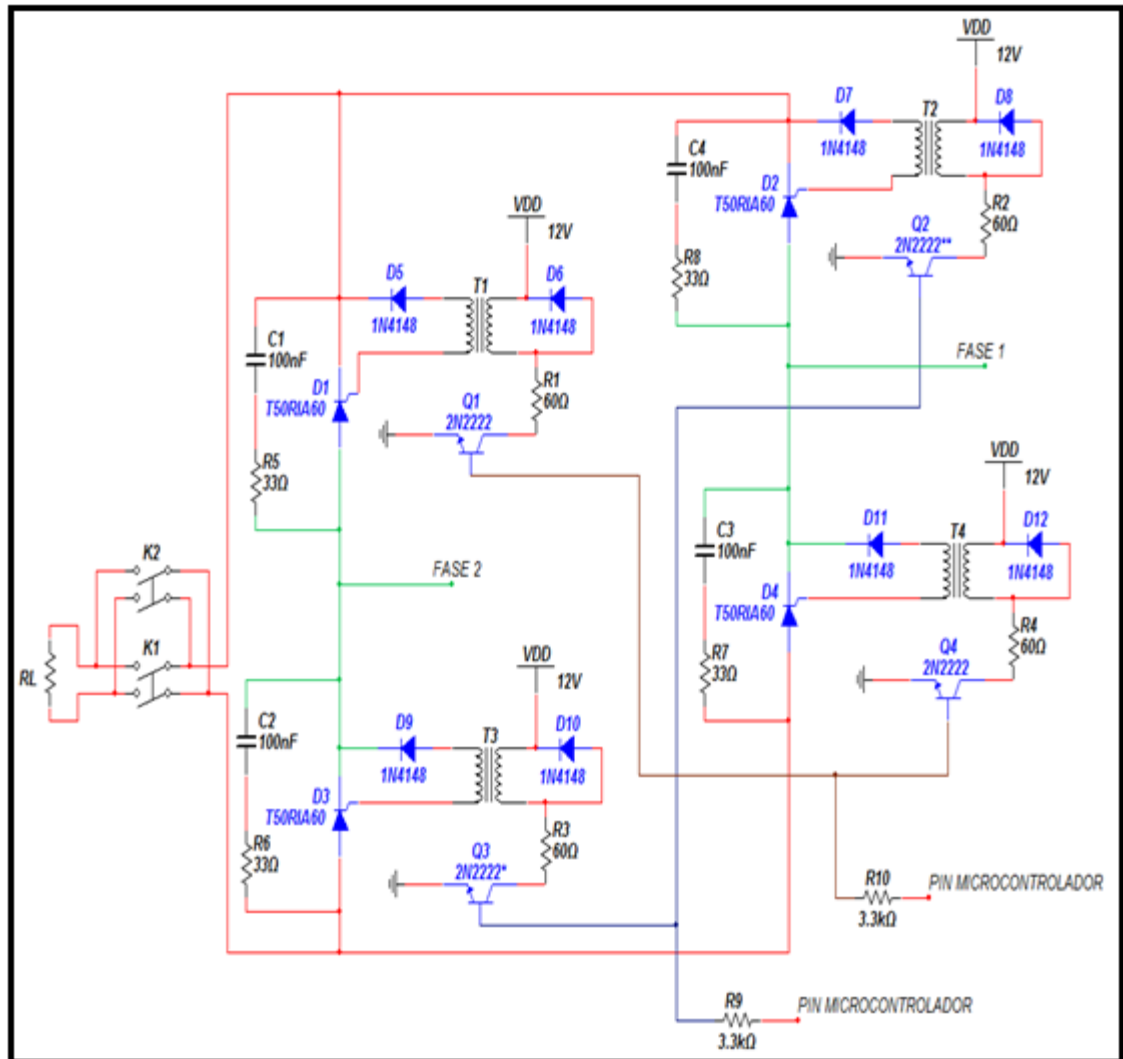


Ilustración 45. Esquema de la etapa de rectificación y disparo

3.4 ADQUISICIÓN Y ADECUACIÓN DE SEÑAL

3.4.1 Lectura De Corriente

La lectura de corriente en alterna se realiza mediante un transformador de corriente tipo ventana con una relación de 50 a 5, lo cual quiere decir que por cada 50A que pasan por la ventana se ven reflejados en la salida 5A. Debido a que la corriente máxima utilizada es de 25A se utilizaría el transformador a la mitad de su capacidad, por lo tanto se puede pasar la línea de fase dos veces para duplicar el

valor de la corriente leída, utilizando todo el rango y aproximando la respuesta a una más lineal. Para entregarlo al circuito de rectificación se convierte esa corriente en voltaje utilizando una resistencia de 0.1Ω recomendada para transformadores de 2.5VA de forma que en el secundario del transformador se tiene:

$$V = I \cdot R = 5A \cdot 0.1\Omega = 0.5V$$

$$P = I^2 \cdot R = 25A \cdot 0.1\Omega = 2.5W$$

La potencia disipada en la resistencia hace necesario que sea cerámica y ligeramente apartada del resto del circuito.

En el esquema de la Ilustración 46 se puede observar la disposición del transformador de corriente a ser utilizado en un amperímetro en comparación con la disposición del transformador de potencial a ser utilizada en un voltímetro, para la medición entre dos fases de una línea trifásica.

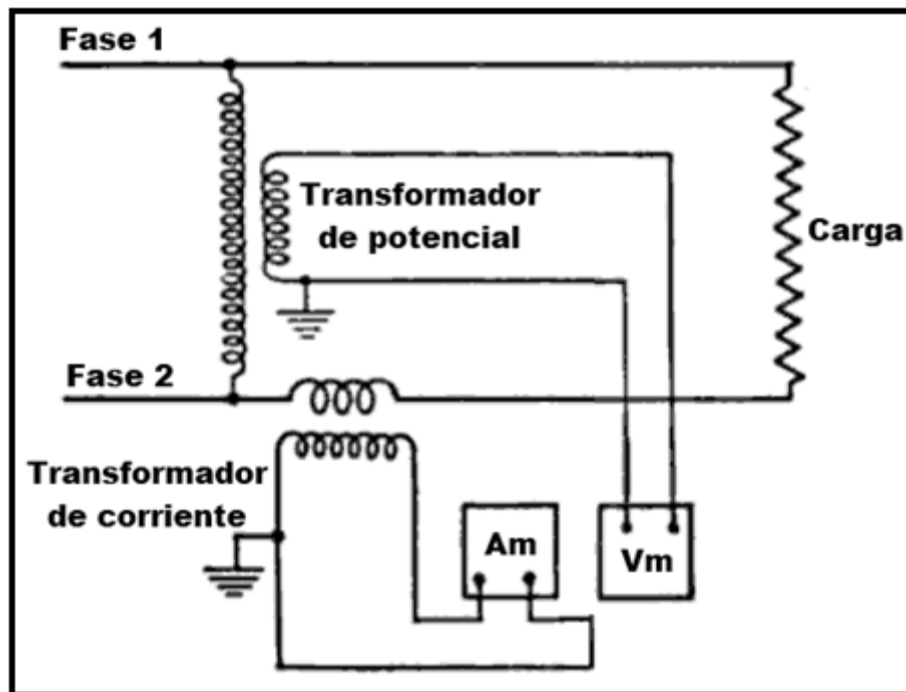


Ilustración 46. Forma de conexión de transformadores de medida

Fuente: Dawes. Chester L. Electricidad industrial, Volumen 2. 1981. Pág. 269.

3.4.2 Amplificación de Señal con Amplificador Operacional

Como se puede notar en los cálculos de lectura de corriente, la señal de salida es de muy baja magnitud y por ello es necesario amplificarla para que tenga una

escala adecuada en la lectura del conversor A/D; esto con el objetivo de ser más preciso en la medición. La teoría de amplificadores operacionales establece la siguiente configuración de amplificación de pequeña señal, ver Ilustración 47:

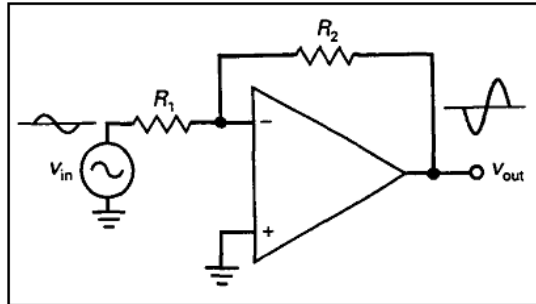


Ilustración 47. Circuito del amplificador inversor

Fuente: Malvino, Albert Paul. Principios de Electrónica, Sexta edición. 1999. Pág. 683.

La realimentación negativa se hace por medio de la resistencia R_2 . La ganancia de voltaje es:

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{100K\Omega}{10K\Omega} = -10$$

Como se evidenció anteriormente el voltaje máximo entregado por el circuito de lectura de corriente es de 0.5V y el voltaje deseado para la entrada al conversor A/D del microcontrolador es de 5V, por lo tanto la amplificación debe ser 10 veces, para ello las resistencias deben tener valores de $R_1=10K\Omega$ y $R_2=100K\Omega$. El signo negativo demuestra que la señal sale invertida (con un desfase de $\pi/2$) lo cual no representa problema porque la señal será rectificada.

3.4.3 Rectificador De Precisión

La señal de corriente medida a través del transformador de corriente se debe rectificar y adecuar para que el microcontrolador pueda procesarla. La señal es de baja magnitud (5V) y por ello es adecuado utilizar un rectificador de precisión en lugar de un puente de diodos que produce una pérdida de aproximadamente 0.7V. Para entender de mejor forma el funcionamiento el circuito se puede separar en las dos fases de las que se compone según la Ilustración 48.

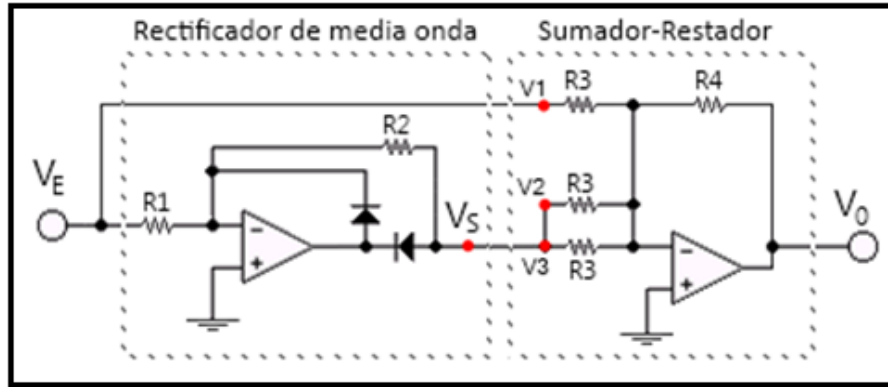


Ilustración 48. Rectificador de precisión

El rectificador de media onda tiene una salida de la forma:

$$V_S = -\frac{R_2}{R_1} V_E, \quad \text{si } V_E > 0$$

$$V_S = 0, \quad \text{si } V_E < 0$$

Y el sumador-restador tiene una salida de la forma:

$$V_0 = -\frac{R_4}{R_3} (V_1 + V_2 + V_3)$$

Al unir los circuitos se puede notar que:

$$V_1 = V_E \quad \text{y} \quad V_2 = V_3 = V_S$$

Reemplazando los voltajes en la ecuación del sumador, para la entrada positiva de la señal:

$$V_0 = -\frac{R_4}{R_3} \left[V_E + 2 \left(-\frac{R_2}{R_1} V_E \right) \right]$$

$$V_0 = \frac{(-R_4)R_1V_E + 2V_E(-R_4)(-R_2)}{R_3R_1}$$

Haciendo las resistencias iguales:

$$V_0 = 2V_E - V_E = V_E$$

Para la entrada negativa de la señal:

$$V_0 = -\frac{R_4}{R_3}[V_E + 2(0V_E)]$$

Haciendo las resistencias iguales:

$$V_0 = -V_E + 0 = -V_E$$

Por lo tanto todas las resistencias son iguales. Se escogen resistencias de valores altos para disminuir las perdidas en el circuito, se decidió usar $22K\Omega$. Ver Ilustración 49.

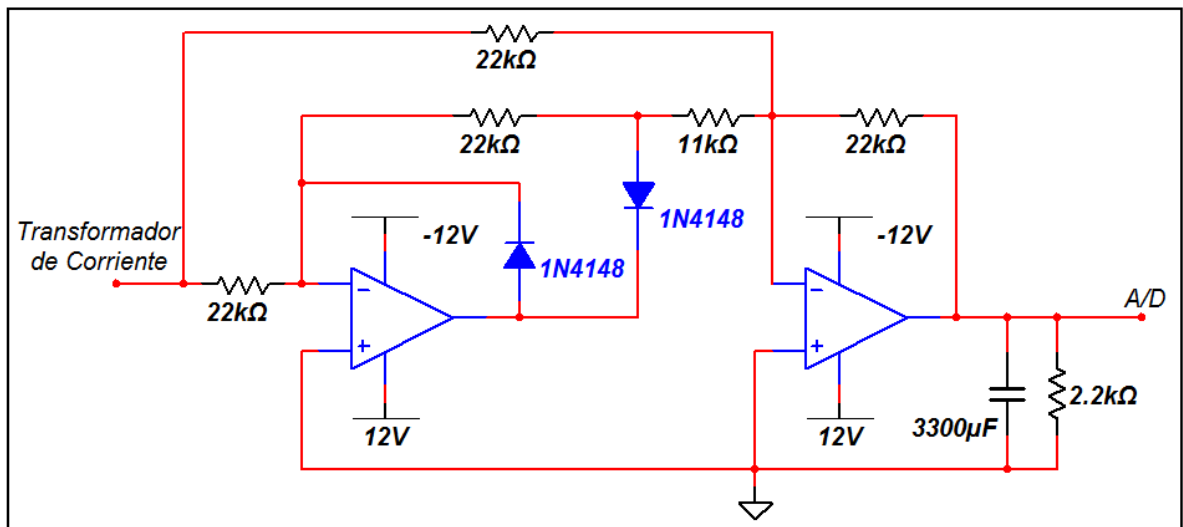


Ilustración 49.Circuito diseñado del rectificador de precisión

Uniendo todas las partes que componen la etapa de adquisición y adecuación de señal se obtiene un circuito como el que se muestra en la Ilustración 50:

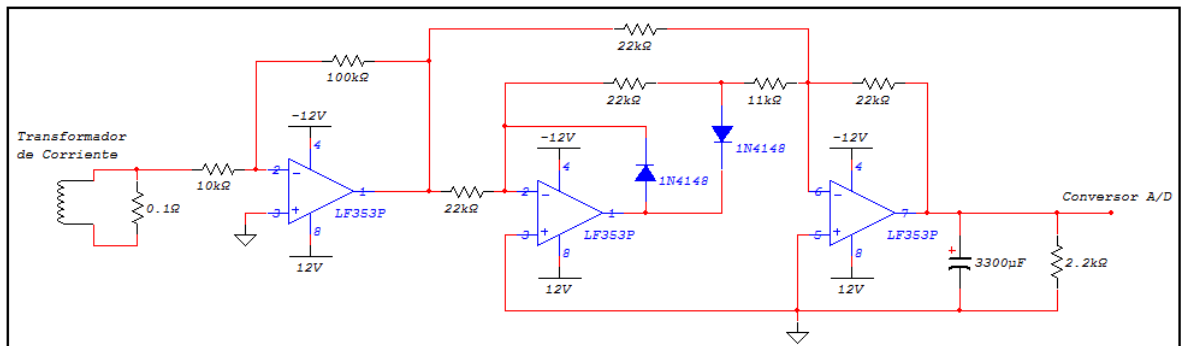


Ilustración 50. Esquema de la etapa de adquisición y adecuación de señal

3.5 CONTROLADOR

3.5.1 Detección De Cruce Por Cero

Esta etapa requiere como entrada la alimentación bifilar para comprobar el punto de cruce entre las dos, a razón de que este voltaje es de gran magnitud se debe disminuir para que sea manejable, por ello se toma la señal del transformador de 220V a 12V. La salida de este circuito es un pulso que es entregado a la unidad de control y que sirve para sincronizar al microcontrolador con la señal de alterna y poder generar el pulso de disparo acorde con el ángulo de conducción deseado. Véase Ilustración 51.

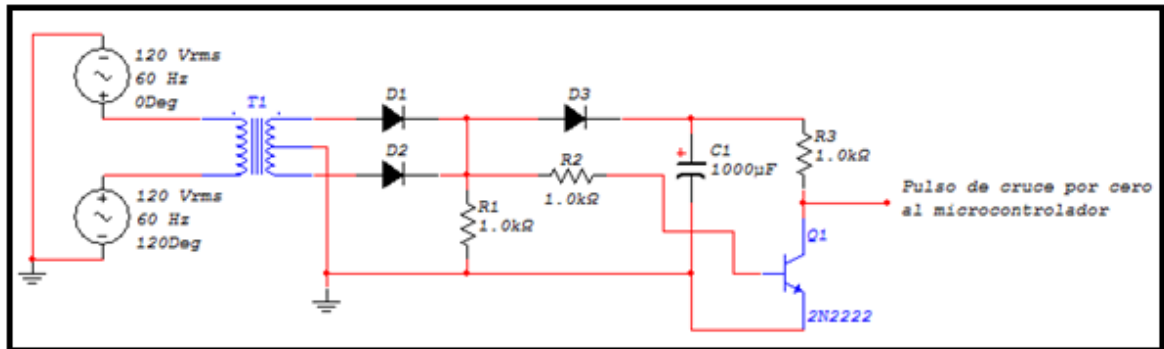


Ilustración 51. Circuito de detección de cruce por cero

El circuito inicialmente funciona como un rectificador de onda completa con diodos y tap central, donde la señal rectificada pasa a un diodo de aislamiento entre compuerta y base del transistor, para que finalmente se filtre y quede como una fuente de DC en R3. La resistencia R2 limita la corriente por base y la R1 asegura la referencia con tierra. El transistor funciona en corte-saturación, conservándose en saturación permanentemente debido a la corriente continua en base, hasta que la onda rectificada llega a cero, por lo que se interrumpe la activación y entra en corte; dejando el punto de toma de pulso (que permanece en tierra) al mismo voltaje de DC hasta que se active nuevamente el transistor y regrese a tierra. El ancho del pulso depende del condensador usado.

3.5.2 Unidad De Control

La unidad de control es la encargada de realizar la lectura de la corriente, la detección del cruce por cero, la generación de los pulsos para los circuitos de disparo, el control de la etapa de inversión y el manejo de teclado y display LCD. En esta unidad se generan las interrupciones por los temporizadores, los cuales

nos dan el ángulo de disparo para determinar la cantidad de potencia que se suministrará al dispositivo.

El valor de set point utilizado está dado en porcentajes de potencia de la señal, donde cada porcentaje está relacionado a un valor de corriente de 0 a 25A en una tabla, suponiendo así incrementos de 250mA.

El control de corriente se realiza con el ángulo de conducción, que equivale a un tiempo de activación de los tiristores; pero debido a que la conductividad del agua es variable a medida que avanza el proceso, la potencia entregada a la carga debe cambiar dinámicamente según la comparación entre la corriente leída y la esperada, por eso se dividen los semiciclos (positivo y negativo) en 100 partes iguales que serán sumadas de uno en uno hasta alcanzar el valor deseado de set point. En teoría se puede hacer directamente con valores de ángulo (tiempo), pero debido a que la señal es sinusoidal tendría un área distinta para cada partición, lo que significaría variaciones no semejantes entre cada paso, de tal manera que es conveniente hacer las divisiones en valores equivalentes de voltaje utilizando la fórmula de voltaje DC:

$$V_{dc} = \frac{V_p}{\pi} \{\cos \theta + 1\}$$

$$V_p = 208 \cdot \sqrt{2} = 294V$$

$$V_{dc(máx)} = \frac{294}{\pi} \{\cos 0 + 1\} = 187V$$

Los 187V_{DC} de la salida del puente controlado se dividen en 100 y se reemplazan en la ecuación anterior para hallar el tiempo equivalente al ángulo θ , asegurando así incrementos regulares de potencia. El resultado es una tabla de 100 valores que relaciona cada posición con un rango de tiempo, donde el máximo valor es 8,33 ms que es la duración de un semiciclo de 60 Hz. Cabe aclarar que el tiempo de disparo se cumple idénticamente para cada semiciclo. En este documento se referirá a esta tabla como tabla de tiempos. Una representación figurativa se puede ver en la Ilustración 52.

