



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
"Perfecta Combinación entre Energía e Intelecto"



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA PARA APLICACIONES EN PROTECCIÓN CATÓDICA

CARLOS ANDRÉS QUINTERO MURCIA

RODMAN RAUL CALDERON NIÑO

JHON FREDY CRUZ BUITRAGO



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2012

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA PARA APLICACIONES EN PROTECCIÓN CATÓDICA.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
"Perfecta Combinación entre Energía e Intelecto"



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO CONTROLADO DE ONDA
COMPLETA PARA APLICACIONES EN PROTECCIÓN CATÓDICA**

CARLOS ANDRÉS QUINTERO MURCIA

RODMAN RAUL CALDERON NIÑO

JHON FREDY CRUZ BUITRAGO

Trabajo de Grado para optar al título de

Ingeniero Electrónico

Director

JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ

Magíster en Potencia Eléctrica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2012

*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA PARA
APLICACIONES EN PROTECCIÓN CATÓDICA.*



“Los seres humanos no nacen para siempre el día en que sus madres los alumbran, sino que la vida los obliga a parírse a sí mismos una y otra vez.”

(Gabriel García Márquez)



DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso a quien le debo todo lo que soy, gracias por animarme en los momentos de dificultad y por inspirarme a seguir adelante, de aquello que me permitiste con esfuerzo sembrar, hoy se plasma y se resume como la realidad de una grata conquista.

A mis padres Ricardo y Consuelo por su esfuerzo, dedicación, apoyo y ejemplo, los cuales me permitieron llegar a la cúspide de este triunfo.

A mi hermana Diana Carolina, por revelarme lo profundo y sublime que puede verse el mundo desde una mirada inocente.

A Heidy Johana Pinzón Hernández por ser mi aliento en estos últimos años, tu ayuda incondicional y valiosa amistad me permitieron alcanzar esta victoria.

A Félix, Aleja, Diana, Anamaria, Alex y Chuchín por sus innumerables consejos, constante apoyo y sincera amistad.

A mis compañeros Rodman Calderón y Jhon Cruz por permitirme compartir este trabajo de grado a su lado.

Carlos Andrés Quintero Murcia



A Dios por acompañarme y bendecirme en todo momento.

A mis padres Ricardo y Martha a quienes les debo todo lo que soy, ya que con su ejemplo y apoyo he alcanzado esta gran meta.

A mis hermanos, Jhon, Jose y Mary, por su compañía incondicional, ayuda permanente y por animarme en cada paso de mi vida.

A mi amigo Álvaro Enrique Tasco, quien me ha acompañado en el transcurso de la carrera, y me ha mostrado lo valiosa que es la amistad.

A la familia Arciniegas Villafañe y en especial a Eunice, porque a través de este tiempo se han convertido en mi apoyo y compañía incondicional, por saber comprenderme y ser uno de los grandes motivos para seguir adelante.

A mis compañeros Jhon Cruz y Carlos Quintero por permitirme compartir este trabajo de grado a su lado.

Rodman Raul Calderon Niño



A Dios quien ha sido mi apoyo y fortaleza en muchos momentos de dificultad y que agradezco por todas las bendiciones que ha derramado sobre mí y toda mi familia. A la virgen María que ha sido mi auxiliadora, y confidente en este camino como estudiante.

A mis padres Manuel y Flor Alba por su esfuerzo, dedicación, apoyo y buen ejemplo que me llevaron hacer una persona íntegra de buenos principios y a quienes estaré eternamente agradecido por tantas cosas buenas que han hecho por mí.

A mis hermanos Héctor y Libia por brindarme todo su apoyo y aconsejarme en momentos difíciles. A ellos muchas gracias por ser los mejores hermanos.

A mis amigos Diego Vargas, Eduard Avila, Edward Ibáñez, Yeiler Bernal, Julián Angarita, Fabián Manosalva, por ser mi apoyo y con quienes viví momentos tristes y alegres en el transcurso de mi vida como estudiante. Gracias porque con su amistad incondicional ayudaron que este logro se hiciera realidad.

A mis compañeros Rodman Calderón y Carlos Quintero quienes me han permitido compartir este trabajo de grado y a los cuales les he aprendido demasiadas cosas valiosas.

Jhon Fredy Cruz Buitrago



AGRADECIMIENTOS

Los Autores expresan sus agradecimientos:

A Dios Nuestro Señor, por su apoyo constante durante estos momentos de continuo trabajo, esfuerzo y triunfo.

A nuestro Director de Proyecto MPE. Jaime Guillermo Barrero Pérez, por su oportuna y amplia orientación académica y profesional en aras de la culminación de este trabajo. Además de su inestimable cordialidad y confianza con cada uno de nosotros.

A Leonardo Bonilla Suarez compañero y amigo, por su incesante y comprometida contribución en el avance de este proyecto.