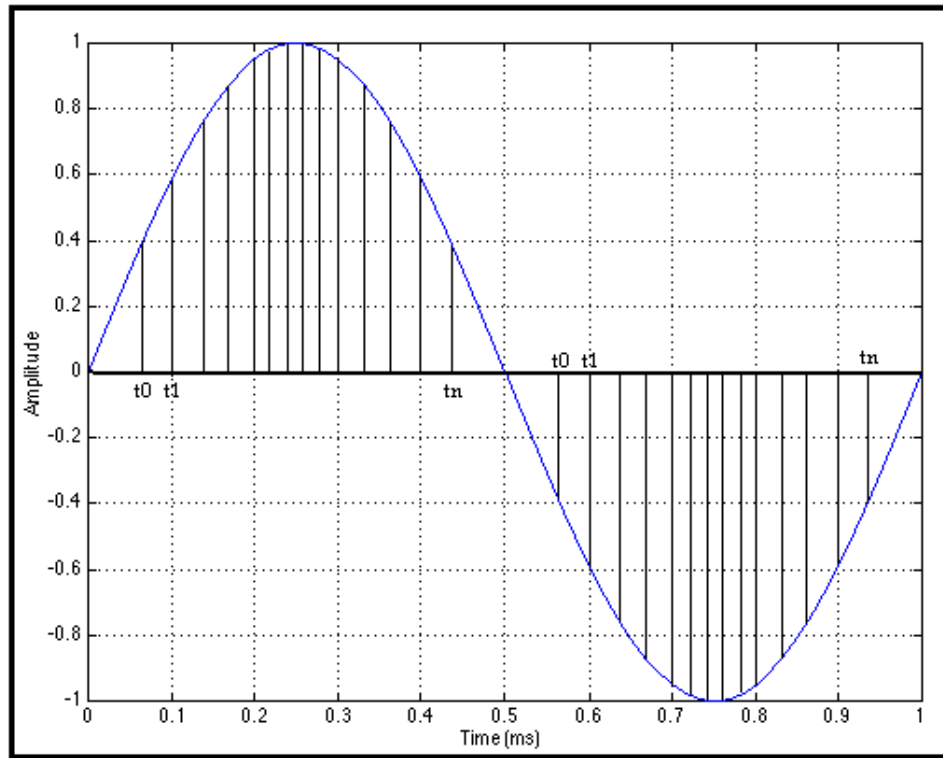


Ilustración 52. División simétrica de voltajes en señal analógica

Después de dar la señal de arranque, el microcontrolador inicia el disparo de los tiristores con el primer valor de la tabla de tiempos, que será el mínimo tiempo de conducción, para luego comparar el valor inmediato de lectura de corriente con el valor deseado de set point; si este valor es menor entonces se aumenta una posición en la tabla de tiempos, consecutivamente hasta alcanzar el valor de referencia, generando así una señal rampa de corriente desde cero hasta dicho valor. Cuando se llega al valor de corriente deseado se mantiene el mismo tiempo de conducción hasta que por causa del proceso de remoción de materia aumente la resistencia del agua, necesitando aplicar más potencia, retomando así la secuencia inicial de comparación de corriente e incremento de posiciones en la tabla de tiempos. El esquema de control de disparo de los tiristores se puede apreciar en el diagrama a continuación, ver Ilustración 53:

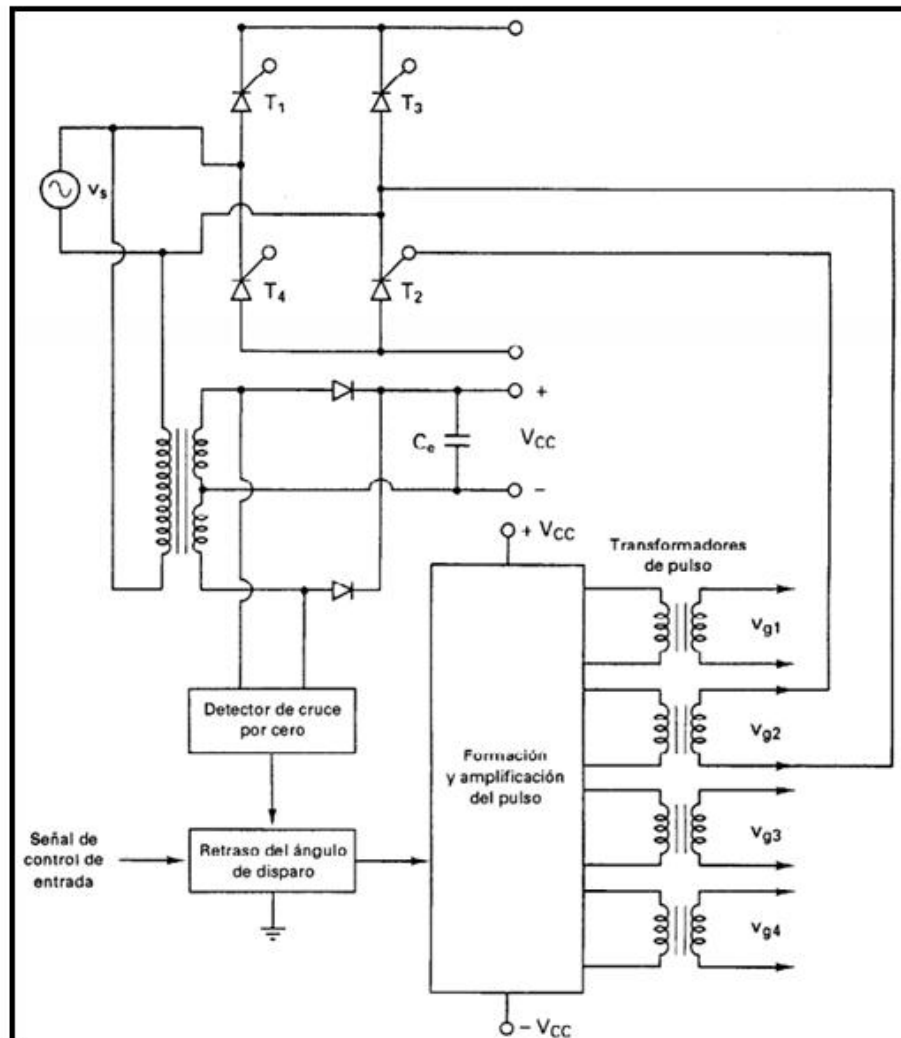


Ilustración 53. Diagrama de bloques de disparo de Puente Controlado

Fuente: RASHID. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones* 2 ed. 1995. Pág.185.

El pulso emitido por el circuito de cruce por cero es ingresado como una interrupción al microcontrolador para que pueda lanzar tres temporizadores: t_0 (tiempo de ángulo de disparo), t_1 (tiempo de nuevo cruce por cero 8,33ms) y t_2 (tiempo de nueva comparación). Cuando se cumple t_0 se ordena el disparo del par de tiristores del ciclo positivo en el tiempo indicado por la posición en la tabla de tiempos, cuando se cumple el t_1 se lanza nuevamente t_0 para disparar los tiristores del ciclo negativo idénticamente y se espera un tiempo t_2 para realizar nuevamente la comparación y disparo. Adicionalmente un temporizador t_3 debe controlar el tiempo en el que se realiza la inversión en las placas y paralelamente hacer el conteo del tiempo transcurrido. Tanto el encendido como el apagado del tratamiento se hacen en rampa, al igual que el intervalo para el cambio de contactor. El convertor análogo-digital también utiliza una interrupción de tiempo

según la rata de muestreo establecida en la configuración inicial. Los módulos de entrada y salida diseñados para el electrocoagulador se representan en la Ilustración 54:

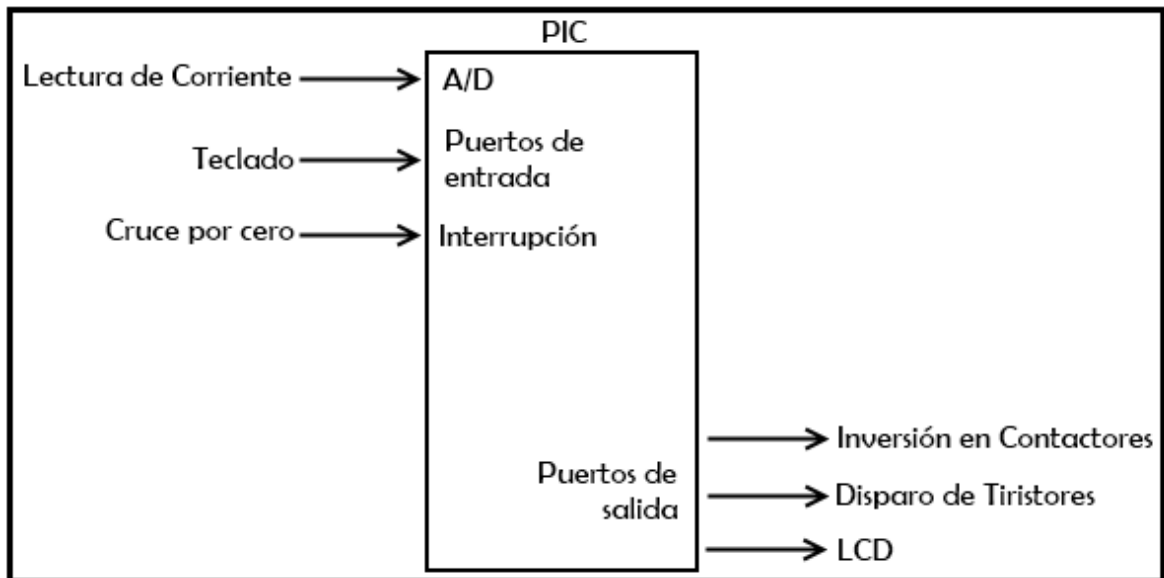


Ilustración 54. Esquema de entradas y salidas del PIC

Se propone usar el PIC 18LF458, que es un microcontrolador con alta capacidad de memoria, set de instrucciones especializadas para procesamiento de tablas, posee conversión análogo-digital, la cantidad de temporizadores e interrupciones externas suficientes para la implementación del programa, puertos de corriente alta como fuente y sumidero, posibilidad de generar señales PWM y además posee un módulo de comunicación CAN (ver anexo 9); que lo hace ideal para el control del electrocoagulador y suficientemente robusto en cuanto a capacidad de puertos y funciones como para soportar cambios posteriores en el diseño de programa, sumado a su gran disponibilidad y bajo precio en el mercado. Este microcontrolador es conectado a un cristal de 4 MHZ, que resulta suficiente y económico para la aplicación.

3.5.3 Teclado

Se implementa un teclado comprendido por 4 pulsadores, que se definen como Enter, Escape (Esc), F1 y F2 que servirán para interactuar con el equipo como usuario.

- Enter: este pulsador tiene como función central confirmar la acción que se desee.
- Escape (Esc): Este pulsador está diseñado para rechazar acciones o regresar entre menús.

- F1 y F2: son pulsadores asignados para navegación general entre los menús y las opciones.

El set de menús permite hacer el ajuste del set point, escoger tiempo definido o indefinido de operación, velocidad de la rampa de inicio y finalización, detener el proceso o hacer una rampa de prueba y mantener la corriente en cualquier punto escogido de ella. Estos pulsadores se conectan como entradas al microcontrolador, como se muestra en la Ilustración 55.

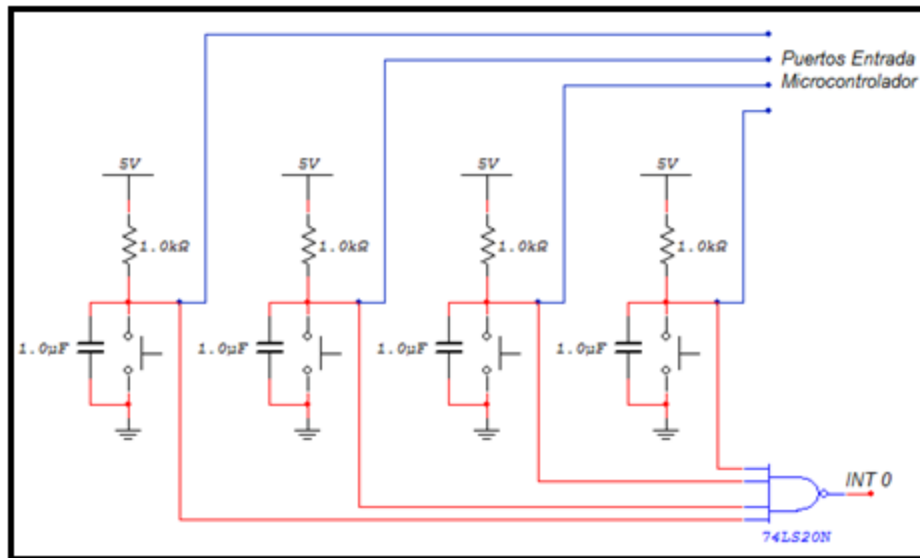


Ilustración 55. Pulsadores como entradas al PIC.

El condensador funciona como filtro para los rebotes del pulsador, la compuerta NAND permite que se genere el requerimiento de interrupción si se presiona cualquiera de los pulsadores y los puertos de entrada del micro permiten identificar exactamente cuál de ellos fue presionado.

3.5.4 Display

La interfaz gráfica que tendrá el usuario para conocer el estado del equipo electrónico se implementa mediante un display LCD de 4x20 (4 líneas de 20 caracteres cada una), para que se pueda presentar cómodamente toda la información. En este display se podrán mostrar la inicialización, el menú general, sub-menús, y mensajes. Durante el proceso se podrá visualizar la medida de corriente, el valor de set point, el tiempo transcurrido y las opciones para detener el sistema. Se implementa luz de fondo y contraste de caracteres para asegurar la

visualización en cualquier ambiente. En la Ilustración 56 se presenta el esquema de conexión eléctrica a de un display a un PIC.

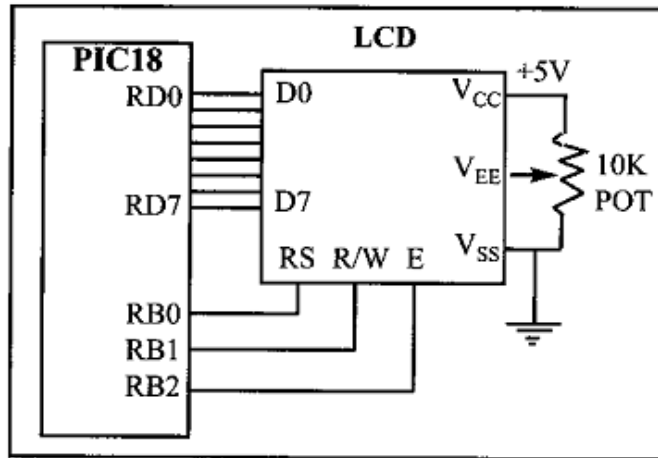


Ilustración 56. Esquema de conexión de display LCD para un PIC

Fuente: PIC Microcontroller and Embedded Systems. Ali Mazdi, McKinlay, Causey. 2008. Pág. 476.

4. DESARROLLO DEL MODELO

4.1 ALIMENTACIÓN

El diseño original se ha complementado con filtros de condensadores recomendados en los *datasheet* para estabilidad de la señal de salida en aplicaciones típicas de los reguladores. Ver Ilustración 57.

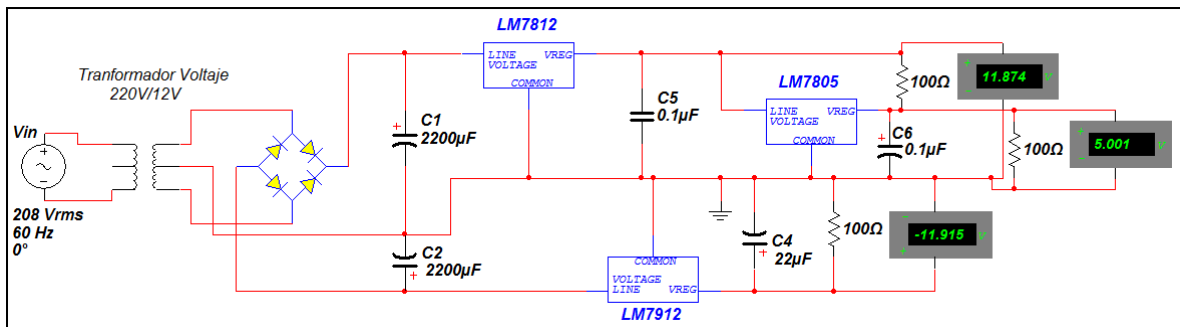


Ilustración 57. Diseño final de la fuente de alimentacion.

Se han supuesto cargas resistivas bajas para simular el peor caso. La siguiente tabla 2 contrasta los resultados a las salidas de los reguladores:

Dispositivo	Voltaje Simulado (V)	Voltaje Medido (V)
LM7805	5	5.03
LM7812	11.9	12.03
LM7912	-11.9	-12.02

Tabla 2.Comparativa de voltajes medidos y calculados

4.2 PROCESO

Según las características analizadas en la Tabla 1 del capítulo 3, se ha escogido acrílico como material para la fabricación del tanque contenedor, uniendo todas sus partes con acrílico granulado fundido y sellado con silicona especial para acuarios. En la Ilustración a continuación se muestra la disposición de los cortes de la placa acrílica de 5 mm de grosor y medidas de 100 cm x 64 cm de longitud lateral. Véase Ilustración 58.

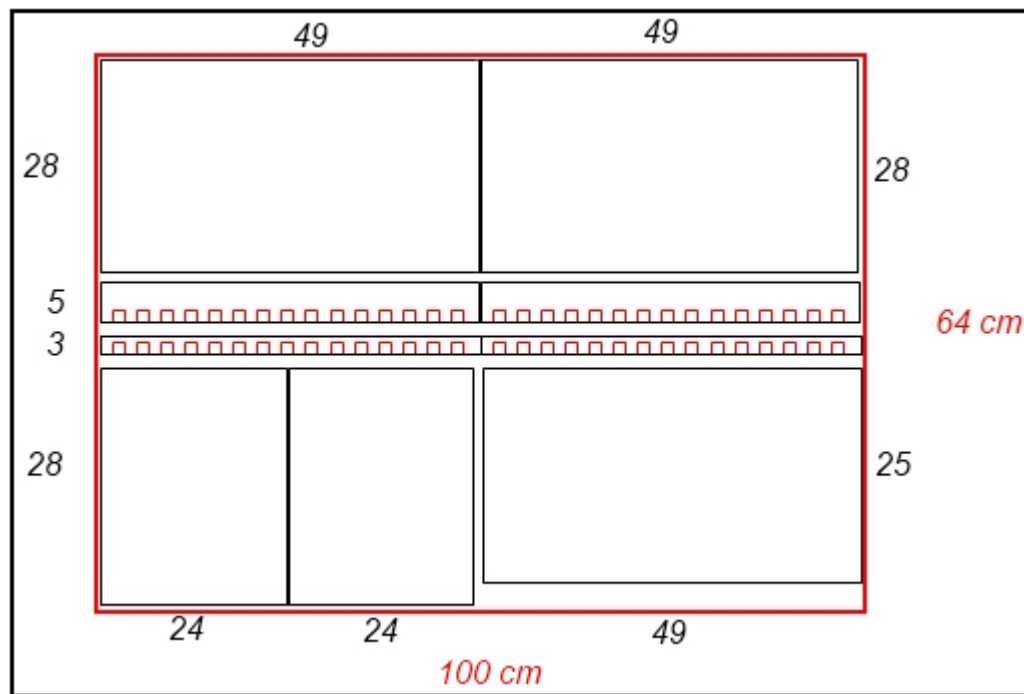


Ilustración 58. Esquema de cortes para el tanque de acrílico¹

4.3 RECTIFICACIÓN Y DISPARO

Esta etapa funciona con el disparo directo de los puertos de salida del microcontrolador a la base del par de transistores correspondientes debido a que el tren de pulsos tiene un voltaje directo promedio de amplitud 1V y una duración de 0,650 ms para la carga resistiva, que difiere de los 5V constantes que planearon inicialmente. Por otro lado, el tren de pulsos se fija como permanente durante todo el tiempo disponible hasta el siguiente cruce por cero de la señal, puesto que el tanque electrocoagulador adquiere características capacitivas al final del tratamiento a causa de la disposición de placas metálicas con separaciones dieléctricas (agua purificada) y esto produce una acumulación de carga que en algunos casos no alcanza a superar el voltaje aplicado entre ánodo y cátodo. Las resistencias de colector de los transistores han sido aproximadas a 56Ω por disponibilidad en el mercado. Ver Ilustración 59, Ilustración 60 y Ilustración 61.

¹ Todos los valores están dados en centímetros

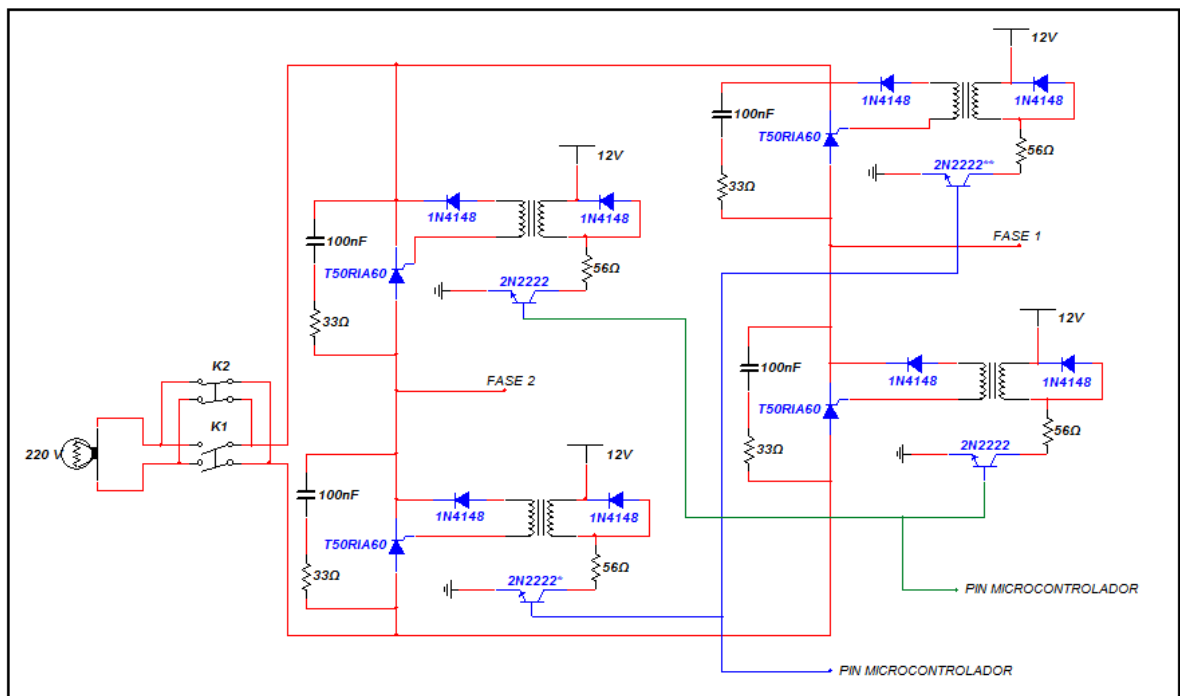


Ilustración 59. Circuito de rectificación y disparo

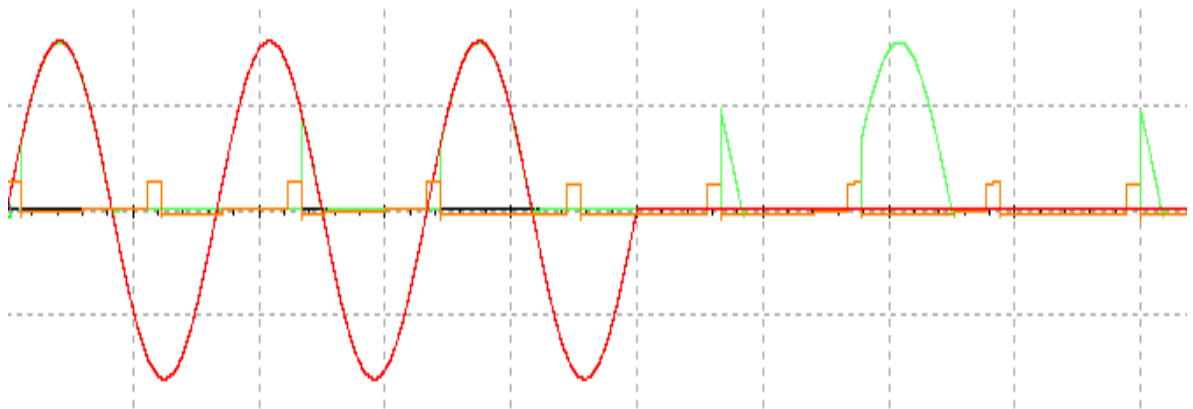


Ilustración 60. Disparo de un tiristor con generador de pulsos

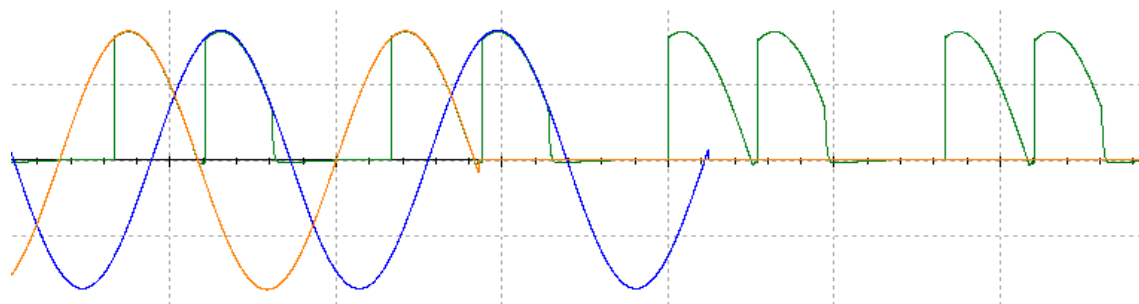


Ilustración 61. Disparo controlado de dos fases

En la tabla 3 a continuación se presentan los valores de voltaje y corriente para diversos tiempos de disparo. La carga usada es resistiva fija para disminuir al máximo las variaciones en la medición. El máximo valor de voltaje obtenido es de $183V_{DC}$ de los $187V_{DC}$ posible teóricamente.