A Nuestro colega y amigo Freddy Alberto Rojas Sanabria, por su constante asistencia y aportes valiosos en el transcurso de la elaboración de este proyecto.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales Msc. Iván Uribe Pérez, Msc. Custodio Vásquez Quintero y Lab. Ambrosio Carrillo, por su oportuna colaboración e interés en temas de protección catódica para la culminación de este trabajo de grado.



A Johanita, Laura, Lucia, Yuri y demás personas que laboran en las oficinas de "Campo Escuela Colorado", por su pronta colaboración en los procesos administrativos y financieros de este proyecto.

A todos nuestros compañeros y amigos, por su optimismo en la finalización de este proyecto.



RESUMEN

TÍTULO:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA PARA APLICACIONES EN PROTECCIÓN CATÓDICA.*

AUTORES:

Jhon Fredy Cruz Buitrago
Rodman Raul Calderon Niño
Carlos Andrés Quintero Murcia†

PALABRAS CLAVES:

Microcontrolador, protección catódica, rectificador, resistencia de derivación, SCR.

Descripción:

El objetivo de este proyecto es otorgar al laboratorio de investigación científica y desarrollo tecnológico de la cadena productiva de los hidrocarburos "Campo Escuela Colorado" perteneciente a la Universidad Industrial de Santander, un dispositivo tecnológico que se encargará de realizar la conversión de corriente alterna a continua para suministrar las necesidades de corriente y tensión requeridos por los sistemas de protección catódica por corriente impresa, además este componente hardware servirá como complemento de las asignaturas electrónica industrial, electrónica de potencia, sistemas de control y microcontroladores, de la *Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones* de la universidad.

El proyecto comprende las siguientes fases: la primera de ellas es la etapa de control conformada por el microcontrolador, un circuito de disparo y un circuito detector de cruces por cero cuya función es detectar los cruces por cero de la señal de alimentación del transformador trifásico además permite generar un voltaje DC variable en magnitud para controlar el ángulo de disparo de los SCRs, y la segunda es la etapa de potencia conformada por el transformador trifásico y los tiristores.

El resultado es un dispositivo de fácil manejo que permite rectificar la señal de alterna y realizar una adecuación para convertirla en continua, implementando el método de control por medio de variación del ángulo de retraso. Las anteriores características hacen del dispositivo un instrumento versátil y muy útil, tanto en aplicaciones académicas como en industriales.

* Proyecto de grado.

† Facultad de ingenierías físico-mecánica, escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, director: MPE. Jaime Guillermo Barrero Pérez.



SUMMARY

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A THREE-PHASE RECTIFIER FULL WAVE CONTROLLED APPLICATION IN CATHODIC PROTECTION.‡

AUTHORS:

Jhon Fredy Cruz Buitrago
Rodman Raul Calderon Niño
Carlos Andrés Quintero Murcia§

KEY WORDS:

Cathodic protection, microcontroller, rectifier, shunt resistor, thyristor.

DESCRIPTION:

The objective of this project is to give the research laboratory and technological development of the hydrocarbon chain "Campo Escuela Colorado" belonging to the Industrial University of Santander, a technological device that will handle the conversion from AC to DC to supply the needs of current and voltage required for cathodic protection systems for impressed current hardware that component will also complement the subjects industrial electronics, power electronics, control systems and microcontrollers to the School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications from the university.

The project includes the following phases: the first is the control stage consists of the microcontroller, a trigger circuit and a circuit zero crossing detector that detect the zero crossings of the signal power three-phase transformer also to generate a DC voltage variable in magnitude to control the firing angle of the SCRs, and the second power amplifier is formed by the three-phase transformer and the thyristors.

The result is a user-friendly device that allows rectify the AC signal and make an adjustment to make it continuous, implementing the control method by varying the angle of delay. The above features make the device a versatile and very useful, both in academic and industrial applications.

‡ Undergraduate thesis.

§ Faculty of Physical-mechanical Engineering, School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications, director: MPE. Jaime Guillermo Barrero Pérez.