Tiempo de disparo (ms)	Voltaje DC en carga (V)	Corriente DC en carga (A)	Corriente DC simulada en secundario (A)	Corriente AC en línea de fase (A)	Tipo de carga
0,000	183,2	0,770	3,08	0,83	Bombillo 220V 200W
1,068	175,4	0,740	2,96	0,81	
2,035	156,4	0,670	2,68	0,76	
3,017	128,6	0,580	2,32	0,69	
4,007	94,6	0,460	1,84	0,59	
5,031	60,0	0,330	1,32	0,46	
6,009	31,5	0,210	0,84	0,32	
7,020	9,8	0,100	0,40	0,15	
7,581	2,9	0,005	0,02	0,08	
0,000	178,8	5,64	22,56	6,26	Resistencia de estufa eléctrica
0,753	174,8	5,48	21,92	6,16	
1,068	171,0	5,38	21,52	6,07	
2,035	152,8	4,82	19,28	5,59	
3,017	125,9	4,00	16,00	4,85	
4,007	93,1	3,00	12,00	3,83	
5,031	59,0	1,91	7,64	2,59	
6,009	31,1	1,01	4,04	1,47	
7,020	9,74	0,31	1,24	0,50	
7,265	6,35	0,21	0,84	0,34	
7,581	2,96	0,09	0,36	0,14	

Tabla 3. Valores de voltaje y corriente en diferentes tiempos de disparo

4.4 ADQUISICIÓN Y ADECUACIÓN DE SEÑAL

4.4.1 Lectura de corriente

El transformador de intensidad utilizado es de clase 3 y cumple con la norma técnica americana. Para la verificación de su linealidad y respuesta se presenta a continuación los resultados de las pruebas con cargas predominantemente resistivas alimentadas directamente a la red eléctrica de 120V y simulando incrementos de corriente mediante el uso de vueltas de la línea de fase en el primario. La lectura en el secundario se hace con la resistencia de 0.1Ω . ver tabla 4.

I Primario	I Secundario	V secundario	Numero de vueltas	Tipo de Carga
1,65	0,12	0,012	0	1 bombillo 120V 200W
3,3	0,27	0,028	1	
4,92	0,43	0,043	2	
6,52	0,58	0,06	3	
8,2	0,74	0,081	4	
9,84	0,9	0,093	5	
3,33	0,29	0,029	0	2 bombillos 120V 200W
6,66	0,59	0,071	1	
9,99	0,89	0,092	2	
13,32	1,23	0,127	3	
16,65	1,57	0,16	4	
20,16	1,86	0,193	5	
23,52	2,2	0,226	6	
7,3	0,65	0,067	0	2 bombillos 120V 200W y termostato de estufa eléctrica
14,46	1,32	0,136	1	
21,54	1,99	0,204	2	
28,76	2,69	0,278	3	
35,85	3,37	0,352	4	
43,08	4,11	0,428	5	
50,12	4,8	0,504	6	

Tabla 4. Corriente en el primario y secundario según el número de vueltas

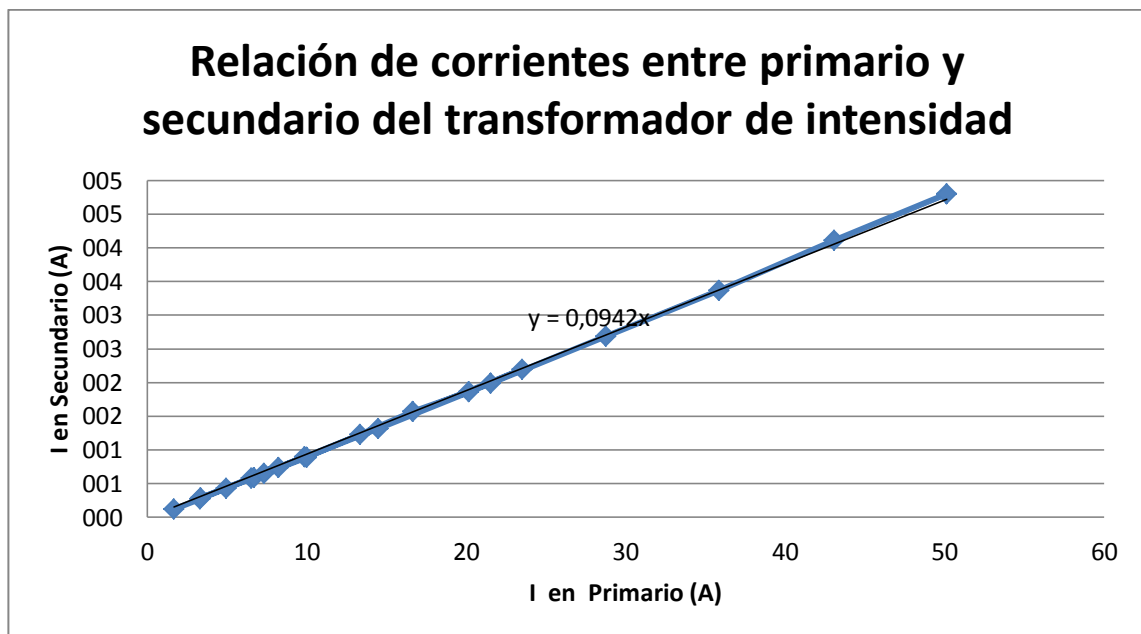


Ilustración 62. Relación de corriente entre primario y secundario del transformador de intensidad

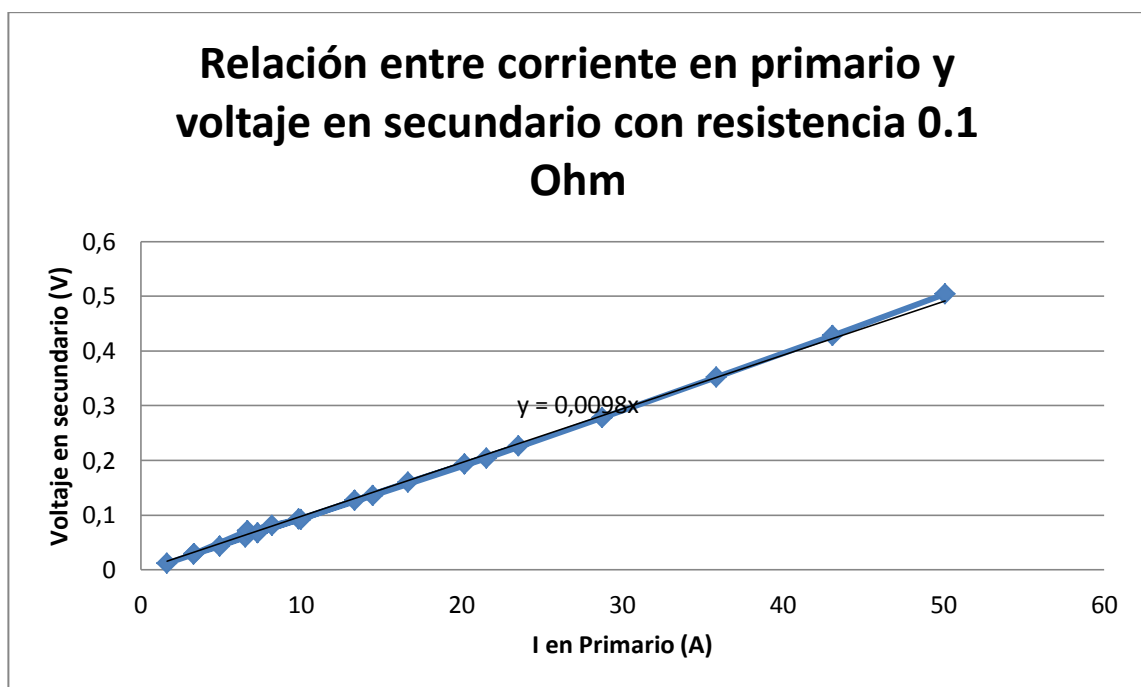


Ilustración 63. Relación entre corriente en primario y voltaje en secundario con resistencia de 0.1 Ohm

Las líneas de tendencia lineal evidencian una relación aproximada de 0.1 entre la corriente en el primario y la corriente en el secundario, al igual que una relación de aproximadamente 0.01 entre la corriente medida en el primario y su equivalente de

voltaje en la resistencia del secundario del transformador. Ver Ilustración 62 y Ilustración 63.

4.4.2 Amplificación de Señal con Amplificador Operacional

La señal de entrada debe ser amplificada 17 veces aproximadamente para que cumpla con los requerimientos de voltaje de entrada al microcontrolador, anulando los efectos atenuadores que sufre en el paso por los diversos circuitos que componen la etapa de adecuación de señal. Ver Ilustración 64.

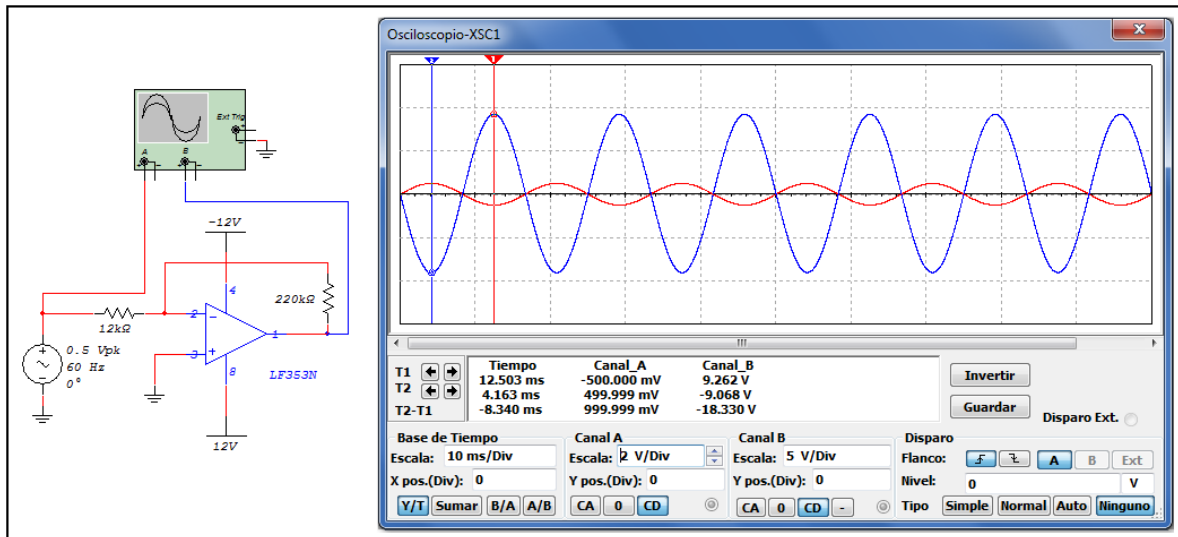


Ilustración 64. Circuito de amplificación y simulación

Los valores de resistencia utilizados suponen una amplificación de 20 veces, pero las mediciones demuestran una amplificación real de 17 veces que se adecuan perfectamente al valor deseado en la entrada ADC del microcontrolador.

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{220K\Omega}{12K\Omega} = -20$$

Las pruebas realizadas con una señal sinusoidal desde un generador de señales en el circuito final se presentan a continuación para asegurar una linealidad en la medida. Ver tabla 5.

Vin	Vout	Valor Amplificación
0,5	8,70	17,4
0,4	6,75	16,9
0,3	5,12	17,1
0,2	3,56	17,8
0,1	1,76	17,6

Tabla 5.Comparativa de voltajes medidos y calculados

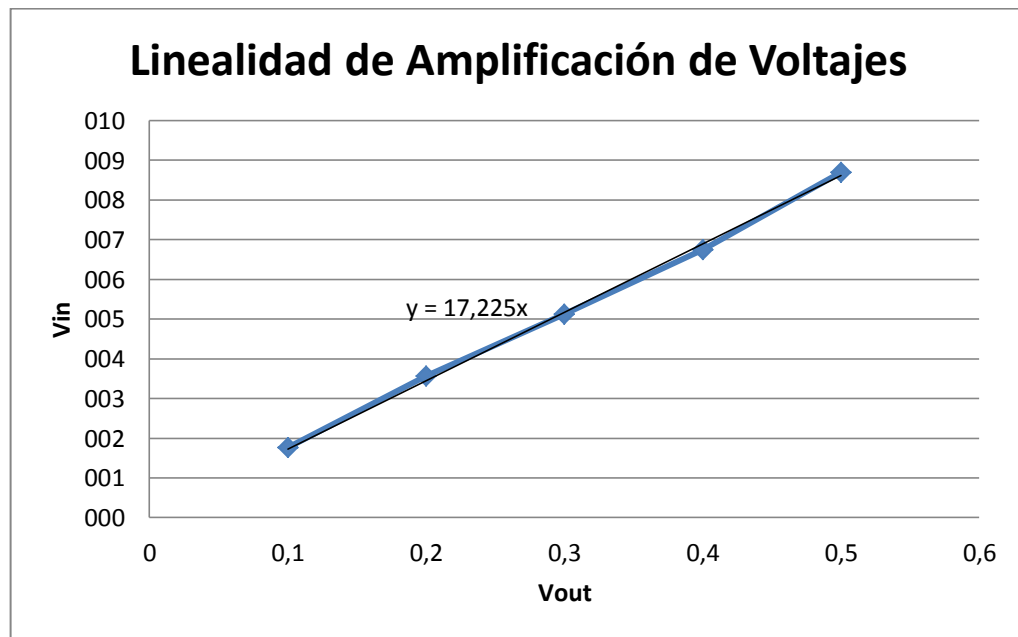


Ilustración 65. Linealidad de amplificación de voltajes

La ilustración 65 evidencia una tendencia lineal de amplificación en el circuito y por tanto garantiza uniformidad en la medida.

4.4.3 Rectificador De Precisión

Como se observa en la ilustración 66 e Ilustración 67, la simulación de esta etapa se presenta como un paso casi perfecto de la señal de alterna a continua, sin embargo en la práctica el ciclo positivo sufre una atenuación mayor que el ciclo negativo rectificado, debido principalmente a la tolerancia de las resistencias que desbalancea ligeramente el circuito.

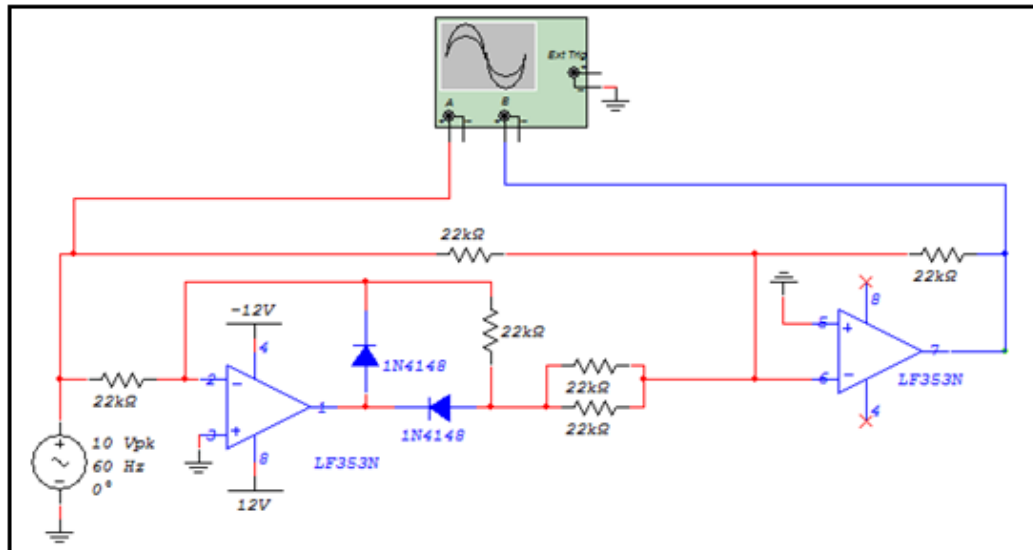


Ilustración 66. Circuito rectificador de precisión

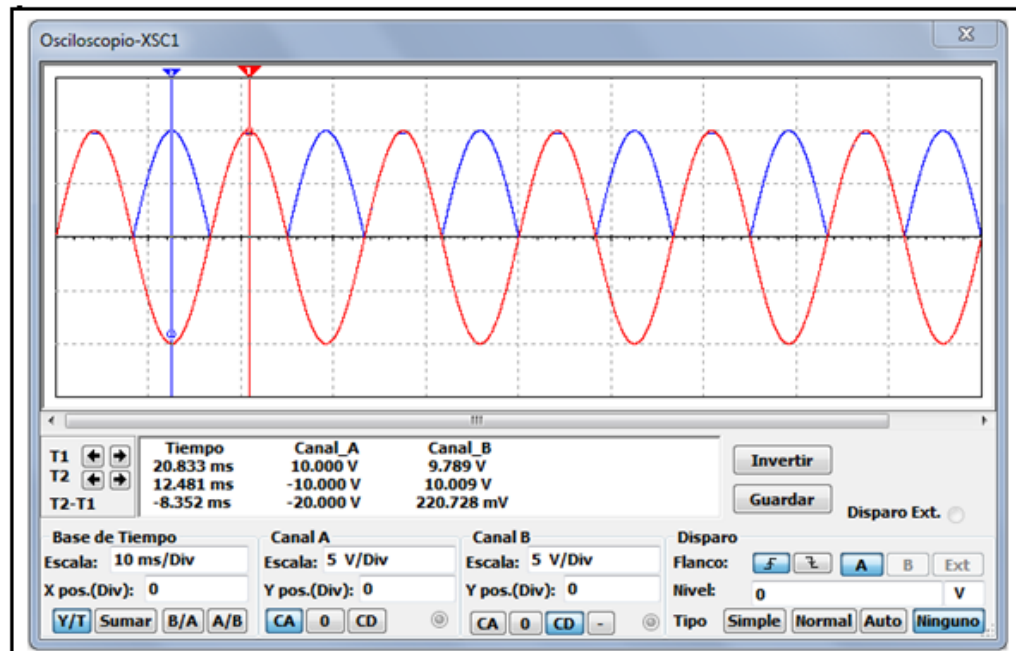


Ilustración 67. Simulación del circuito rectificador de precisión

La Ilustración 68, permite visualizar el efecto atenuador en el ciclo positivo de la señal de entrada.

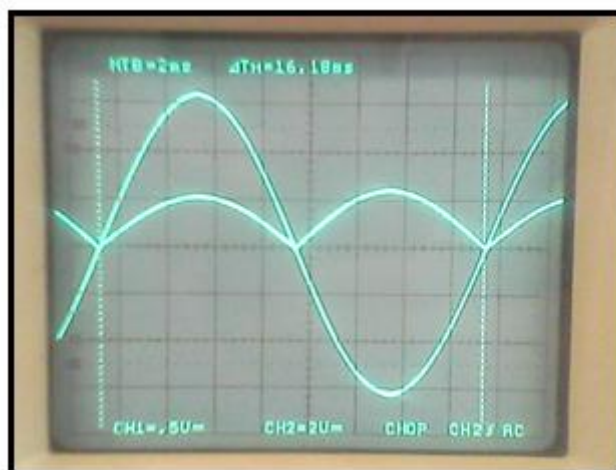


Ilustración 68. Visualización del efecto atenuador en la señal

Se hacen pruebas para verificar las consecuencias del desbalanceo en la señal. Esta señal es filtrada posteriormente, por lo tanto es adecuado considerar el voltaje de salida como un promedio entre los voltajes de los dos ciclos. Ver tabla 6.

Amplitud voltaje Entrada (V)	Amplitud voltaje ciclo negativo (V)	Amplitud voltaje ciclo positivo (V)	Promedio Voltajes (V)	Fuente de señal
8,00	8,36	6,70	7,53	Generador de funciones
6,00	6,30	5,22	5,76	
4,00	4,00	3,36	3,68	
2,00	1,98	1,68	1,83	
2,86	2,86	2,42	2,64	Amplificador de realimentación A & A
3,80	3,80	3,30	3,55	
6,55	6,55	5,45	6,00	
8,65	8,65	7,30	7,98	

Tabla 6. Comparativa de voltajes

La Ilustración 69 demuestra equilibrio en el valor final de la salida, para cerciorar una medición precisa en todo el rango de valores usados.