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	24
1. ASPECTOS GENERALES DE LA CORROSIÓN	26
1.1. FORMAS DE CORROSIÓN	26
1.1.1. Corrosión Galvánica y Uniforme	28
1.1.2. Corrosión por Erosión	31
1.1.3. Corrosión por Agrietamiento	32
1.1.4. Corrosión por Picadura	34
1.1.5. Corrosión por Exfoliación y Disolución Selectiva	35
1.1.6. Corrosión Intergranular o Intercristalina	36
1.1.7. Corrosión de Fractura por Tensión	38
1.2. MÉTODOS DE PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN	41
1.3. SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA	41
1.3.1. Estructuras que Pueden Protegerse con Protección Catódica	43
1.3.2. Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio	44
1.3.2.1. Ventajas de La Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio	46
1.3.2.2. Desventajas de La Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio	46
1.3.2.3. Aplicación de Los Sistemas de Ánodos de Sacrificio	47
1.3.3. Protección Catódica Por Corriente Impresa	48
1.3.3.1. Fuentes de Energía: Rectificadores	50
1.3.3.2. Ventajas de La Protección Catódica por Corriente Impresa	51
1.3.3.3. Desventajas de La Protección Catódica por Corriente Impresa	51
1.3.3.4. Aplicaciones de Protección Catódica por Corriente Impresa	51
1.3.4. Protección Catódica por Mallas de Titanio	52
1.3.4.1. Ventajas de la Protección Catódica por Mallas de Titanio	53
1.3.4.2. Desventajas de la Protección Catódica por Mallas de Titanio	53
1.3.5. Cama Anódica	53
1.4. PRUEBAS REALIZADAS EN CAMPO	54
1.4.1. Toma de Potenciales a Los Tanques de almacenamiento de Crudo	55
1.4.2. Medición de la Resistividad del Terreno	57
1.4.3. Prueba de Requerimiento de Corriente	59
2. DISEÑO DEL RECTIFICADOR TRIÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA	62
2.1. ETAPA DE MANDO	63
2.1.1. Circuito detector de cruces por cero	64
2.1.2. Circuito de Control	67
2.1.3. Circuito de Sensado	70
2.1.3.1. Fase de sensado de la corriente	71
2.1.3.2. Fase de sensado de la tensión	72
2.2. ETAPA DE AISLAMIENTO	73



2.3.	ETAPA DE POTENCIA _____	76
2.3.1.	Transformador trifásico _____	77
2.3.2.	Circuito rectificador trifásico _____	78
2.3.2.1.	Características Principales de los SCRs _____	80
2.4.	PROTECCIONES _____	82
2.4.1.	Red Snubber _____	82
2.4.2.	Interruptor automático o <i>breaker</i> _____	83
2.4.3.	Fusibles _____	85
2.4.4.	Fusible térmico o termostato _____	85
 3. DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL PARA EL SISTEMA ELECTRÓNICO DE RECTIFICACIÓN _____		 86
3.1.	ALGORITMO DE CONTROL PARA LOS PULSOS DE DISPARO _____	86
3.1.1.	Detección de cruces por cero y secuencia de la red _____	87
3.1.2.	Generación de los pulsos _____	88
3.2.	ALGORITMO DE CONTROL DE TENSIÓN Y CORRIENTE DE SALIDA _____	91
3.2.1.	Muestro de señales de ingreso al microcontrolador _____	91
3.2.2.	Control de tensión y corriente _____	92
 4. PRUEBAS DE LABORATORIO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS _____		 94
4.1.	PRUEBAS REALIZADAS A LA ETAPA DE MANDO _____	94
4.1.1.	Pruebas realizadas al Circuito de Cruces por Cero _____	94
4.1.2.	Pruebas realizadas al Circuito de Control _____	97
4.2.	PRUEBAS REALIZADAS A LA ETAPA DE POTENCIA _____	101
 5. CONCLUSIONES _____		 105
5.1.	CONCLUSIONES _____	105
5.2.	OBSERVACIONES _____	107
5.3.	MEJORAS Y SUGERENCIAS FUTURAS _____	107
 BIBLIOGRAFÍA _____		 109
RECTIFICADOR _____		111
MICROCONTROLADOR _____		111
PWM _____		111
SCR _____		112
TRANSFORMADOR _____		112
RESISTENCIA DE DERIVACIÓN _____		113
OPTOACOPLADOR _____		113
DETECTOR DE CRUCE POR CERO _____		113
PROTECCIÓN CATÓDICA _____		114
 ANEXO B. CONTENIDO FOTOGRÁFICO DEL RECTIFICADOR CONTROLADO _____		 115
 ANEXO C. CIRCUITO IMPRESO MEDIANTE EAGLE LAYOUT EDITOR PROFESSIONAL-TRIAL		
118		



ANEXO D. HOJA DE DATOS DE LOS ELEMENTOS ELECTRÓNICOS UTILIZADOS	120
ANEXO E. CÓDIGO GENERAL DEL CIRCUITO DE CONTROL MEDIANTE CODEWARRIOR IDE 6.3	130



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de corrosión. -----	28
Figura 2. Corrosión uniforme. -----	30
Figura 3. Corrosión por Erosión. -----	31
Figura 4. Corrosión por Agrietamiento. -----	33
Figura 5. Corrosión por Picadura. -----	35
Figura 6. Corrosión por Exfoliación. -----	36
Figura 7. Corrosión Intergranular o Intercristalina. -----	38
Figura 8. Celda de corrosión Microscópica. -----	42
Figura 9. Protección Catódica de una Estructura. -----	43
Figura 10. Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio. -----	45
Figura 11. Protección Catódica por Corriente Impresa. -----	49
Figura 12. Esquema de un Rectificador de Protección Catódica. -----	50
Figura 13. Prueba realizada tomando como referencia una esponja húmeda. -----	55
Figura 14. Prueba realizada tomando como referencia el suelo. -----	56
Figura 15. Montaje para la toma de resistividad por el método de Wenner. -----	57
Figura 16. Montaje realizado en la prueba de requerimiento de corriente. -----	59
Figura 17. Modelo por etapas del sistema de Rectificación Implementado. -----	62
Figura 18. Diagrama de bloques de la etapa de mando. -----	63
Figura 19. Circuito detector de cruces por cero para la fase A. -----	64
Figura 20. Características principales del fototransistor 4N26. -----	65
Figura 21. Características Principales de la compuerta inversora 74LS14. -----	65
Figura 22. Señales de entrada (verde) y salida (azul) del circuito detector de cruces por cero. -----	66
Figura 23. Distribución de pines para el MCF51JM128 LQFP/QFP de 44 pines. -----	68
Figura 24. Circuito de sensado. -----	70
Figura 25. Características Principales resistencia Shunt. -----	71
Figura 26. Características Principales del circuito integrado INA128. -----	72
Figura 27. Características Principales del circuito integrado ISO124. -----	72
Figura 28. Etapa de aislamiento. -----	73
Figura 29. Diagrama de pines para el driver TLP250. -----	74
Figura 30. Diseño de la fuente de alimentación de los drivers TLP250. -----	75
Figura 31. Transformador de alimentación para las fuentes de 17 VDC. -----	76
Figura 32. Diagrama de bloques de la etapa de potencia. -----	77
Figura 33. Puente Rectificador trifásico y protecciones. -----	79
Figura 34. Comparativa de los dispositivos de potencia. -----	80
Figura 35. Características principales del dispositivo semiconductor de potencia utilizado. -----	81
Figura 36. Red Snubber de apagado y resistencia de compuerta y cátodo. -----	83
Figura 37. Breaker eléctrico. -----	84



Figura 38.Fusible eléctrico.	85
Figura 39.Retardo de sincronización con respecto a la tensión de línea.	87
Figura 40.Diagrama de flujo de detección de cruces por cero y secuencia de la red.	88
Figura 41.Diagrama de flujo para envío de pulsos de encendido según la secuencia seleccionada.	90
Figura 42.Diagrama de flujo para el muestreo de las señales de salida.	92
Figura 43.Diagrama de flujo para el control de corriente y tensión de salida.	93
Figura 44.Formas de onda del circuito detector de cruces por cero. Señal de fase A (verde), forma de onda medida a la salida del fototransistor 4N26 (rojo).	95
Figura 45.Formas de onda del circuito detector de cruces por cero obtenidas por medio del osciloscopio. Señal de fase A (amarillo), forma de onda medida a la salida del fototransistor 4N26 (azul).	95
Figura 46.Formas de onda del circuito detector de cruces por cero. Señal de fase A (verde), forma de onda medida a la salida del integrado 74LS14 (azul).	96
Figura 47.Formas de onda del circuito detector de cruces por cero obtenidas por medio del osciloscopio. Señal de fase A (azul), forma de onda medida a la salida del circuito integrado 74LS14 (amarillo).	96
Figura 48.Señales de salida de los cruces por cero fase A (azul) con fase C (amarilla).	97
Figura 49.Señales de salida del microcontrolador para los tiristores T1 (azul) y T3 (amarillo).	98
Figura 50.Señales de salida del microcontrolador para los tiristores T4 (azul) y T5 (amarillo).	98
Figura 51.Simulación de la señal de tensión rectificadora con $\alpha=0$	102
Figura 52.Señal de tensión rectificadora con $\alpha=0$ obtenida con Osciloscopio.	102
Figura 53.Simulación de la señal de tensión rectificadora con $\alpha=30$	103
Figura 54.Señal de tensión rectificadora con $\alpha=30$ obtenida con Osciloscopio.	103
Figura 55.Simulación de la señal de tensión rectificadora con $\alpha=60$	104
Figura 56.Señal de tensión rectificadora con $\alpha=60$ obtenida con Osciloscopio.	104



LISTA DE TABLAS

Tabla 1.Regiones de Utilización Semiconductores de Potencia.-----	54
Tabla 2.Relación Entre El Potencial y El Riesgo de Corrosión en Acero Enterrado. -----	56
Tabla 3.Datos obtenidos en la prueba de potencial realizado en campo. -----	57
Tabla 4. Resistividad del suelo vs grado de corrosividad. -----	58
Tabla 5.Datos de las resistividades del suelo de la Estación Colorado tomados en cuatro puntos de la estación.-----	58
Tabla 6.Pines usados del Microcontrolador y su propósito en el proyecto. -----	69
Tabla 7. Especificaciones y Características del Transformador Trifásico. -----	77
Tabla 8. Especificaciones y Características del Interruptor Automático. -----	84
Tabla 9. Ciclo de trabajo de los semiconductores para secuencia positiva. -----	89
Tabla 10. Ciclo de trabajo de los semiconductores para secuencia negativa.-----	89
Tabla 11.Comprobación del control de tensión implementado en el sistema de rectificación. ----	100



LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. DEFINICIONES Y TERMINOS	-----111
ANEXO B. CONTENIDO FOTOGRÁFICO DEL RECTIFICADOR CONTROLADO	-----115
ANEXO C. CIRCUITO IMPRESO MEDIANTE EAGLE LAYOUT EDITOR PROFESSIONAL-TRIAL	-----118
ANEXO D. HOJA DE DATOS DE LOS ELEMENTOS ELECTRÓNICOS UTILIZADOS	-----120
ANEXO E. CÓDIGO GENERAL DEL CIRCUITO DE CONTROL MEDIANTE CODEWARRIOR IDE 6.3	--130



INTRODUCCIÓN

En el movimiento contemporáneo de la industria de los hidrocarburos, la corrosión es la causa general de la alteración y deterioro de la mayor parte de los materiales naturales o fabricados por el hombre, desgraciadamente, no sufrimos sus efectos hasta que estos se hacen visibles. La industria petrolífera se ve afectada por este fenómeno ya que muchas de sus estructuras para la extracción, desplazamiento y almacenamiento de crudo se encuentran en contacto con el suelo en donde la intensidad de corrosión dependerá de diversos factores tales como el contenido de humedad, composición química, pH del suelo, etc. Por esta razón, es necesaria la oportuna utilización de una técnica de protección catódica, ya que en los campos petroleros las estructuras metálicas a proteger tienen un costo elevado.

Una de las características fundamentales en un sistema de corriente impresa es que su fuente de energía para proteger la estructura es externa y generalmente se obtiene de rectificadores controlados de corriente continua teniendo como ventaja el control exterior de la fuente de alimentación. Se debe tener presente que la protección catódica no elimina la corrosión, pero si es capaz de retardar su proceso, y así poder darle una vida útil prolongada a la estructura metálica a proteger.

En este trabajo se presenta el diseño y la implementación de un rectificador trifásico controlado basado en un estudio previo realizado en las instalaciones del campo escuela colorado ubicada en la Vereda Los Colorados corregimiento de Yarima en el Municipio de San Vicente de Chucuri en Santander, Colombia en donde se plasman las características del suelo y con los cuales se desea implementar un sistema de protección catódica que contrarresten los efectos de la corrosión en las estructuras metálicas allí presentes.



Para la realización de este proyecto fue necesario ejecutar una serie de etapas iniciando con la recopilación de datos, en donde se estudian los diferentes requerimientos de tensión, corriente y resistividad del suelo, con el fin de realizar el sistema de protección catódica en las estructuras metálicas que se encuentran en La Estación Colorado. Posteriormente se realizó el diseño del rectificador que se desea implementar bajo los requerimientos necesarios, estipulados al tiempo de estudiar los datos recogidos en la primera etapa. Esencialmente se busca establecer la capacidad de corriente y voltaje que este debe generar para que sea una herramienta optima en un sistema de protección catódica. En esta fase también se seleccionaron los implementos a utilizar como son la tarjeta de desarrollo, el tipo de SCR'S y el transformador. Como tercera etapa se procede a la implementación del diseño realizado en donde se requiere que todos los dispositivos elegidos se unan para así llegar a tener la culminación del rectificador deseado. Por último se muestran los resultados de las pruebas realizadas al rectificador con propósito de obtener sus parámetros de rendimiento y poder evaluar el desempeño del rectificador según lo estipulado anteriormente.

Vale la pena aclarar que los recursos utilizados en este proyecto de grado son financiados por El Proyecto Campo Escuela Colorado, que nace del convenio entre la Universidad Industrial de Santander y Ecopetrol. El financiamiento económico tiene un valor de \$7.500.000.



1. ASPECTOS GENERALES DE LA CORROSIÓN

El suelo por su contenido variable de humedad, sales y materia orgánica en descomposición es el electrolito más complejo de todos los que se pueden encontrar, y por lo general se dan muchas variaciones en la velocidad de corrosión de los metales. Un suelo natural contiene los siguientes elementos: arena, arcilla, cal y humus. Estos componentes pueden estar mezclados en el suelo en diferentes proporciones que darán lugar a distintos grados de agresividad.

La velocidad de corrosión se relaciona con la resistividad del terreno; la resistividad de un terreno depende, en particular, de su estructura, de las dimensiones de sus partículas constituyentes, de la porosidad y permeabilidad, del contenido de agua (humedad) y del contenido de iones. En cambio, la temperatura no ejerce una influencia tan marcada. En lo que se refiere a la acidez, los suelos muy ácidos ($\text{pH} < 5.5$) pueden motivar una rápida corrosión del metal desnudo, y la agresividad del suelo aumenta con el incremento de la acidez (disminución del pH), pero estos valores de pH no son normales. La mayor parte de los suelos tienen pH comprendidos entre 5.0 y 8.0, en cuyo caso la corrosión depende de otros factores.