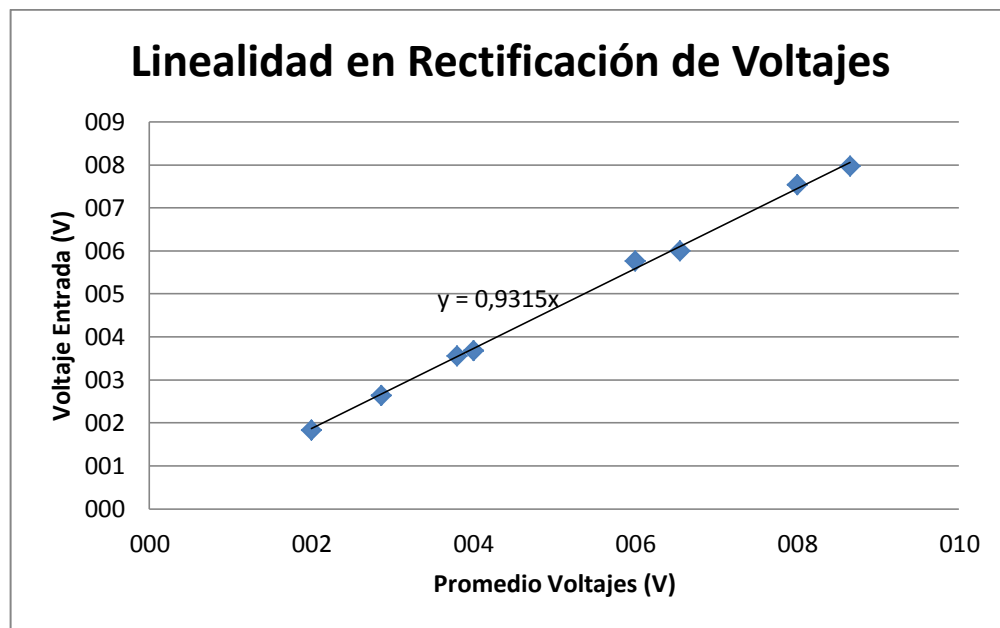


Ilustración 69. Linealidad en rectificación de voltajes

4.4.4 Filtro Pasabajas

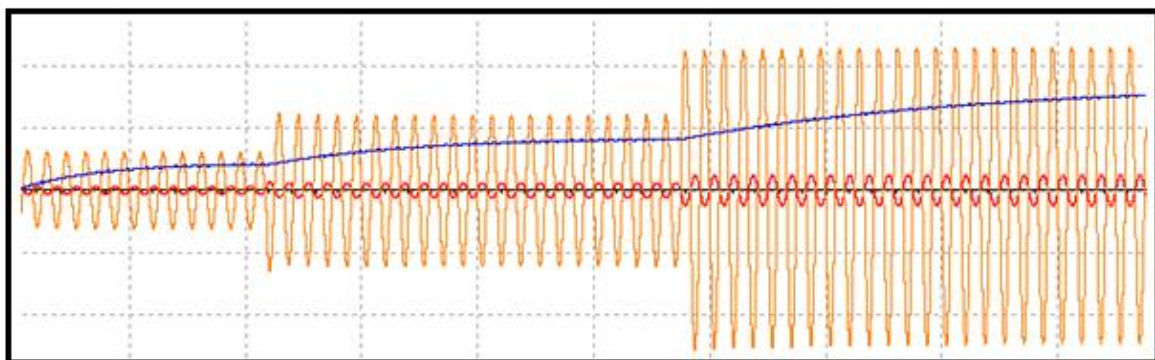


Ilustración 70. Simulación de entrada versus salida del filtro

La señal filtrada con condensador no es lo suficientemente pura en DC ya que la oscilación presente es de aproximadamente 20mV, lo cual no es aceptable para la escala de valores manejada en el conversor análogo digital, por tanto es necesario hacer uso de un filtro más potente en la atenuación de frecuencias bajas cercanas a los 60Hz. Ver Ilustración 70 y Ilustración 71.

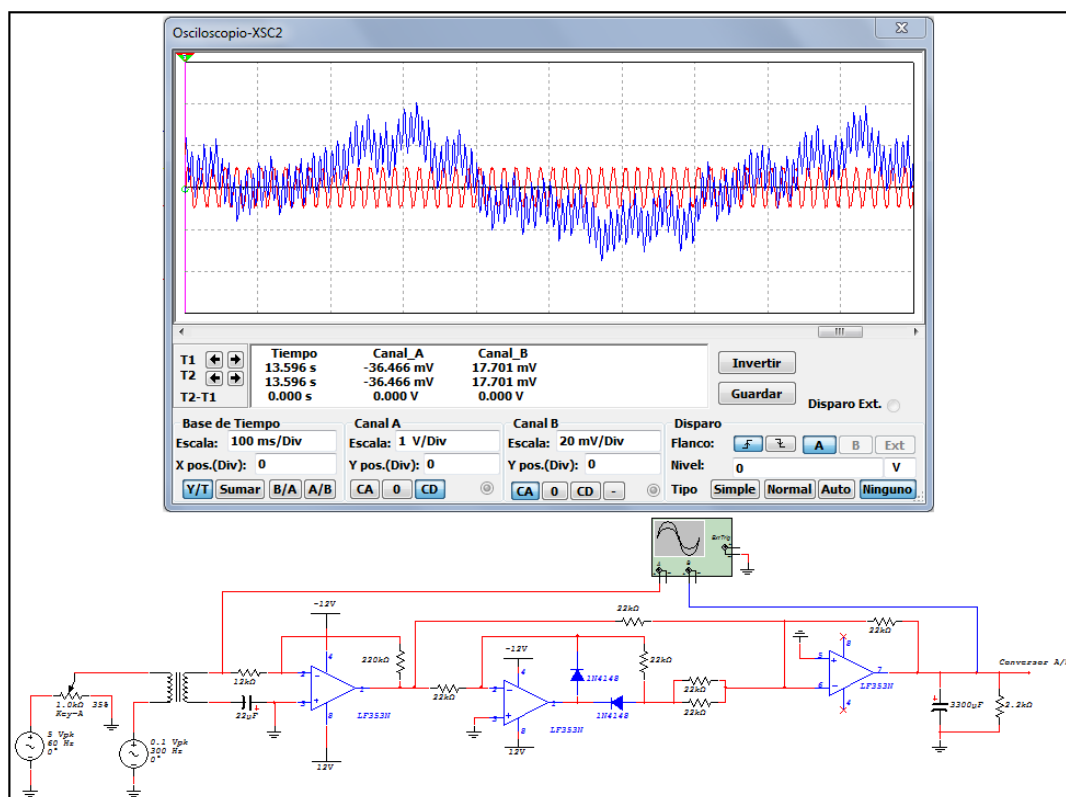


Ilustración 711. Circuito propuesto para la etapa de adquisición y adecuación de señal

El filtro activo es mucho más selectivo en el paso de frecuencias, permitiendo una señal estable de DC para la lectura del conversor análogo-digital del microcontrolador y evitando así descontrol en el manejo de la realimentación de corriente. Véase Ilustración 72.

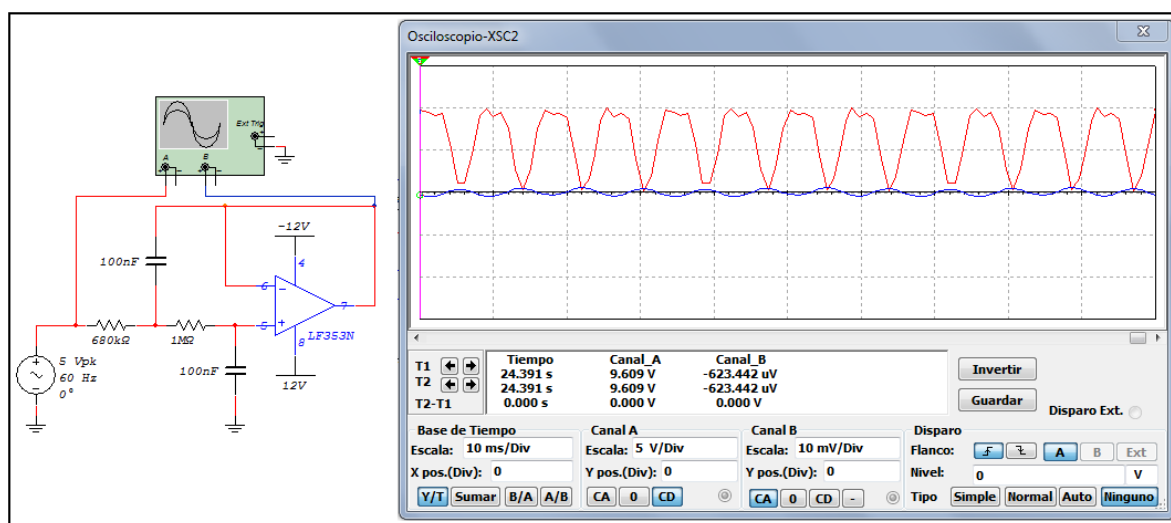


Ilustración 72. Circuito del filtro Sallen Key

La teoría de filtros asume la frecuencia de corte en el punto donde la señal ha decaído -3 dB, que en la práctica es medido en una frecuencia de aproximadamente 1.6 Hz. Ver Ilustración 73.

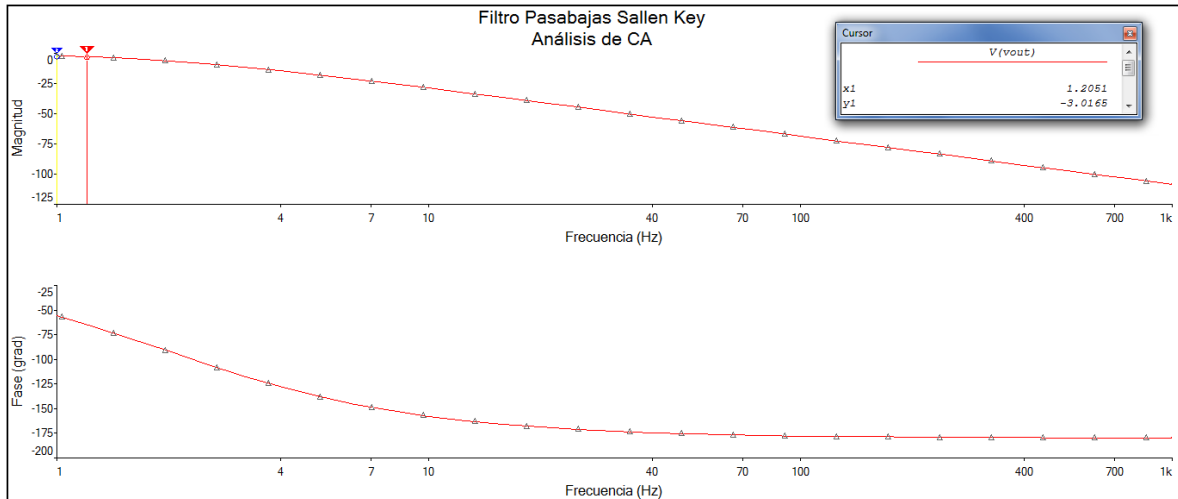


Ilustración 73. Análisis de frecuencia del filtro Sallen Key

En la Ilustración 74, se aprecia el cambio de nivel de DC para amplitudes distintas de entrada.

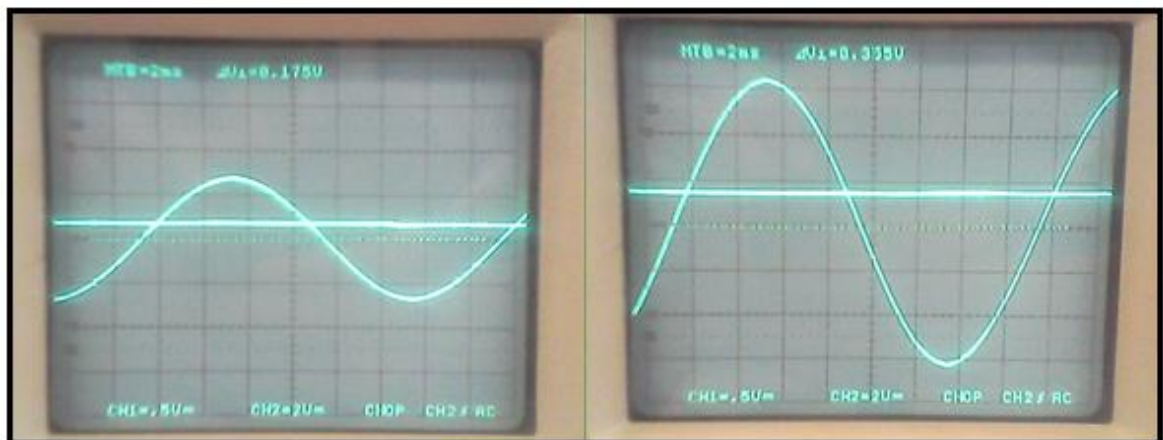


Ilustración 74. Entrada y salida del filtro

A continuación se presenta una gráfica con toda la etapa de adquisición y adecuación de señal de corriente en el electrocoagulador. Por seguridad se disponen dos diodos y una resistencia que protegen el pin de entrada del microcontrolador en caso de presentarse corrientes elevadas fuera del rango establecido. Ver Ilustración 75.

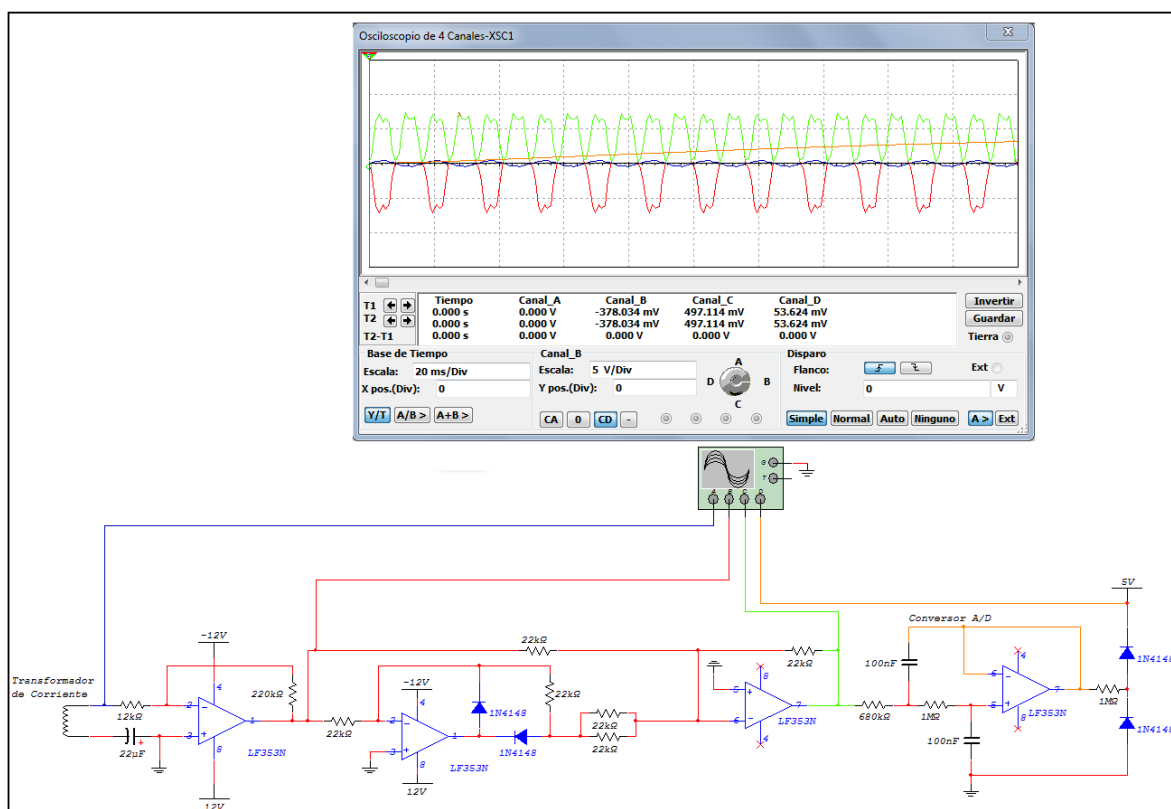


Ilustración 75. Diseño del circuito final para la etapa de adquisición y adecuación de señal

Para la calibración de las medidas en el conversor análogo-digital del microcontrolador, se toman valores distintos de corriente en la carga variando el ángulo de disparo desde el mismo controlador y se mide el voltaje DC arrojado por el filtro. La máxima corriente para la que se hizo el diseño es de 25 A y equivale a 4.5 V; si la lectura sobrepasa los 4.8 V es considerado anormal y el sistema recurre a una protección por software que apaga el sistema para evitar daños en los dispositivos.

Corriente DC en secundario (A)	Voltaje salida Etapa A & A (V)
0,02	0,055
0,36	0,085
0,40	0,086
0,84	0,167
0,84	0,170
1,24	0,250
1,32	0,249
1,84	0,330

2,32	0,396
2,68	0,452
2,96	0,492
3,08	0,512
4,04	0,750
7,64	1,385
12,00	2,100
16,00	2,790
19,28	3,320
21,52	3,690
21,92	3,780
25,00	4,480

Tabla 7. Valores obtenidos para el voltaje de salida en la etapa de adecuación y adquisición de señal

La ilustración 76 demuestra una relación lineal entre la corriente en la carga y el voltaje a la salida de esta etapa, incluyendo los valores más bajos donde los transformadores de corriente suele tener un comportamiento ligeramente exponencial.

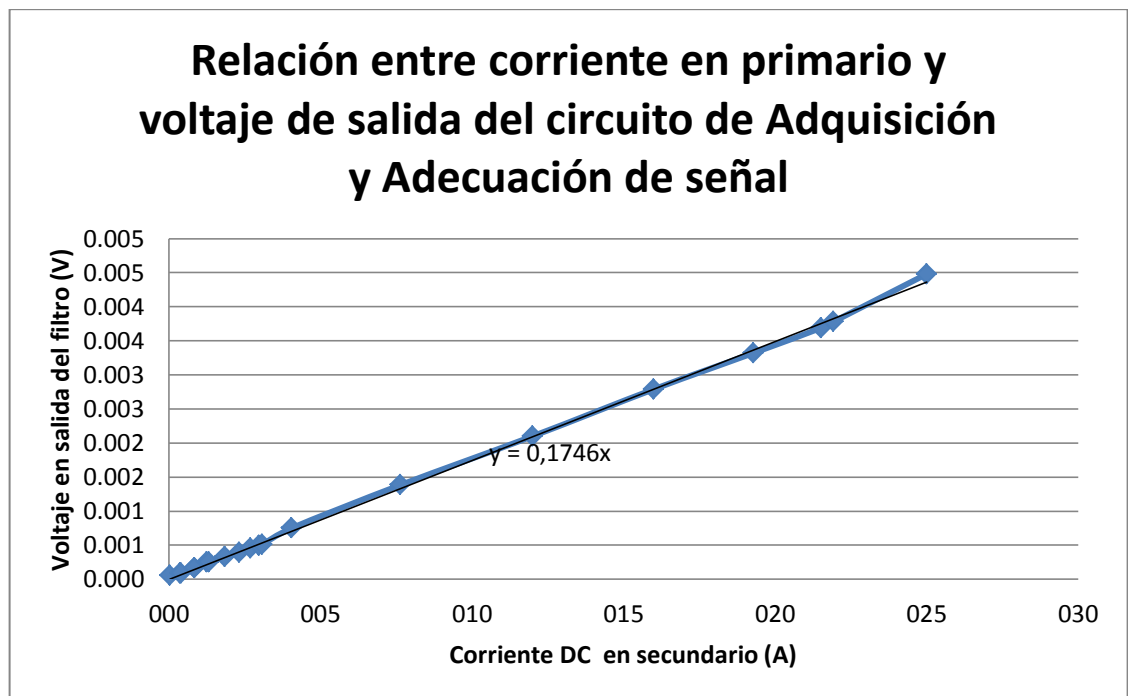


Ilustración 76. Relación entre la corriente en el primario y el voltaje de salida del circuito de adquisición y adecuación de señal

4.5 CONTROLADOR

4.5.1 Detección De Cruce Por Cero

La ilustración 77 representa los puntos de cruce de las señales de fase (rojo y naranja) que son los puntos de cruce por cero de la señal en la carga (azul) donde se emite un pulso desde el circuito de detección de cruce por cero (verde).

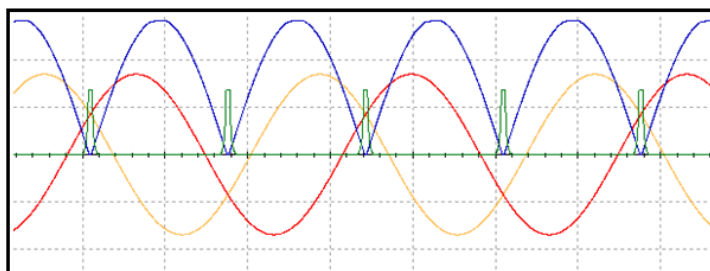


Ilustración 77. Simulación de la detección del cruce por cero

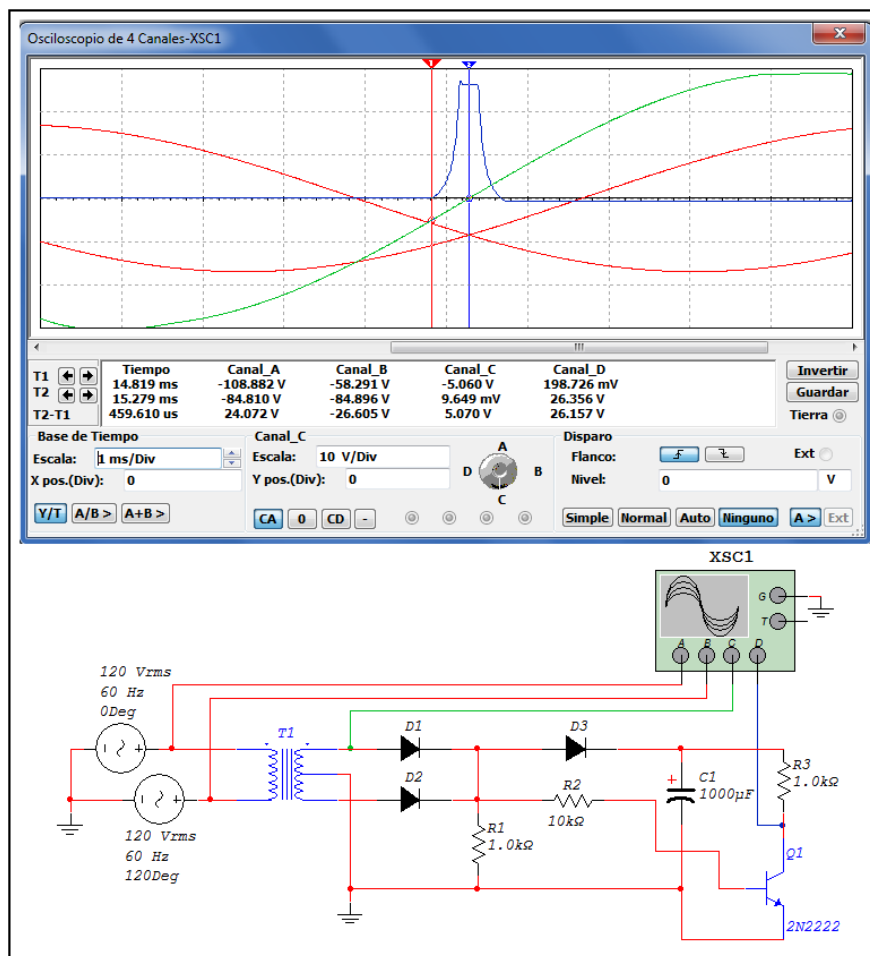


Ilustración 78. Circuito de detección de cruce por cero propuesto

Como se aprecia en la ilustración 78, el circuito de cruce por cero con diodos tiene un retraso considerable en la emisión del pulso de detección, más evidente en la Ilustraciones 79 y Ilustración 80 a continuación.