1.1. FORMAS DE CORROSIÓN

La corrosión suele presentarse en variadas formas y de diferentes maneras, pero fundamentalmente su clasificación se debe a uno de los siguientes factores:

- i. *La naturaleza de la sustancia corrosiva.* La corrosión se puede clasificar como húmeda o seca, para la primera se requiere un líquido o humedad mientras que para la segunda, las reacciones son desarrolladas con gases



a alta temperatura.

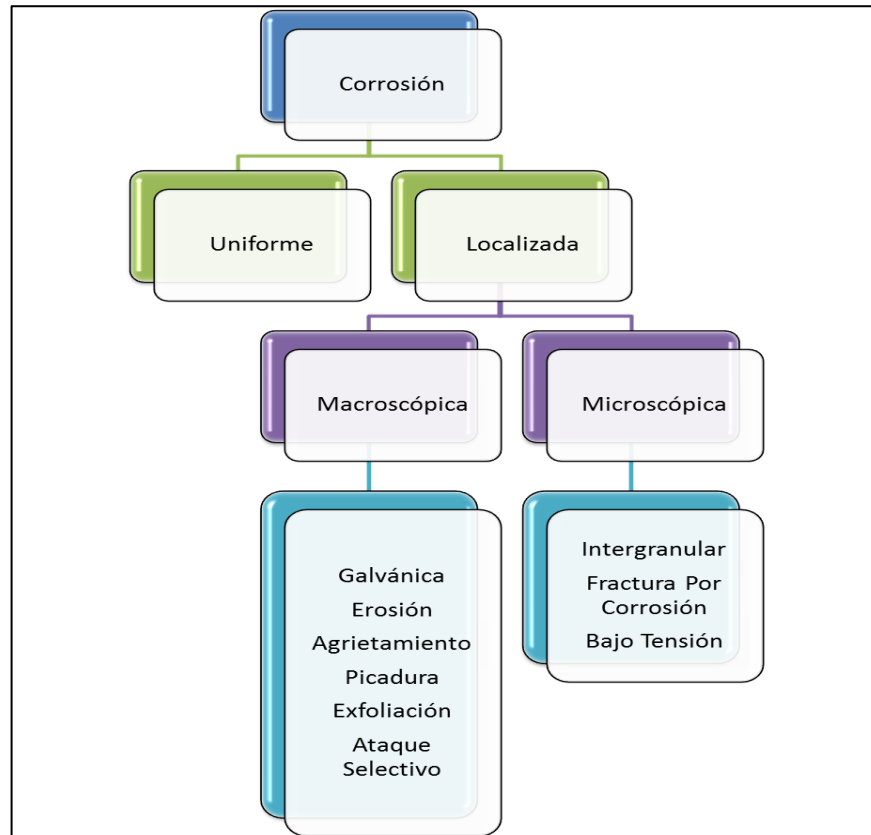
- ii. *Mecanismo de corrosión.* Este comprende las reacciones químicas y electroquímicas.
- iii. *Apariencia del metal corroído.* La corrosión puede ser uniforme y entonces el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien, puede ser localizada, en cuyo caso solamente resultan afectadas áreas pequeñas.

La clasificación por apariencia, uniforme o localizada, es muy útil para un postulado preliminar, que en caso de requerirse en forma más completa, necesita del establecimiento de las diferencias entre la corrosión localizada de tipo macroscópico y el ataque microscópico local. En el ataque microscópico la cantidad de metal disuelto es mínimo y puede conducir a daños muy considerables antes de que el problema sea perceptible. [1]

Los diferentes tipos de corrosión se representan en el siguiente esquema (ver figura 1).



Figura 1. Tipos de corrosión.



Fuente: Tesis de Pregrado Instituto Politécnico Nacional- México D.C.¹

1.1.1. Corrosión Galvánica y Uniforme

La irrupción uniforme sobre grandes áreas de una superficie metálica es la forma más común de la corrosión y puede ser húmeda o seca, electroquímica o química, presentándose la necesidad de una adecuada selección de los materiales de construcción y los métodos de protección, para realizar el control anticorrosión (Ver figura 2).

La corrosión uniforme es el tipo corrosivo más fácil de medir, por lo que las fallas



imprevistas se pueden evitar simplemente por inspección regular de la estructura metálica.