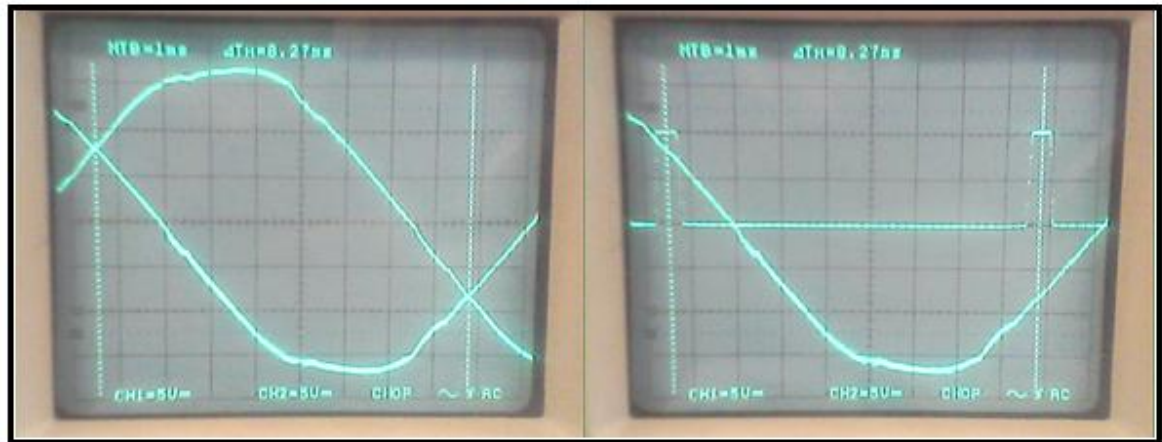


Ilustración 79. Prueba del circuito de cruce por cero propuesto inicialmente

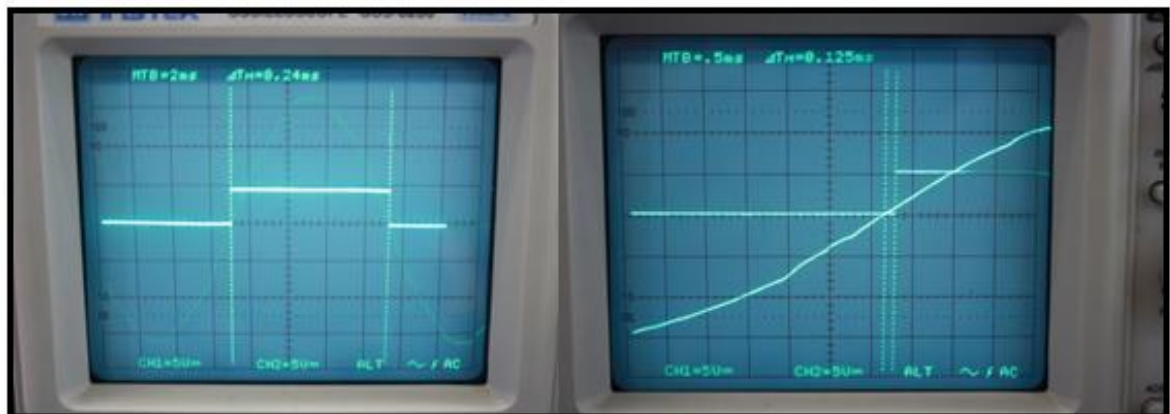


Ilustración 80. Prueba para la medición del retraso de cruce por cero

El retraso que se presenta con este circuito (0,125 ms) afecta de manera considerable la sincronización de todo el sistema si se tiene en cuenta que la duración de la señal es de 8.3 ms. Los comparadores solucionan este problema de manera que el retraso es del rango de nanosegundos, de manera que se puede ser muy preciso en el disparo de los tiristores. A continuación se presenta el circuito (ver Ilustración 81) que acompaña el comparador, agregando un diodo a la salida para conseguir pulsos positivos únicamente, ya que los negativos dañan las entradas del microcontrolador. Del pulso solo se toma el flanco positivo que indica el inicio del ciclo positivo de la señal.

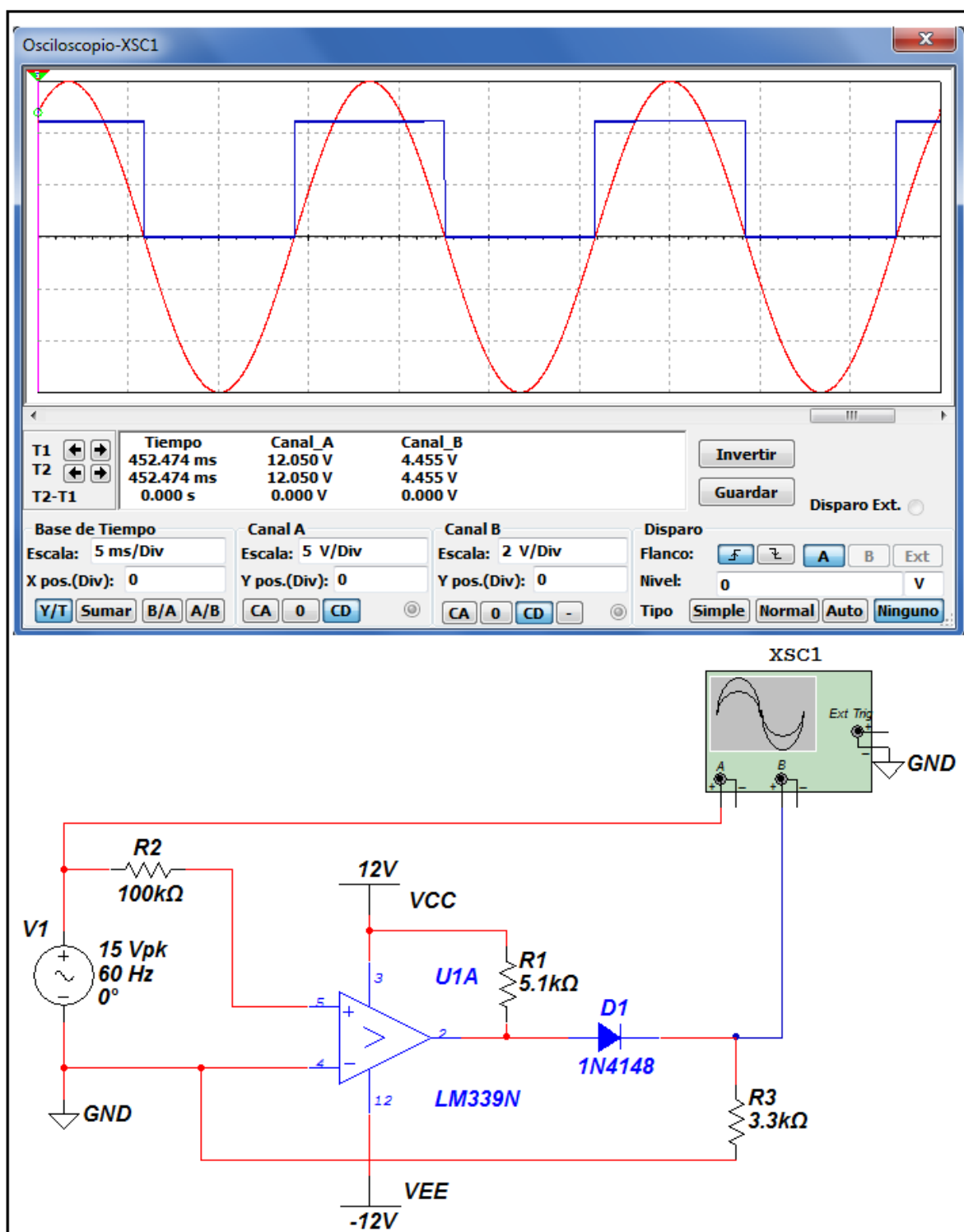


Ilustración 81. Simulación del circuito de cruce por cero



Ilustración 82. Verificación del cruce por cero

4.5.2 Aplicación microcontrolada

El programa alojado en el microcontrolador está dividido por secciones de acuerdo a la función que cumplen en el sistema, cada diagrama de flujo posee variables que se definen inicialmente y cambian en el transcurso del proceso. Los valores de arranque para el entendimiento de los diagramas son estos:

K1_encendido = 1 (SI)
 Continuar = 1 (SI)
 Invertir = 1 (SI)
 Arranque = 0 (NO)
 Menú_teclado = 1 (inicial)
 Validación_activa = 1 (SI)
 Ciclo_positivo = 1 (SI)
 Arrancando = 1 (SI)
 Posición_tabla = 0
 T1 = 8,33 ms
 T3 = 1 seg
 Interrupción_teclado = ON

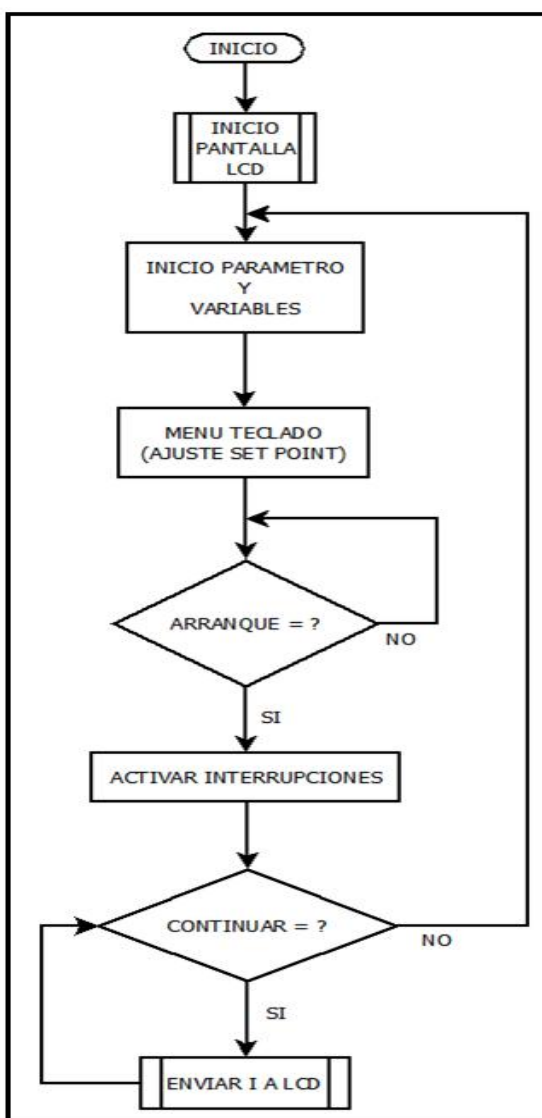


Diagrama de Flujo 1. Ciclo inicial

INICIO es el lugar a donde llega el programa una vez se energiza el sistema. En primer lugar se configura la parte de hardware, organizando los puertos como entradas o salidas y configurando la pantalla LCD. Luego se inician las variables que usan las subrutinas y se procede a enviar la primera pantalla de bienvenida, seguida por el menú de inicio que permite la navegación por los ajustes previos del sistema. Una vez llegue la orden de arranque se activan las interrupciones, que permiten la supervisión de todas las etapas del sistema electrocoagulador y sincronizan el proceso. Finalmente se llega a una bucla que permanece hasta que se detenga el tratamiento por una orden interna o externa, durante el tiempo de funcionamiento desde aquí se actualizan los datos en la pantalla LCD.

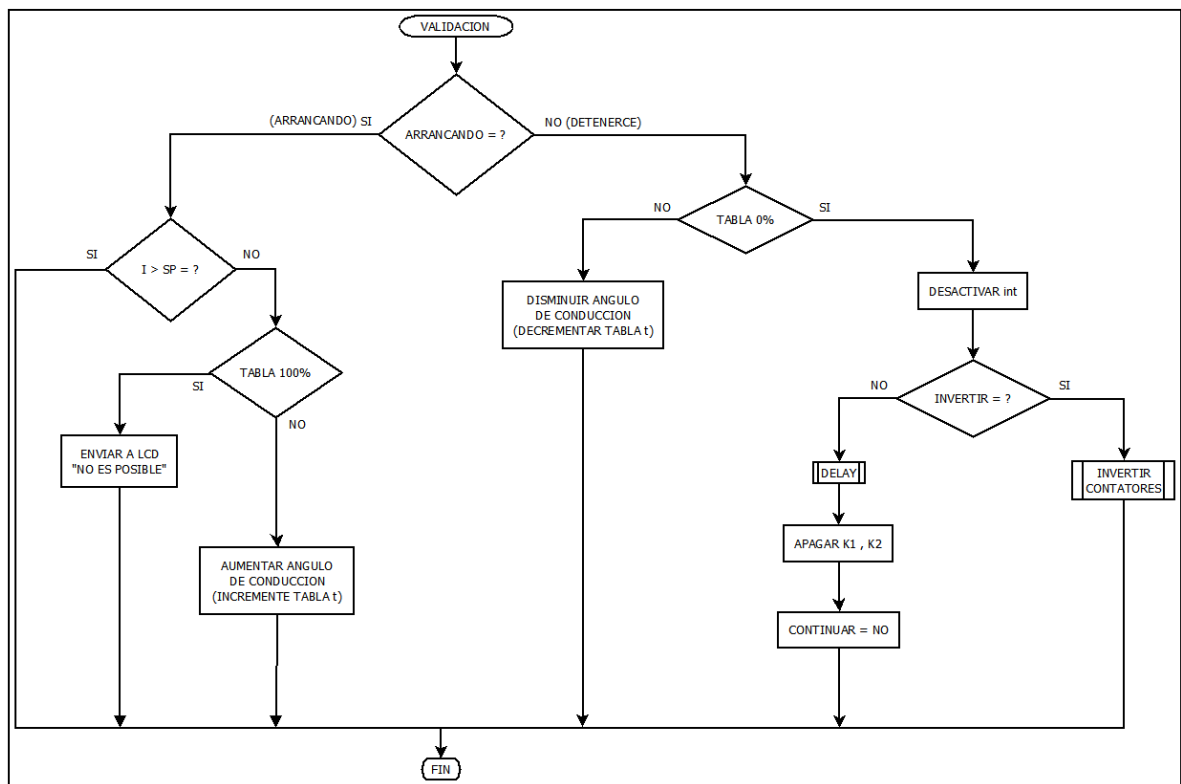


Diagrama de Flujo 2. Ciclo de validación

VALIDACION hace la comparación de la corriente medida y el set point ajustado. Si la validación se hace arrancando (en rampa de subida) se verifica que la corriente haya alcanzado el valor de setpoint, de no ser así se aumenta el ángulo de conducción incrementando una posición en la tabla de tiempos de disparo; en caso de llegar al máximo de la tabla se emite un mensaje de notificación indicando que la conductividad es demasiado baja y no es posible alcanzar el nivel de corriente deseado, esto también ocurre cuando el agua se encuentra libre de elementos en suspensión. Si la corriente ha sobrepasado el set point se continúa sin cambios esperando a que la conductividad del agua disminuya y se deba aumentar nuevamente el ángulo de disparo.

Si la validación se hace deteniéndose (en rampa de bajada) se decrementan las posiciones en la tabla sin necesidad de realimentación, una vez llegado al mínimo se hace la inversión en los contactores o se detiene totalmente dependiendo de dónde llegue la orden.

Como se ha dicho anteriormente los tiristores del puente rectificador se disparan en pares dependiendo del ciclo de la señal que se sincroniza con el detector de cruce por cero. Igualmente la inversión se realiza cumplidos cinco minutos apagando el contactor usado y encendiendo el siguiente como se muestra en la ilustración 44. Los diagramas de flujo son los siguientes:

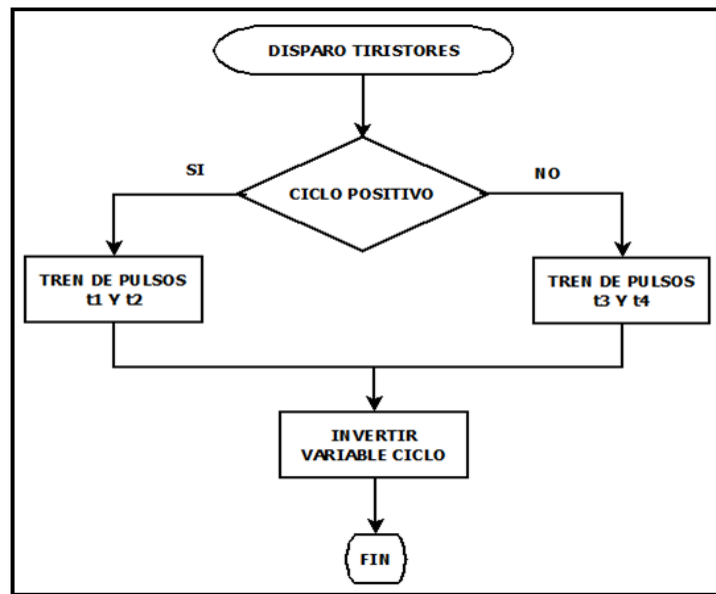


Diagrama de Flujo 3. Ciclo de disparo de los tiristores

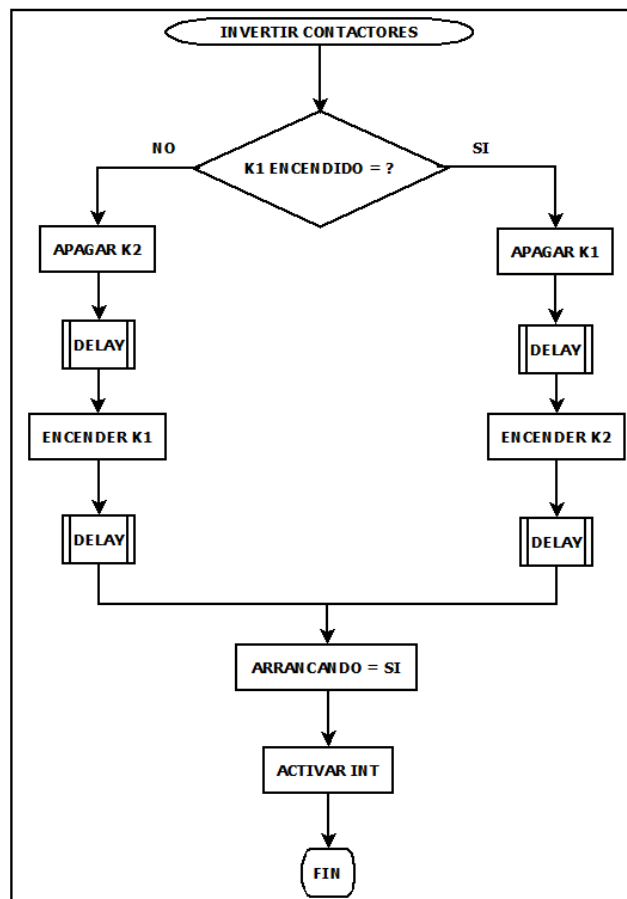


Diagrama de Flujo 4. Ciclo de inversión de los contactores

Todas las interrupciones disponibles son manejadas en este punto donde se envían llamadas a las subrutinas.

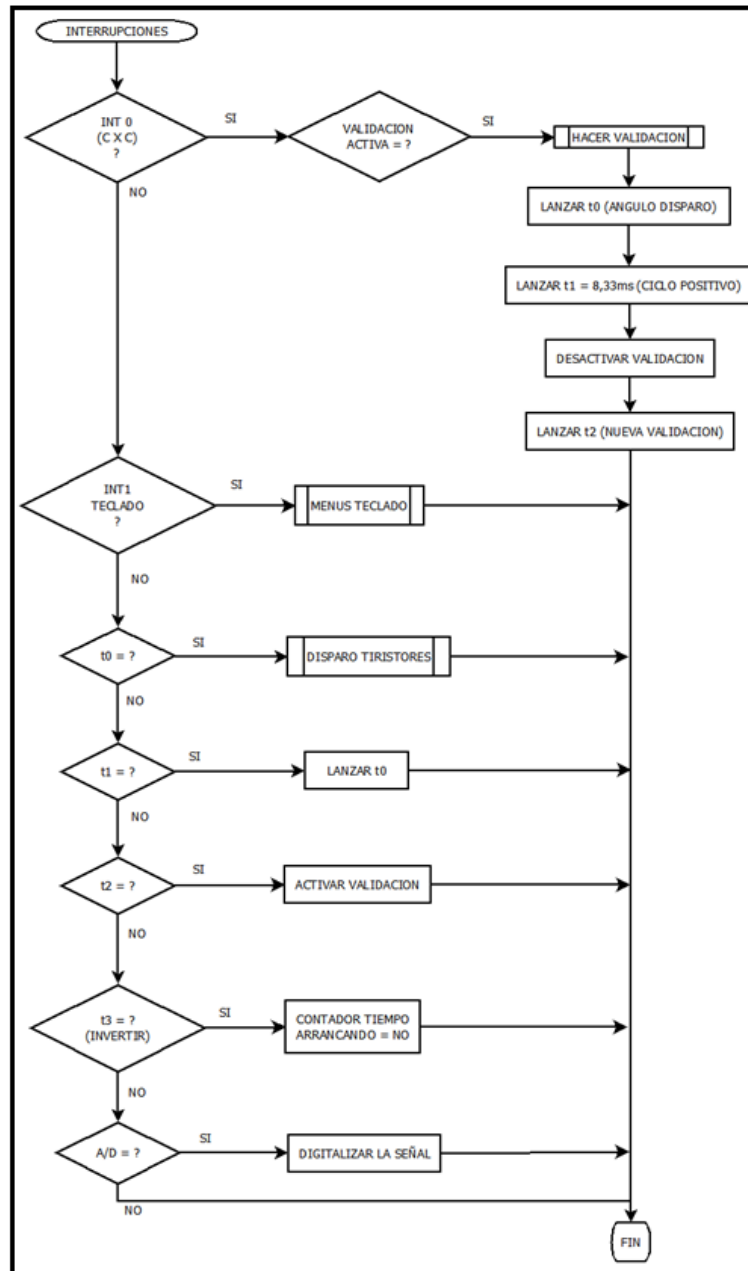


Diagrama de Flujo 5. Ciclo de las interrupciones

El temporizador t2 es la constante de integración que maneja los intervalos de tiempo para la comparación entre la corriente en la carga y el set point, por medio de la activación de la interrupción de cruce por cero. La interrupción INT0 que maneja el cruce por cero lanza la subrutina de VALIDACIÓN, que fija un valor de tiempo de disparo en t0 para el disparo en el ciclo positivo, activa t1 (duración del

ciclo positivo e inicio de ciclo negativo) y una vez desbordado se hace el disparo para el ciclo negativo, desactivando el INT0 en espera de una nueva validación.