La corrosión galvánica se despliega cuando dos metales diferentes se encuentran en contacto o conectados por medio de un conductor eléctrico, expuestos a una solución conductora. En este caso, se halla una diferencia de potencial eléctrico entre los metales y sirve como puente directo para el paso de la corriente eléctrica a través del agente corrosivo, de tal forma que el flujo de corriente corroe uno de los metales del par formado. Si la diferencia de tensión entre los metales diferentes es grande, mayor será la probabilidad de que se presente corrosión galvánica en uno de ellos, permitiendo de esta forma, el deterioro progresivo del metal. El metal que se corroe recibe el nombre de metal activo, mientras que el que no sufre daño se le denomina metal más noble.

El área de cada uno de los metales es de vital importancia, cuando de corrosión se trata, ya que un área muy grande de metal noble comparada con el metal activo, acelerará la corrosión, caso contrario ocurre si el área mayor fuera la del metal activo comparada con la del metal noble, ya que el ataque corrosivo disminuye.

Figura 2. Corrosión uniforme.



**Fuente: Tesis de Pregrado Instituto Politécnico Nacional- México
 D.C.¹**

La corrosión galvánica a menudo puede ser reconocida por el incremento del ataque junto a la unión de los metales, como se indica en la figura anterior, y este tipo puede ser controlado por el uso de aislamientos o restringiendo el uso de uniones de metales cuando ellos forman diferencias de potencial muy grande en el medio ambiente en el que se encuentran. La diferencia de potencial puede ser medida, utilizando como referencia la serie galvánica de los metales y aleaciones que se presentan más adelante, en la serie de los potenciales tipo (estándar) de óxido de reducción. [1]

Otro método para reducir la corrosión galvánica, es evitar la presencia de grandes áreas de metal noble con respecto a las de metal activo.

1.1.2. Corrosión por Erosión

Este tipo de corrosión se presenta, cuando el movimiento del medio corrosivo sobre la superficie metálica incrementa la velocidad de ataque debido a desgaste mecánico. La importancia relativa del desgaste mecánico y la corrosión, es a menudo difícil de establecer y varía grandemente de una situación a otra, y el mecanismo de la erosión generalmente se atribuye a la remoción de películas superficiales protectoras, como por ejemplo, películas de óxido formadas por el aire, o bien, productos adherentes de la corrosión.

La corrosión por erosión, usualmente tiene el aspecto de picaduras poco profundas de fondo terso, además el ataque puede presentar una distribución direccional debido al camino seguido por el agente agresivo cuando se mueve sobre la superficie del metal, tal y como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Corrosión por Erosión.



**Fuente: Tesis de Pregrado Instituto Politécnico Nacional- México
 D.C.¹**



La corrosión por erosión se observa con frecuencia en impulsores de bombas, agitadores, codos y cambios de dirección de tuberías. Los líquidos con suspensión conteniendo partículas sólidas duras pueden igualmente causar este tipo de problema. Además este desgaste tiende a crecer bajo condiciones de alta velocidad, turbulencia y choque; que podría evitarse con cambios en el diseño de las estructuras metálicas o por selección de materiales más resistentes.

Existen dos formas especiales de corrosión por erosión:

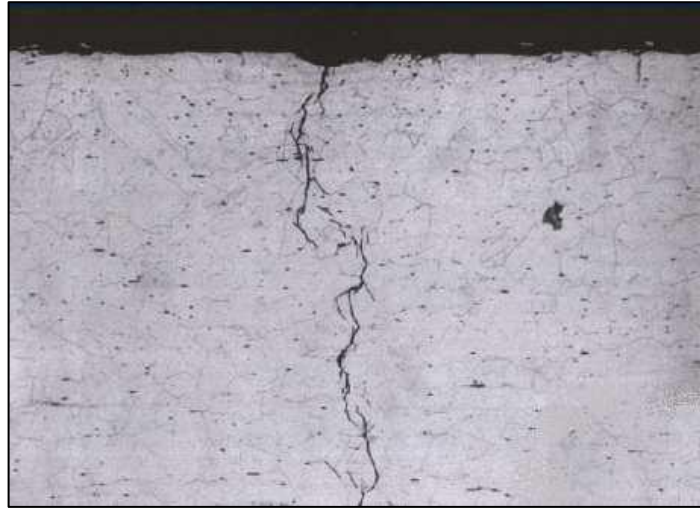
- Cavitación
- Desgaste (*fretting*).

La primera se debe al colapso y la formación de burbujas de vapor en la superficie del metal, y la segunda ocurre cuando las piezas de metal se deslizan una sobre la otra, causando daño mecánico a una o ambas piezas (ver figura 3) y el deslizamiento es habitualmente un resultado de la vibración.

1.1.3. Corrosión por Agrietamiento

Una grieta en condiciones ambientales, con el tiempo puede volverse de una superficie limpia y abierta, a un entorno corrosivo, debido al ambiente agresivo en el que está sometida. Las grietas o hendeduras generalmente se encuentran en los empaques, traslapes, tornillos, remaches, etc., y también pueden formarse por depósitos de suciedad, productos de la corrosión y raspaduras en las películas de recubrimiento como se aprecia en la figura 4.