El temporizador t3 se desborda cada segundo para llevar el conteo del tiempo que se muestra en la pantalla LCD y 300 segundos después (5 minutos) envía la orden de inversión cambiando la variable arrancando. Este conteo de segundos también permite establecer tiempos fijos de duración del proceso completo.

La interrupción de A/D es la que permite hacer la lectura de corriente con el tiempo de muestreo fijado al inicio. La interrupción INT1 indica una pulsación en el teclado y lanza un menú de teclado según la variable menú_teclado que guarda un número decimal indicando cual es el menú correspondiente. Este juego de menús se presenta a continuación y se acompaña de un diagrama de estados que ilustra la forma en la que se recorren de acuerdo con la opción tomada para cada caso:

MENÚ DE TECLADOS

Menús de ajuste

1. F1 Ajuste básico
F2 Ajuste avanzado
2. F1 Ajustar SetPoint
F2 Rampa 100% - (setpoint = 100)
3. F1 Aumentar decenas
F2 Aumentar unidades
ENTER aceptar
4. F1 Velocidad normal – ($t2 = x(0,5\text{seg})$)
F2 Velocidad lenta – ($t2 = y(1,0\text{seg})$)
5. F1 Tiempo definido
F2 Tiempo indefinido
6. F1 Aumentar decenas
F2 Aumentar unidades
ENTER aceptar
7. ENTER Arranque

Menus de operación

8. F1 Mantener – (setpoint = Pos_tab actual)
F2 Detener – (Arrancando = No detenerse
Invertir = No)
9. F1 Continuar rampa – (setpoint = 100)
F2 Detener
10. ESC – (Llamar validación
Invertir = No
Tabla = 0%)

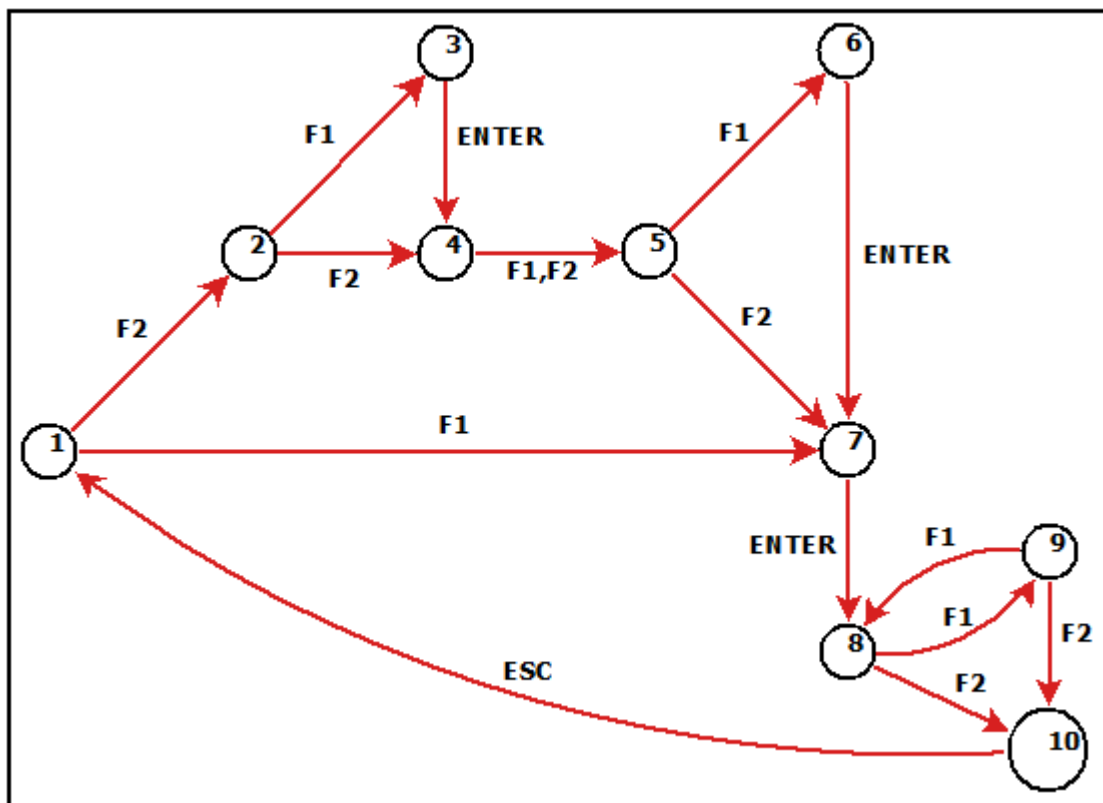


Diagrama de Flujo 6. Diagrama de estados de teclados

5. CONCLUSIONES

- Se logró hacer una investigación exhaustiva de los procesos de coagulación y electrocoagulación, permitiendo comprobar que la electrocoagulación es un método tecnológico emergente alternativo muy prometedor para el tratamiento de aguas residuales. Este procedimiento brinda un potencial muy grande debido a la remoción de diversos contaminantes introducidos en el agua.
- Es evidente que la información más relevante en este tema es el conocimiento de electroquímica, química interfacial, química acuosa y física. En muchos casos los procesos son de manera empírica y artesanal, por ello el desarrollo de un sistema microcontrolado para el manejo de la potencia en el reactor facilita la realización de pruebas debido a que une de manera integral las herramientas que permiten la optimización del uso energético.
- Es posible diseñar y especificar un tanque para el electrocoagulator con métodos experimentales debido a la falta de una teoría establecida que certifique una metodología específica para su construcción.
- El espacio de instalación de una planta de electrocoagulación es muy reducido comparando con una planta biológica.
- La planta de electrocoagulación es de muy fácil operación y control. Lo cual requeriría una capacitación de muy fácil aprendizaje para un operario.
- El desgaste de los electrodos del equipo está directamente relacionado con la corriente aplicada al sistema.
- Al utilizar la electrocoagulación se elimina el uso de productos químicos y los requerimientos de almacenamientos para los mismos.
- El equipo que se empleó para la ejecución de los tratamientos de las aguas residuales, corresponde a una celda electroquímica tipo Batch a escala de laboratorio con una configuración bifásica, este prototipo permitió evaluar la eficiencia del proceso de electrocoagulación empleando electrodos de hierro y aluminio, la distancia entre electrodos es de 2 cm, la capacidad del reactor es de 15 litros y el área específica de las placas es de 400 cm².

- Se eligió trabajar con un reactor tipo Batch ya que este trata un volumen fijo por ciclo, a diferencia de un tipo continuo que necesita un volumen de agua mucho mayor debido al flujo de líquido constante.
- La electrocoagulación es un proceso muy eficaz para eliminar los sólidos en suspensión y la turbidez de aguas residuales mediante el uso de electrodos de Al y Fe.
- La alta conductividad del medio acuoso, favorece el proceso de electrocoagulación.
- El cambio de la polaridad en las placas evita desgastar los electrodos por una sola cara, esto lo hace eficiente ya que se oxidan de manera uniforme; lo que no ocurriría donde no se hubiese implementado esta herramienta.
- El proyecto tiene un enfoque industrial, debido a esto los materiales utilizados para la parte de potencia son capaces de trabajar hasta los 40 amperios, pero el proyecto tan solo utiliza 25 amperios porque para este valor fue su diseño; el aumento de la potencia solo requiere pequeños cambios en el programa del microcontrolador.
- El circuito de cruce por cero debe ser muy preciso para lograr sincronización y por ello es indispensable el uso de un comparador. Es igualmente indispensable que se identifique el ciclo de la señal en la que se encuentra para poder hacer el disparo en los tiristores correctos.
- La medición de la corriente para la realimentación no se debe hacer directamente en la carga porque el aislamiento de la parte digital y análoga es demasiado complicada. El aislamiento previene daños en la parte digital causados por los niveles de voltaje usados en la etapa de potencia.
- Es necesario el uso de un transformador de corriente de calidad, que tenga suficiente linealidad en la mayor parte de su curva de comportamiento, disminuyendo al máximo la respuesta exponencial en los puntos de saturación e inicio. Por ello es adecuado usar todo el rango de trabajo, para minimizar los rangos de no linealidad.

- El uso de rampas de subida y bajada evitan acumulación de energía en la carga que impidan el disparo de los tiristores y estrés eléctrico en los dispositivos electrónicos.
- El uso de amplificadores operacionales reduce considerablemente las pérdidas de señal en valores pequeños, por ello es necesario su uso en las aplicaciones de medición que en su mayoría manejan rangos ínfimos.
- Es imprescindible el uso de un filtro activo bastante selectivo para obtener un nivel de DC aceptable para el conversor análogo-digital del microcontrolador ya que los tiristores inducen ruido eléctrico en una frecuencia alrededor de 60 Hz, muy cercana a DC y por tanto difícil de eliminar.
- Se debe asegurar la disipación de potencia en todos los dispositivos debido a la susceptibilidad de destrucción por uso de corrientes elevadas.

5.1 TRABAJO FUTURO

- El PIC utilizado tiene como una de sus características un módulo de comunicación CAN, este puede ser utilizado para realizar futuras actualizaciones implementando sistemas de monitoreo computarizado.
- Para una aplicación industrial que disponga de línea trifásica, se puede adecuar el puente rectificador controlado para hacer mejor uso de la potencia.
- Es indispensable la integración de otras ramas de ingeniería, como por ejemplo la de agroindustrial e industrial, que permitan el avance de los estudios, la utilización y divulgación de este tipo de alternativas.
- Se debe realizar un modelamiento que permita reproducir los resultados del tipo Batch al continuo de manera precisa.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A-C current transformer functional with a d-c current component present (United States Patent 6954060). Edel, Thomas G. 2005. Pág 2. [En línea]. [Consultado 20 de Agosto 2010] <http://www.freepatentsonline.com/6954060.pdf>
- [2] ALI MAZDI, MCKINLAY, CAUSEY. PIC Microcontroller and Embedded Systems. 2008. Pág. 476.
- [3] ARBOLEDA VALENCIA, Jorge "Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua" pp. 20-43. 1982.
- [4] BARTON, Geoffrey W.; HOLT, Peter K. and MITCHELL, Cynthia A. The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. En: Chemosphere. Vol. 59, No. 3 (abr. 2005); p. 355-367.
- [5] COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN. [en línea]. [Citado 24 de Agosto 2010]. Pag. 3 Disponible en: http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema5.pdf
- [6] CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL MAGDALENA. Decreto 1299 de 2008. [en línea]. [Citado 24 de Agosto 2009]. Disponible en: http://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Decreto1299_20080422.htm
- [7] COUGHLIN, Driscoll. Amplificadores operacionales y circuitos integrados 5 ed. 1999. Pag 199
- [8] DAWES. Chester L. Electricidad industrial, volume 2. Pag. 268
- [9] DESESTABILIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS COLOIDALES, pag 3 [En línea]. [Consultado 25 de Agosto 2010] <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacd/scan/002320/002320-02b.pdf>
- [10] DESESTABILIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS COLOIDALES, Tema 2, Pág. 39. [En línea]. [Consultado 22 Agosto 2010]. Disponible en internet: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan/002320/002320-02b.pdf>
- [11] EL ESPECTADOR. Colombia sólo trata 9% de sus aguas residuales. [en line]. 25 Septiembre 2008. [Citado 24 de Agosto 2009] Disponible en: <http://www.elespectador.com/impreso/articuloimpreso-colombia-solo-trata-9-de-sus-aguas-residuales>

- [12] EL TIEMPO. Producción limpia una rentable alternativa. [en línea]. [Citado 24 de Agosto 2009]. Disponible en :http://www.eltiempo.com/verde/produccion-limpia-una-rentable-alternativa_4542995-1
- [13] HOLT, Peter K.; BARTON, Geoffrey W. and MITCHELL, Cynthia A. The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. En: Chemosphere. Vol. 59, No. 3 (Abr. 2005); p. 358
- [14] KOBAYASHI Mehmet, Orhan Taner Can, Mahmut Bayramoglu. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and .aluminum electrodes.
- [15] MINISTERIAL DECLARATION [En línea]. [Consultado 27 de Agosto 2010] http://www.worldwaterforum4.org.mx/uploads/TBL_DOCS_17_29.pdf
- [16] MOLLAH., Mohammad et al. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. En: Journal of Hazardous Materials. Vol. 114, No.1-3 (Oct. 2004); p. 202.
- [17] PALLAS-ARENY, Valdes-Perez. Microcontrollers, Fundamentals and Applications with PIC. 2009. Pág. 2.
- [18] -----,-----, Pág. 4.
- [19] -----,-----, Pág. 17.
- [20] PROCESOS DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES 2009-2010 - TEMA 5, página 12. [En línea]. [Consultado 22 Agosto 2010]. <http://www.scribd.com/doc/25943804/Coloides-Soluciones-y-Emulsiones>
- [21] PROTOS. 3er Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre los recursos del Agua (WWDR-3). [en línea]. Abril 2009. [Citado 24 de Agosto 2009] Disponible en: <http://www.protos.be/protosh2o/aqua-del-mundo/3er-informe-mundial-de-las-naciones-unidas-sobre-los-recursos-del-agua-wwdr-3>
- [22] RASHID, Muhammad H. Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones 2 ed. 1995. Pág.103.
- [23] -----,-----, Pág.119
- [24] -----,-----, Pág.120
- [25] -----,-----, Pág.131

- [26] -----,-----, Pág.185.
- [27] -----, Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones 3 ed. 2004. Pág.139
- [28] -----,-----, Pág. 306
- [29] -----,-----, Pág.310
- [30] SEÑAL DIGITALIZADA. [En línea]. [Consultado 13 Agosto 2010]. Disponible en internet: <http://www.sobreaudio.com/wp-content/uploads/2007/12/senal-digitalizada.jpg>
- [31] TRATAMIENTO AVANZADO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES. [en line]. [Citado 24 de Agosto 2010]. http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2_tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf
- [32] UNESCO. Contaminantes del agua de origen industrial. [en line]. [citado 24 de Agosto 2009] Disponible en: http://www.unesco.org/water/wwap/facts_figures/agua_industria.shtml
- [33] ZETA-METER, Inc. "Coagulation & Flocculation". 1993

ANEXOS

ANEXO 1. Antecedentes de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales

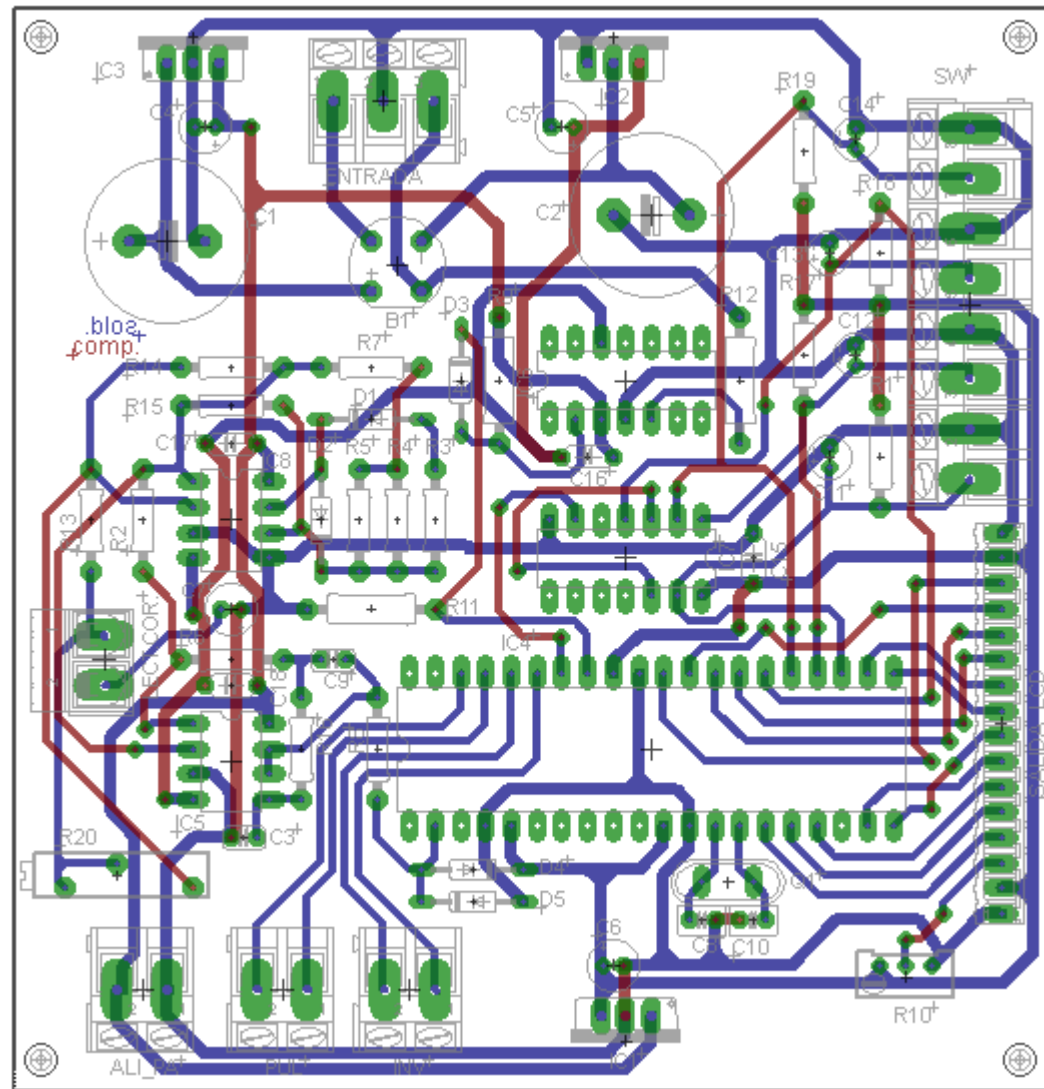
Autores	Contaminante	Resultado
Gomes et al, 2007 Lamar University, TX USA	Arsénico Ci: 1- 1000ppm	<ul style="list-style-type: none"> • En Celda de Electrocoagulación Batch de un solo ánodo y un solo cátodo. • La solución fue sintética. • Al-Fe permitió una remoción del 99.6%. • Fe-Fe permitió una remoción de 99.6% • Al-Al- permitió una remoción de 97.2%
Mouedhen et al, 2007 Unite de Chimie Industrielle el Materiaux TUNISIE	Ni, Cu, Zn Ci: 67 ppm Ni 59 ppm Cu	<ul style="list-style-type: none"> • Diferentes configuraciones de celda de electrocoagulación Batch. • Solución sintética • La remoción aumento con el tiempo de residencia. • La remoción del 60% se dio en 20 min. el 100% en 75
Golder et al, 2006a Department of Chemical Engineering INDIA	Cr ³⁺ 8000 ppm	<ul style="list-style-type: none"> • Solución sintética • Celda de agitación batch con configuración monopolar y bipolar. • pH entre 3.4 y 5.0 • Remoción con configuración bipolar fue del 99.9%, con monopolar fue de 81.5%
Golder et al, 2006b Department of Chemical Engineering INDIA	Cr ³⁺ Ci: 1000-2235 ppm	<ul style="list-style-type: none"> • Reactor Batch con agitación. • Solución sintética • Valor óptimo de agitación fue 450 rpm. • Densidad de corriente fue directamente proporcional a la remoción. • Sustancia electrolita NaCl
Ping et al, 2005 Hong Kong University HONG KONG	Cr ⁶⁺ Ci:0-100 ppm	<ul style="list-style-type: none"> • Solución sintética • Reactor Batch con dos compartimientos y con 5 electrodos. • pH optimo fue entre 5 y 8 • Remoción fue hasta 0.5ppm de Cr total.
Chen, et al, 2000. Hong Kong University HONG	Materia orgánica	<ul style="list-style-type: none"> • Solución proveniente de los residuos de un restaurante. • Celda de electrocoagulación Batch • Electroodos de Al y Ti Los valores óptimos de pH son menores a 4.

Bayramoglu et al, 2004 Gebze Institute of technology TURQUIA	Color, DQO, SS Ci: 3422 ppm DQO 1112 ppm SS	<ul style="list-style-type: none"> • Solución obtenida de una fabrica en Turquía. • Reactor batch con cuatro electrodos. • El pH fue un importante factor de operación. • La remoción de DQO fue del 61% • La remoción de turbidez fue del 98%. • En medio acido fue mas efectivo el Al, en medio neutro fue más efectivo el Fe
Bayramoglu et al, 2007 Gebze Institute of technology TURQUIA	DQO, Aceites y grasas. Ci: 2031 ppm DQO	<ul style="list-style-type: none"> • Reactor Batch con configuraciones en serie y en paralelo. • Solución obtenida de una fabrica en Turquía. • Al presento la mejor remoción para DQO del 93%. • Fe presento la mejor remoción para aceites y grasas
Khemis et al, 2006 Laboratoire des sciences du Genie Chimique. FRANCIA	DQO Ci: 1200-147000 ppm	<ul style="list-style-type: none"> • Suspensiones sintéticas. • La electrocoagulación dependió de la concentración de Al en el medio. • Se presento poca dependencia a la densidad de corriente.

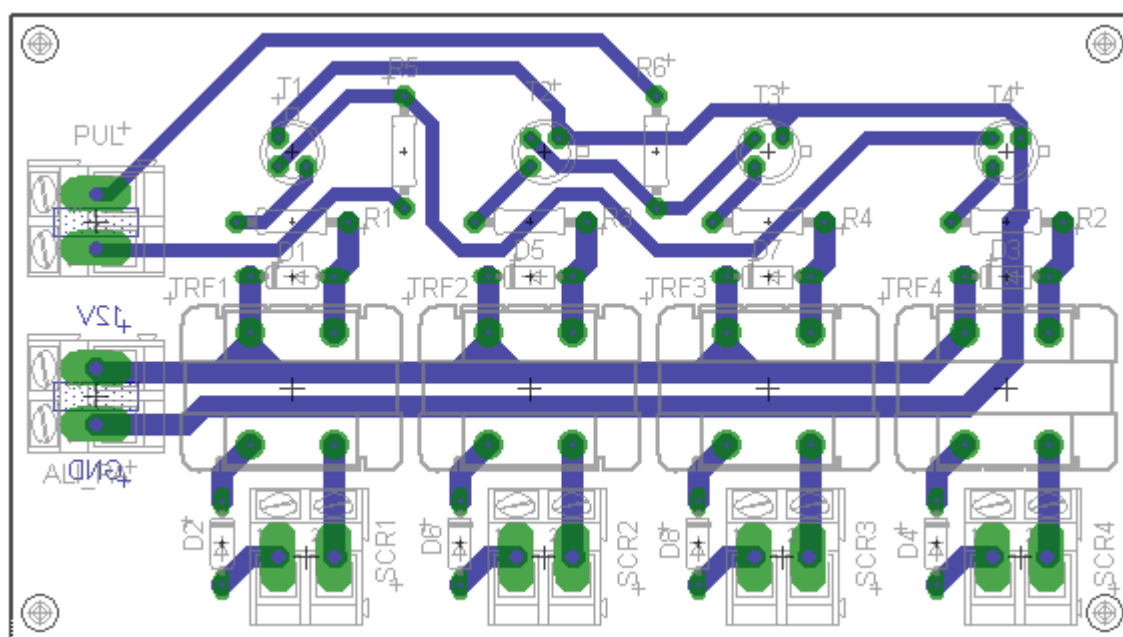
ANEXO 2. Investigaciones relacionadas con la electrocoagulación

Autores	Contaminante	Resultados de la Investigación
1. Cameselle et al, 2005. (Dpto. de Ingeniería Química Universidad de Vigo, España)	Muestras sintéticas de colorantes tipo azo, poliméricos, índigos.	<ul style="list-style-type: none"> La decoloración depende de la estructura molecular del colorante. Porcentajes de remoción superiores al 80% y con tiempos menores a 10 minutos. Uso de electrodos de Platino a escala laboratorio.
2. Daneshvar et al., 2004. Universidad de Tabriz. (Iran)	Remoción de colorante	<ul style="list-style-type: none"> Altas remociones de color (93%) en un intervalo de pH de 6-9, para un tiempo de 4 minutos y una distancia entre los electrodos de 1 cm. El desempeño se mejora empleando una celda con varios electrodos.
3. Kobya et al, 2004. Dpto. de Ingeniería Ambiental, Instituto de Tecnología Gebze, Turkía.	Efluentes de industria textil	<ul style="list-style-type: none"> El desempeño de electrodos de hierro es superior a los de aluminio. El consumo de energía es menor en electrodos de hierro que para aluminio Altas conductividades de la muestra a tratar mejoran el desempeño del proceso.
4. Qu et al., 2004. Centro para la Investigación de Ciencias	Tratamiento de aguas de lavandería	<ul style="list-style-type: none"> Altos porcentajes de remoción de DQO, turbiedad, fosfatos y surfactantes, mediante el uso de una celda bipolar con electrodos de aluminio
5. Adhoum et al, 2003. Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas y de Tecnología	Decoloración y remoción de compuestos fenólicos	<ul style="list-style-type: none"> pH óptimo de trabajo entre 4 y 6. Disminución de DQO del 76%, 91% de polifenoles y 95% de color en 25
6. Kobya et al., 2003. Instituto de Tecnología. Gebze, Turquía	Tratamiento de residuos textiles	<ul style="list-style-type: none"> El pH es un factor importante en la remoción de color y DQO. El pH final para el tratamiento es más alto para electrodos de aluminio, el cual presenta mejores resultados.
7. Pulgarín et al, 2003-b. Laboratorio de Biotecnología Ambiental (Suiza) y Universidad del Valle (Colombia)	Electrólisis de compuestos no biodegradable	<ul style="list-style-type: none"> Degradación total del compuesto en 45 minutos. Realización del acoplamiento biológico. Temperatura y densidad de corriente no afectan la efectividad del proceso. La formación de iones cloruro disminuye significativamente la toxicidad del efluente.
8. Mejía y Osorio, 2002. (Universidad Nacional de Colombia, Sede	Tratamiento de aguas residuales con alto contenido	<ul style="list-style-type: none"> Decoloración de 98%. Mejor desempeño con electrodos de aluminio en cuanto a la decoloración en menores tiempos de
9. Vargas y Montoya, 1997. (Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín)	Muestras sintéticas y reales de colorantes de la Industria Textil	<ul style="list-style-type: none"> Remociones entre 80-90% en muestras reales. Remociones del 95% en el caso de soluciones sintéticas muy diluidas. Electrodos de hierro a escala laboratorio, ensayos en lotes y en continuo.

ANEXO 3.DISEÑO PCB PARTE DIGITAL



ANEXO 4. DISEÑO PCB PARTE ANÁLOGA



ANEXO 5. PRINCIPALES OBRAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

INDUSTRIA	LOCALIZACION	ACTIVIDAD INDUSTRIAL	OBRA DE CONTROL CONSTRUIDA
CARTON DE COLOMBIA	YUMBO	PAPELERA	RECUPERACION DE CENIZAS REJILLAS-CLARIFICADOR LAGUNAS AIREADAS
CARTONES AMERICA	CALI	PAPELERA	REJILLAS,SEDIMENTADORES,CLARIFICADORES REACTOR UASB
PROPAL	YUMBO	PAPELERA	LAGUNAS DE SEDIMENTACIONINERTES REJILLAS, CLARIFICADOR, LAGUNAS AIREADAS
COMOLSA	BUGA	PAPELERA	RECIRCULACION, HOMOGENIZACION, REACTOR UASB
SONOCO	JAMUNDI	PAPELERA	TRAMPA DE GRASAS, SEDIENTADOR REACTOR UASB
UNIPAPEL	YUMBO	PAPELERA	REJILLAS,SEDIMENTACION, LAGUNA AIREADA
CELULOSA DEL VALLE	CANDELARIA	PAPELERA	COAGULACION FLOCULACION SEDIMENTACION
CARTONES DEL VALLE	PALMIRA	PAPELERA	TAMIZ RECIRCULACION
CARTONES INDUSTRIALES COLOMBIANOS	PALMIRA	PAPELERA	TAMIZ- REJILLAS CLARIFICADOR RECIRCULACION
INGENIO PICHICHI	GUACARI	ING. AZUCARERO	CONTROL DE CACHAZA,CENIZA, LAGUNA DE HOMGENIZACION,LAGUNA DE SEDIMENTACION TRAMPA DE GRASAS
IGNENIO RIOPAILA	ZARZAL	ING.AZUCARERO	CONTROL DE CENIZA,CACHAZA,SISTEMAS DE RECIRCULACION , DESARENADOR,LAGUNAS DE ESTABULIZACION
INGENIO PRIVIDENCIA	EL CERRITO	ING. AZUCARERO	CONTROL DE CENIZA,CACHAZA,SISTEMAS DE RECIRCULACION , DESARENADOR,LAGUNA DE ESTABULIZACION
IGNENIO CENTRL CASTILLA	PRADERA	ING.AZUCARERO	CONTROL DE CENIZA,CACHAZA,SISTEMAS DE RECIRCULACION , DESARENADOR,LAGUNA DE ESTABULIZACION
IGNENIO CENTRAL TUMACO	PALMIRA	ING.AZUCARERO	CONTROL DE CENIZA,CACHAZA,SISTEMAS DE RECIRCULACION , DESARENADOR,LAGUNA DE ESTABULIZACION
IGNENIO SAN CARLOS	TULUA	ING.AZUCARERO	CONTROL DE CENIZA,CACHAZA,SISTEMAS DE RECIRCULACION , DESARENADOR,LAGUNA DE ESTABULIZACION , TRAMPA DE GRASAS
IGNENIO LA CARMELITA	RIOFRIO	ING.AZUCARERO	CONTROL DE CACHAZA,SISTEMAS DE RECIRCULACION , DESARENADOR,LAGUNA DE ESTABULIZACION, TRAMPA DE GRASAS
INGENIO MAYAGUEZ	CANDELARIA	ING.AZUCARERO	CONTROL DE CACHAZA,SISTEMAS DE RECIRCULACION , DESARENADOR,LAGUNA DE ESTABULIZACION, TRAMPA DE GRASAS
TERPEL CENTRO	BUGA	TERMINAL PETROLERO	SEPARADOR DE GRASAS API, TANQUE SEPTICO- INFILTRACION
COOLACTEOS NARIÑO	CALI	PASEUTRIZADORA	LODOS ACTIVADOS
HACIENDA VAME	CANDELARIA	PORCICOLA Y TRAPICHE	BIODIGESTOR, LECHOS DE SECADO
POLLOS RICAHCHON	CALI	BENEFICIO AVES	LODOS ACTIVADOS-LECHOS SECADO
AGROINDUSTRIAL LACTEAS DELVALLE	BUGALAGRANDE	DERIVADOS LACTEOS	LAGUNAS DE ESTABILIZACION
GRANJA LA SIERRA	CANDELARIA	PORCICOLA	LAGUNAS DE ESTABULZACION
CARIOCA S.A	BUGA	BENEFICIO AVES	REJAS,TRAMPA DE GRASAS, LAGUNAS AIREADAS
ACUARSERVICIOS S.A.	CANDELARIA	HABITACIONAL	REJAS, LODOS ACTIVADOS

LACTEOS ANDINA	PALMIRA	PASTEURIZADORA	LODOS ACTIVADOS- ZANJA OXIDACION-
LACTEOS UNO A	CANDELARIA	PASTEURIZADORA	LODOS ACTIVADOS-ZANJA DE OXIDACION
POLLO A	PALMIRA	BENEFICIO AVES	LODOS ACTIVADOS-ZANJA OXIDACION
CENCAR S.A.	YUMBO	TERMINAL TRANSPORTE	REJAS, LAGUNAS DE ESTABILIZACION
EMPRESA DE BUSES EXPRESO PALMIRA	YUMBO	TERMINAL TRANSPORTE	REJAS, SEDIMENTADORES, FILTRO ANAEROBICO
EMPRESA ANDINA DE HERRAMIENTAS	YUMBO	HERRAMIENTAS	REJAS, FISICOQUIMICO
POLLOS BUCANERO S.A	CANDELARIA	BENEFICIO AVES	REJAS, TRAMPAS GRASAS, LAGUNAS ESTABILIZACION
PRODESAL S.A.	PALMIRA	COLOR, SODOA	NEUTRALIZACION
VARELA S.A.	PALMIRA	JABONES	REJAS, CONTROLES INTERNOS,LAGUNAS DE ESTABILIZACION
RAMO DE OCCIDENTE	PAMIRA	ALIMENTOS	REJAS, TRAMPAS GRASAS, FILTRO ANAEROBICO
FANALCA	YUMBO	CARROCERIAS Y REPUESTOS	REJAS, FISICOQUIMICO, LAGUNA
CARVAJAL S.A	YUMBO	PLANTAS VARIAS	REJAS, FISICOQUIMICO, REACTOR UASB
MATADERO BUGA	BUGA	SACRIFICIO GANADO	REJAS, TRAMPA GRASAS, LODOS ACTIVADOS
INDUSTRIAS LEHNER	PALMIRA	CARPINTERIA METALICA	REJAS, HOMOGENIZACION, SEDIMENTACION- LODOS ACTIVADOS
INVERSIONES RAMIREZ JIMENEZ	JAMUNDI	PORCICOLA	BIDOGIESTOR LECHOS SECADO
LLOREDA GRASAS	YUMBO	ACEITES YGRASAS	HOMOGENIZACIONF- FISICO QUIMICO-LECHOS SECADO
GRASAS S.A	BUGA	ACEITES YGRASAS	HOMOGENIZACIONF- FISICO QUIMICO-LECHOS SECADO
NESLTE DE COLOMGA	BUGALAGRANDE	LACTEOS Y PROD. ALIMENT	HOMOGENIZACION.LODOS ACTIVADOS
COLOMBINA	ZARZAL	ELABORACION DULCES	HOMOGENIZACION,REACTOR UASB, LAGUNAS AIREADAS
TECNOQUIMCAS	JAMUNDI	LABORATORIO .FARAMEC.	LODOS ACTIVADOS. DESNIFECCION . LECHOS SECADO
GASEOSAS DEL VALLE	BUGA	ALIMENTOS	LODOS ACTIVADOS, LECHOS SECAHDO
CURTIEMBRES TITAN	YUMBO	PROC. CUEROS	HOMOGENIAACIO, CLARIFICADOR, RECIRCULACION
POLLOS SOBERANO	YUMBO	BENEFICO AVES	REJILLAS, TRAMPA GRASAS, FILTRO PERCOLADOR
CARNES Y DERIVADOS	CANDELARIA	BENEFICO GANADO	REJILLAS,TRAMPA GRASAS, REACTOR UASB, LAGUNAS DE ESTABILIZACION
AGROANDES	JAMUNDI	BENEFICIO RESES	REJILLAS, TRAMPA GRASAS, LAGUNAS AIREADAS
SUCROMILES	PALMIRA	ACIDOS	CONTROLES INTERNOS, REACTOR ANAEROBICO
ETERNIT PACIFICO	YUMBO	ASBESTO CEMENTO	LODOS ACTIVADOSLECHOS DE SECDO –SEDIMENTADO RECIRCULACION
LICORES DEL VALLE	PALMIRA	DESTILACION LICORES	HOMOGENIZACION- LODOS ACTIVADOS,CONCNETRACION VINAZAR Y EVAPORACION
ANODIZADOS JORAMOY	YUMBO	ANODIZADO	NEUTRALIZACION FISICO QUIMICO
ALUMINA	YUMBO	ANODIZADO	NEUTRALIZACION FISICO QUIMICO
INDUSTRIA QUIMICA DEL VALLE	BUGA	REACTIVOS QUIMICOS	NEUTRALIZACION , FISICO QUIMICO
POLLOS FARAON	JAMUNDI	BENEFICIO AVES	TRAMPA DE GRASAS, FILTRO PERCOLADOR, SEDIMENTADOR
POLLOS KRIOLLO	YUMBO	BENEFICIO AVES	TRAMPA DE GRASAS, LAGUNAS DE ESTABILIZACION
LEVAPAN S.A.	TULUA	LEVADURAS	HOMONGENIZACION, REACTOR ANAEROBICO FLUJO ASCENDENTE
NABISCO	PALMIRA	LEVADURAS Y PROD.ALIM	HOMONGENIZACIO, REACTOR UASB

BDF	YUMBO	CINTAS	REACTOR UASB, INFILTRACION
MAC INALBA	YUMBO	BATERIAS	TRATAMIENTO FISICOQUIMICO, RECIRCULACION
PÓLLOS EMPERADOR	DAGUA	BENEFICIO AVES	TRAMA DE GRASAS, DIGESNTOR ANAEROBICO, LECHOS DE SECADO
TECNOQUIMICAS	YUMBO	FARMACEUTICA	LODOS ACTIVADOS
CEMENTOS DEL VALLE	YUMBO	CEMENTO	SEDIMENTACION
FABRISEDAS	YUMBO	TELAS	COAGULACION, FLOCULACION, SEDIMENTACION
CURTIEMBRE MANUEL BRAVO	EL CERRITO	CURTIDO PIELES	REJAS, TRAMPA DE GRASAS, RECIRCULACION CROMO
CURTIEMBRE SIVERIO PEÑA	EL CERRITO	CURTIDO PIELES	REJAS, TRAMPA DE GRASAS, RECIRCULACION CROMO
CURTIEMBRE LUIS BENITEZ	EL CERRITO	CURTIDO PIELES	REJAS, TRAMPA DE GRASAS, RECIRCULACION CROMO
CURTIEMBRE JAIME CARDONA	EL CERRITO	CURTIDO PIELES	REJAS, TRAMPA DE GRASAS, RECIRCULACION CROMO
CURTIEMBRE ALBERTO MORA	EL CERRITO	CURTIDO PIELES	REJAS, TRAMPA DE GRASAS, RECIRCULACION CROMO
CURTIEMBRE JAVIER RIOS	EL CERRITO	CURTIDO PIELES	REJAS, TRAMPA DE GRASAS, RECIRCULACION CROMO
CURTIPIELES	EL CERRITO	CURTIDO PIELES	REJAS, TRAMPA DE GRASAS, RECIRCULACION CROMO
CURTIEMBRE NARIÑO	EL CERRITO	CURTIDO PIELES	REJAS, TRAMPA DE GRASAS,
BRITILANA BENREY	PALMIRA	TELAS	REJAS, REACTOR UASB, LAGUNA DE ESTABILIZACION
QUIMICA BORDEN	YUMBO	RESINAS Y PINTURAS	TRAMPA DE GRASAS, LODOS ACTIVADOS, LECHOS DE SECADO
COMESTIBLES ALDOR	YUMBO	DULCES	Reactor anaerobico UASB
TRAPICHE LUCERNA		PANELA	Laguna de estabilización
PLANTAS ALCOQUIMICAS	VARIOS INGENIOS	ALCOHOL CARBURANTE	

Preparó Amparo Duque a
mayo de 2007

ANEXO 6

Agua residual	Corriente	Ánodo / cátodo	Parámetro eléctrico	Conductividad $\mu\text{S/cm}$	pH	Contaminante	Remoción %	Tiempo (min)
Colorantes textiles	CD	Al/Fe	$\geq 150 \text{ A/m}^2$	1000-4000	3- 6	Turbiedad	98	15
						DQO	61-65	
		Fe/Al	80-100 A/m^2	1000-4000	3-7	Turbiedad	75-98	10
						DQO	47-77	
					cercano a 10	Turbiedad	87	
						DQO	26	
Electroplateado, industria del Cr; fertilizantes e industria de los metales.	--	Fe/Fe	30 A/m^2	1500	5-6	Cr^{+6}	97	--
Restaurantes	CD	Al/Al	1,8-6,8V	1290	6,94	DQO	67	15
						Grasas y aceites	>97	
						SS	90	
Alimentos(gelatinas)	CD	Fe/Al	6,26 A/m^2	1,2Mhos	10,86	Grasas y aceites	Agua cruda 1195ppm	15
							Agua tratada 115ppm	
						DQO	Agua cruda 3104ppm	
							Agua tratada 931,2ppm	
Lavandería	CA	Al/	32V/30A	--	5-9	DQO	70	5
						Turbiedad P-fosfato surfactante	90	
Agua consumo humano		Fe/	1,53 A/m^2	--	6-9	As	>99	20
		Al/					37	
		Ti/					>58	
Industria del boro	CD	Al/	1,2-6 mA/cm^2	bajos	8	B	97	--
Suspensión de látex	CD	Fe/Fe	1,1 A/Dm^2	0,6-1 S/m	6,5-7	estireno	Remanente 7%	26
						vinilo	Remanente 8%	
Industria semiconductores (pulido mecánico químico)	CD	Al/Fe	93 A/m^2	450-470	7,3	color	96	< 30
						Cu	99	
						DQO	88,7	
Producción aceite de oliva	CD	Al/	75 mA/cm^2	--	4-6	DQO	76	25
						polifenoles	91	
						color	65	

ANEXO 7

Emisoras directas de contaminantes inorgánicos en agua clasificados por actividad.

Arsénico y sus compuestos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (22%) Industria química inorgánica de base o fertilizantes (20%) Producción de cemento y materiales cerámicos (18%) Plantas de procesamiento de residuos peligrosos (10%)
Cadmio y sus compuestos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (66%)
Cloruros	Plantas de combustión (40%) Industria química inorgánica de base o fertilizantes (30%) Industria Química Orgánica de base (20%)
Cobre y sus compuestos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (23%) Industria química inorgánica de base o fertilizantes (18%) Industria Química Orgánica de base (12%) Plantas de combustión (12%)
Cianuros	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (80%) Industria Química Orgánica de base (10%)
Fluoruros	Industria química inorgánica de base o fertilizantes (54%) Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (22%) Industria Química Orgánica de base (17%)
Plomo y sus compuestos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (40%) Industria química inorgánica de base o fertilizantes (15%) Industria Química Orgánica de base (12%) Refinerías de petróleo y gas (12%)
Mercurio y sus compuestos	Industria química inorgánica de base o fertilizantes (31%) Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (18%) Industria Química Orgánica de base (14%)
Níquel y sus compuestos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (44%) Industria química inorgánica de base o fertilizantes (13%) Industria Química Orgánica de base (13%)

Compuestos orgánicos de estaño	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (86%)
Fósforo	Industria química inorgánica de base o fertilizantes (25%) Industria Química Orgánica de base (22%) Industria de la madera y papel (18%) Industrias lácteas, mataderos y otras (13%)
Zinc y sus compuestos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (33%) Industria Química Orgánica de base (23%) Industria química inorgánica de base o fertilizantes (16%) Industria de la madera y papel (11%)

Benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX)	Industria Química Orgánica de base (56%) Industrias del petróleo y del gas (17%) Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (11%)
Cloroalcanos	Industria química inorgánica de base o fertilizantes (100%)
Orgánicos halogenados (AOX)	Instalaciones para la producción de pasta de papel (86%)
Compuestos organoestánicos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (86%) Industria Química Orgánica de base (11%)
1,2-Dicloroetano (DCE)	Productos químicos orgánicos de base (63%) Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (36%)
Diclorometano (DCM)	Productos químicos orgánicos de base (48%) Industria farmacéutica (30%)
Bromuro de difeniléter	Instalaciones para pretratamiento de fibras o textiles (100%)
Dioxinas y furanos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (41%) Instalaciones de combustión (19%) Productos químicos orgánicos de base (17%) Instalaciones para eliminación de residuos peligrosos (15%)
Hexaclorobenceno (HCB)/Hexaclorobutadieno (HCBd)/Hexaclorciclohexano (HCH)	Productos químicos orgánicos de base (~90%)
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)	Tratamiento de superficies con disolventes orgánicos (33%) Refinerías de petróleo y de gas (27%) Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (21%) Productos químicos orgánicos de base (13%)

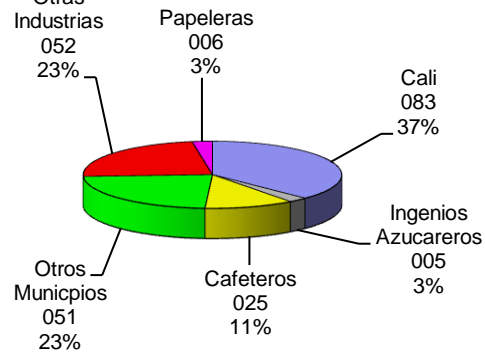
Hidrofluorocarburos (HFC)	Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (48%) Productos químicos orgánicos de base (41%)
Pentaclorofenol (PCP)	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (100%)
Perfluorocarburos (PFC)	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (82%)
Tetracloroetileno (PER)	Tratamiento de superficies con disolventes orgánicos (43%) Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (26%) Productos químicos orgánicos de base (12%) Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (12%)
Tetraclorometano (TCM)	Productos químicos orgánicos de base (93%)
Triclorobencenos (TCB)	Productos químicos orgánicos de base (56%) Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (44%)
1,1,1-Tricloroetano (TCE)	Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (100%)
Tricloroetileno (TRI)	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (32%) Productos químicos orgánicos de base (31%) Tratamiento de superficies con disolventes orgánicos (24%)
Triclorometano (Cloroformo)	Productos químicos orgánicos de base (43%) Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (40%) Industria farmacéutica (15%)

Fuente: The European Pollutant Emission Register

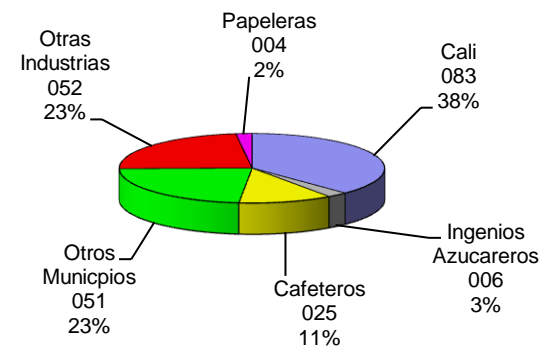
ANEXO 8

AÑO	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Cali	82,58	83,49	84,40	84,50	87,85	74,79	80,84	79,55	77,33
Ingenios Azucareros	5,33	5,51	4,17	5,61	6,05	3,70	5,03	5,71	5,72
Cafeteros	24,69	25,29	23,99	27,19	26,43	27,18	27,07	36,60	32,20
Otros Municipios	51,33	51,27	50,43	68,00	72,49	66,76	71,00	76,72	73,32
Otras Industrias	51,60	51,60	51,60	55,00	34,84	16,64	14,55	13,25	13,93
Papeleras	5,61	4,38	2,90	4,39	14,60	5,93	4,89	5,24	3,71
Carga Total Vertida	221,14	221,54	217,49	244,69	242,26	195,00	203,37	217,08	206,22

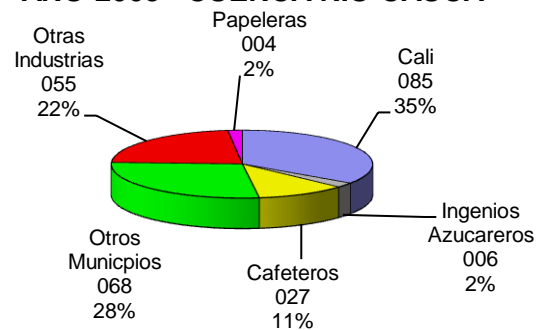
APORTES DE CARGA DBO5 Ton / Día AÑO 2000 - CUENCA RIO CAUCA



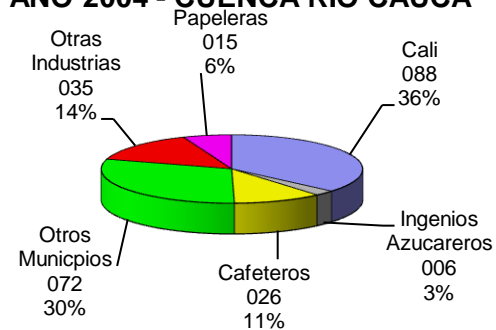
APORTE DE CARGA DBO5 Ton / Día AÑO 2001 - CUNCA RIO CAUCA



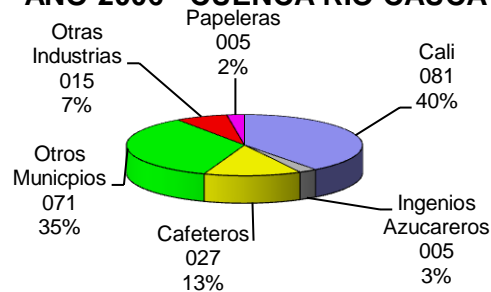
APORTE DE CARGA DBO5 Ton / Día AÑO 2003 - CUENCA RIO CAUCA



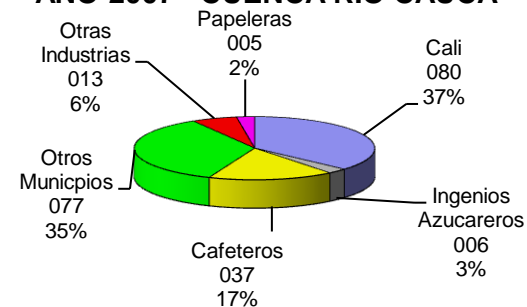
APORTE DE CARGA DBO5 Ton / Día AÑO 2004 - CUENCA RIO CAUCA



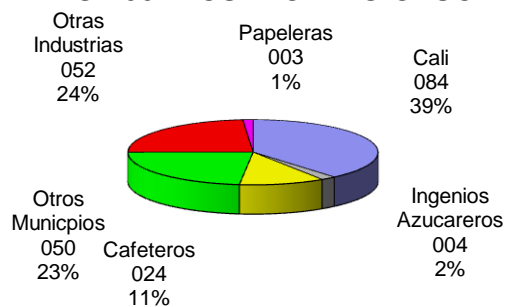
**APORTE DE CARGA DBO5 Ton / Día
AÑO 2006 - CUENCA RIO CAUCA**



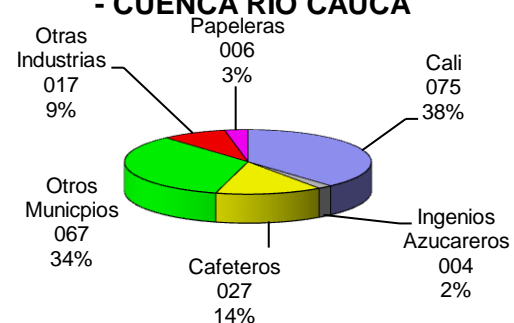
**APORTE DE CARGA DBO5 Ton / Día
AÑO 2007 - CUENCA RIO CAUCA**



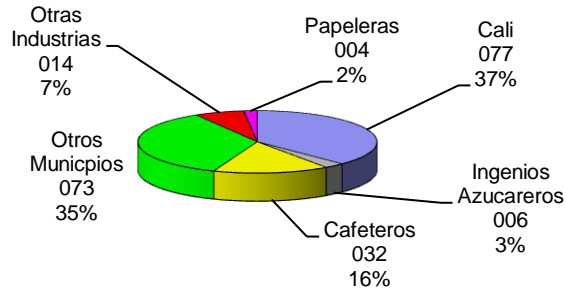
**APORTE DE CARGA DBO5 Ton / Día
AÑO 2002 - CUENCA RIO CAUCA**



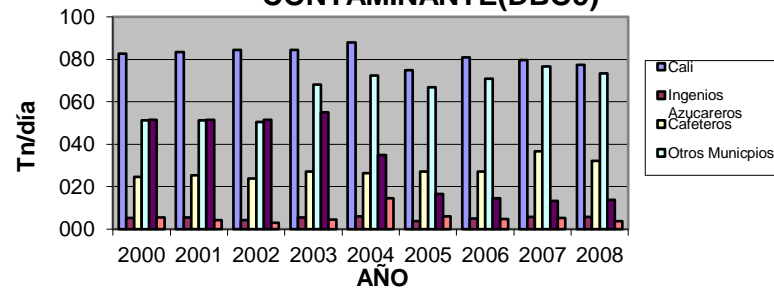
**APORTE DE CARGA DBO5 Ton / día AÑO 2005
- CUENCA RIO CAUCA**



**APORTE DE CARGA DBO5 Ton / Día
AÑO 2008 - CUENCA RIO CAUCA**



**VARIACIONES DE LA CARGA
CONTAMINANTE(DBO5)**

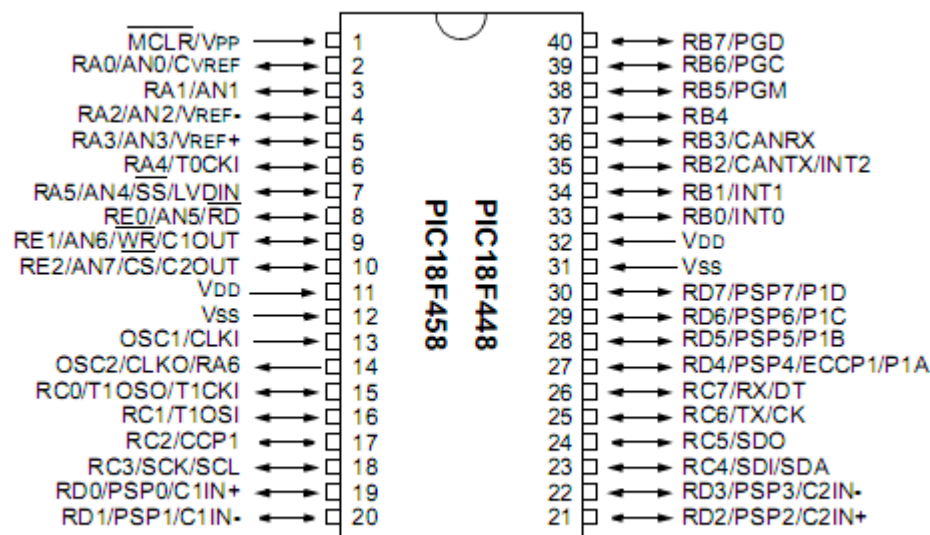


ANEXO 9. PIC 18LF458



PIC18FXX8

**28/40-Pin High-Performance, Enhanced Flash
Microcontrollers with CAN**



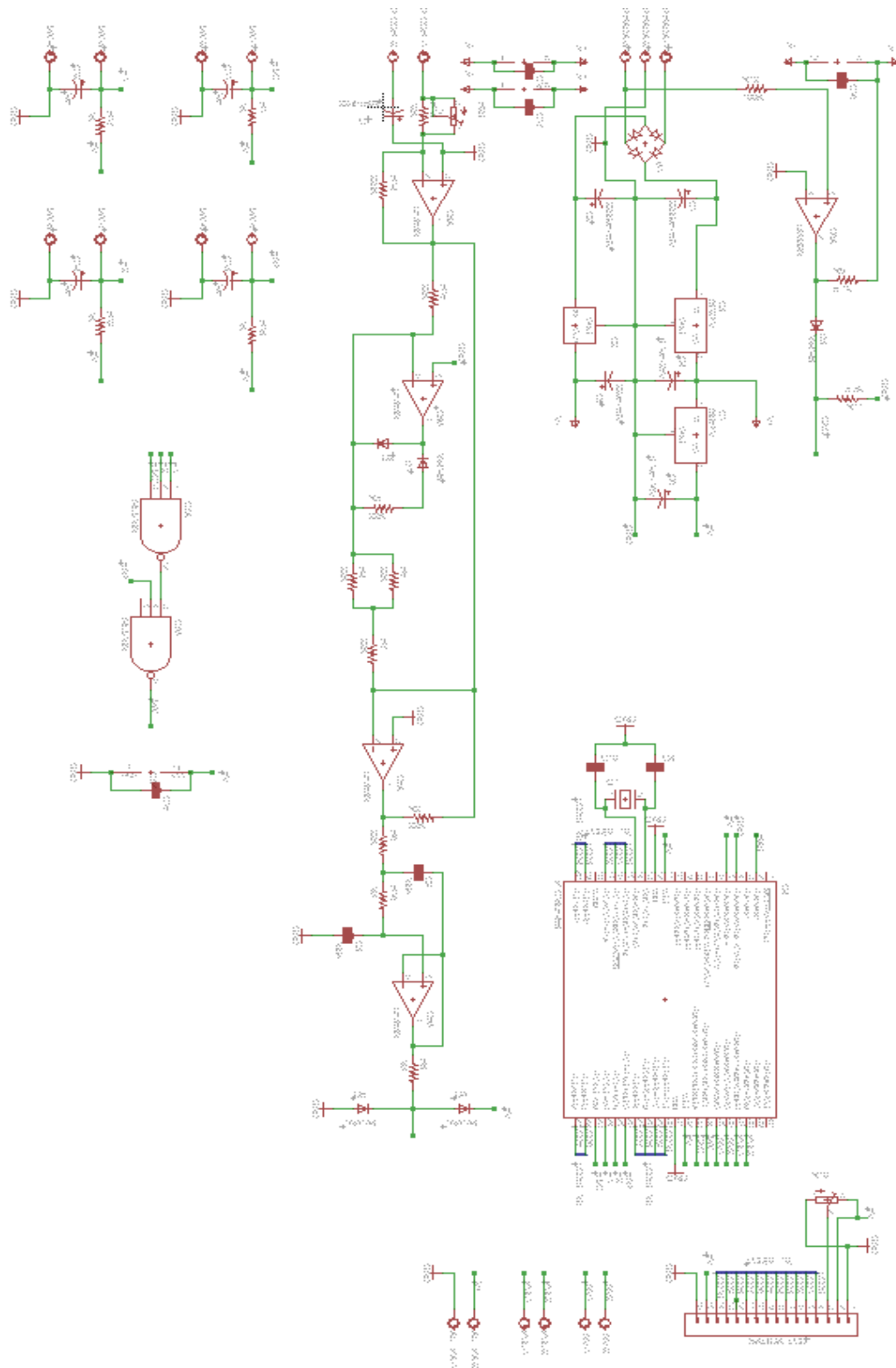
High-Performance RISC CPU:

- Linear program memory addressing up to 2 Mbytes
- Linear data memory addressing to 4 Kbytes
- Up to 10 MIPS operation
- DC – 40 MHz clock input
- 4 MHz-10 MHz oscillator/clock input with PLL active
- 16-bit wide instructions, 8-bit wide data path
- Priority levels for interrupts
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier

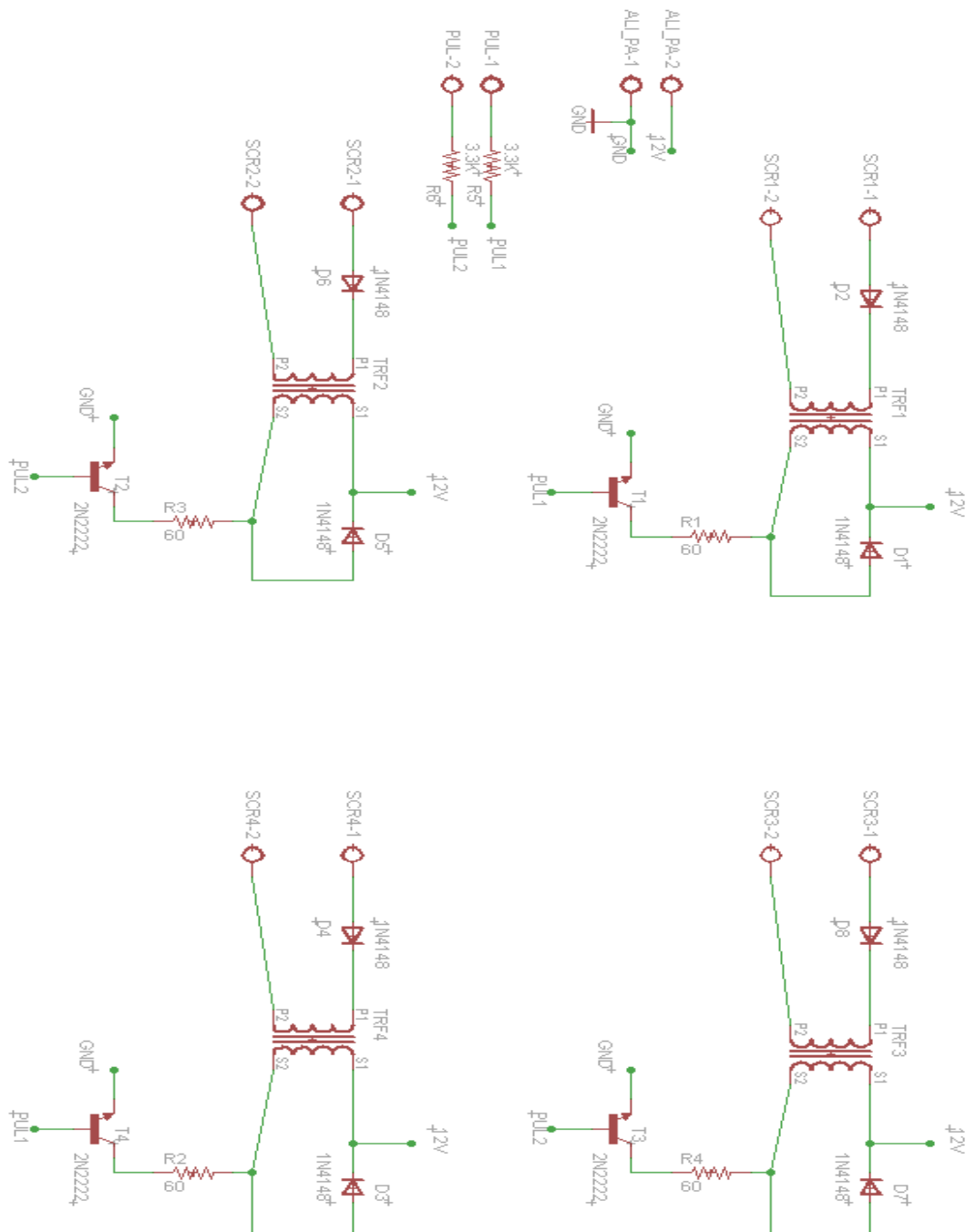
CAN bus Module Features:

- Complies with ISO CAN Conformance Test
- Message bit rates up to 1 Mbps
- Conforms to CAN 2.0B Active Spec with:
 - 29-bit Identifier Fields
 - 8-byte message length
 - 3 Transmit Message Buffers with prioritization
 - 2 Receive Message Buffers
 - 6 full, 29-bit Acceptance Filters
 - Prioritization of Acceptance Filters
 - Multiple Receive Buffers for High Priority Messages to prevent loss due to overflow
 - Advanced Error Management Features

ANEXO 10. ESQUEMA PARTE DIGITAL



ANEXO 11. ESQUEMA PARTE ANÁLOGA



ANEXO 12. COSTOS DEL PROYECTO

FACTORES	VALOR (\$)
TANQUE DE ACRÍLICO 3mm	120000
CAJA TIPO CONTADOR (DOBLE FONDO)	125000
TIRISTORES (SCR)_ 50RIA60	350000
PLACAS DE ALUMINIO X 10	50000
PLACAS DE HIERRO X 10	100000
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE-50 A 5_ATEL	58000
PLACAS IMPRESAS (DOBLE CARA)	70000
DISIPADOR DE ALUMINIO	35000
CONTACTORES 220 V_ 32 Amp X 2	64000
RELEVOS 220V _10 Amp X 2	22000
BREAKER 40 Amp X 2	34000
TRANSFORMADORES DE PULSOS X 4	20000
LCD 4 X 20	35000
PIC 18LF458 X 2	90000
CABLE DIFERENTES CALIBRES Y CANALETAS	60000
INSUMOS ELECTRÓNICOS	50000
INSUMOS PARA PRUEBAS	100000
QUÍMICO (CAOLIN) 10 Kg	60000
GASTOS DE INGENIERÍA	300000
COSTO TOTAL DEL PROYECTO	1743000

ANEXO 13. PRUEBAS DEL EQUIPO

En el siguiente anexo se colocara la evidencia de las pruebas que se le realizaron a electrocoagulador.

I. AGUA PARA EL ELECTROCOAGULADOR

Teniendo en cuenta el hecho de que las aguas residuales no fueron posibles de conseguir, dentro de la investigación que se realizó se encontró una manera de fabricarla; claro que tan solo decía que producto químico se le puede adicionar al agua. Este tiene el nombre de Caolín, dentro de la bibliografía no se especificaba la cantidad que se le debe suministrar al agua. Dentro de los ensayos que realizamos se descubrió que para generar una electrocoagulación la mezcla que se debe realizar es por cada 4 litros de agua se debe agregar 1 kilogramo de caolín. También es aconsejable agregarle mayonesa, 200 gramos a la mezcla total. En nuestro caso el tanque tiene una capacidad de 13 litros aproximadamente.

II. PRUEBAS DE MEDICIÓN PARA EL ELECTROCOAGULADOR

A continuación se presenta una tabla donde se relacionan los datos tomados en la práctica:

VOLTAJE ENTRE PLACAS	CORRIENTE	TIEMPO (MIN)	<i>ESTOS DATOS SE TOMARON CON EL AGUA CREADA POR NOSOTROS MISMOS, DADO ESTO LOS VALORES PUEDEN CAMBIAR CON RESPECTO AL AGUA UTILIZADA.</i>
7.4	7.87	1	
8.2	7.62	5	
8.9	7.39	10	
9.7	7.16	15	
10.5	6.4	20	
10.9	5.2	25	
11.2	3.5	30	

Se mostraran imágenes donde se muestra el cambio que va teniendo el proceso en el transcurso del tiempo.

- Se muestra una imagen tomada al inicio del proceso donde se evidencia la suciedad de la misma.



- Se puede observar como en el transcurso del proceso el agua va cambiando su turbidez.



- Esta es una imagen tomada al final del proceso.



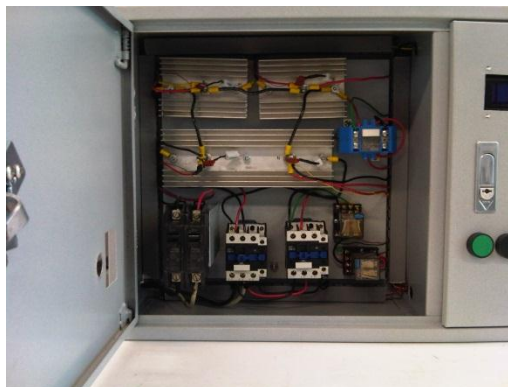
III. PROTOTIPO FINAL

A continuación se muestran imágenes del prototipo terminado.

- Caja de control



- Parte de potencia



- Tarjetas electrónicas



- Reactor