Figura 4. Corrosión por Agrietamiento.



**Fuente: Tesis de Pregrado Instituto Politécnico Nacional- México
 D.C.¹**

La corrosión por agrietamiento, usualmente se atribuye a los siguientes factores:

- Escasez de oxígeno en la grieta.
- Agotamiento de Inhibidor en la grieta.
- Cambios de acidez en la grieta o hendidura.
- Desarrollo de iones diferentes en la hendidura.

Al igual que todos los tipos de corrosión localizada, la corrosión por agrietamiento no ocurre en todas las combinaciones metal-agente corrosivo, y algunos materiales son más susceptibles para producirla que otros, como por ejemplo, aquellos que dependen de las películas protectoras de óxido formadas por el aire



para adquirir su resistencia a la corrosión, tal y como sucede con el acero inoxidable y el titanio. Estos materiales pueden ser aleados para mejorar su resistencia y el diseño deberá hacerse de tal manera, que se reduzcan las hendiduras, tratando de mantener las superficies limpias para combatir este tipo de corrosión.

1.1.4. Corrosión por Picadura

La corrosión por picadura se presenta por la formación de orificios en una superficie relativamente libre de corrosión y las picaduras pueden tener varias formas. Prácticamente la forma de una picadura es la responsable de su propio avance, además una picadura puede ser considerada como una grieta o hendidura de acuerdo a su formación.

Para reducir la corrosión por picadura es necesario mantener una superficie limpia y homogénea, por ejemplo, un metal homogéneo y puro con una superficie muy pulida debe ser mucho más resistente que una superficie que tenga incrustaciones, defectos o rugosidad.

La corrosión por picadura es un proceso lento que puede tardar meses, inclusive años antes de ser visible, pero que evidentemente, causará fallas inesperadas. El pequeño tamaño de la picadura y las minúsculas cantidades de metal que se disuelven al formarla, hacen que la detección de ésta sea muy difícil en las etapas iniciales (Ver figura 5).



Figura 5. Corrosión por Picadura.



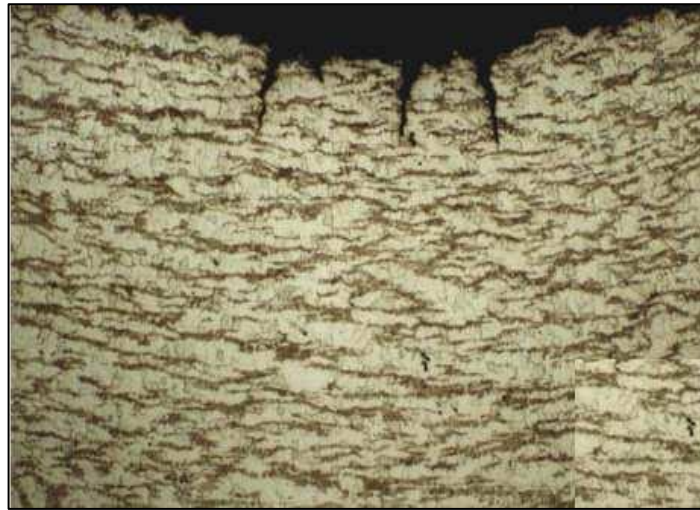
Fuente: Tesis de Pregrado Instituto Politécnico Nacional- México D.C.¹

La limpieza de la superficie y la selección de materiales resistentes a la formación de picaduras en un medio ambiente determinado, es generalmente el camino más seguro para evitar este tipo de corrosión.

1.1.5. Corrosión por Exfoliación y Disolución Selectiva

La corrosión por exfoliación es una corrosión subsuperficial que comienza sobre una superficie limpia, pero se esparce debajo de ella, difiere de la corrosión por picadura en que el ataque tiene una apariencia laminar. Capas completas de material son corroídas y el ataque es generalmente reconocido por el aspecto escamoso y en ocasiones ampollado de la superficie como se observa en la figura 6.

Figura 6. Corrosión por Exfoliación.



***Fuente: Tesis de Pregrado Instituto Politécnico Nacional- México
 D.C.¹***

La corrosión por disolución selectiva se produce al efectuarse la remoción de uno de los elementos de una aleación siendo el ejemplo más común la eliminación del zinc en aleaciones de cobre-zinc, conocido con el nombre de dezincificación. Este fenómeno corrosivo produce un metal poroso que tiene propiedades mecánicas muy pobres y obviamente el remedio a este caso es el empleo de aleaciones que no sean susceptibles a este proceso.

1.1.6. Corrosión Intergranular o Intercristalina

Para entender este tipo de ataque es necesario considerar que cuando un metal fundido se cuela en un molde, su solidificación comenzó con la formación de núcleos al azar, cada uno de los cuales crece en un arreglo atómico regular para formar lo que se conoce con el nombre de granos o cristales.



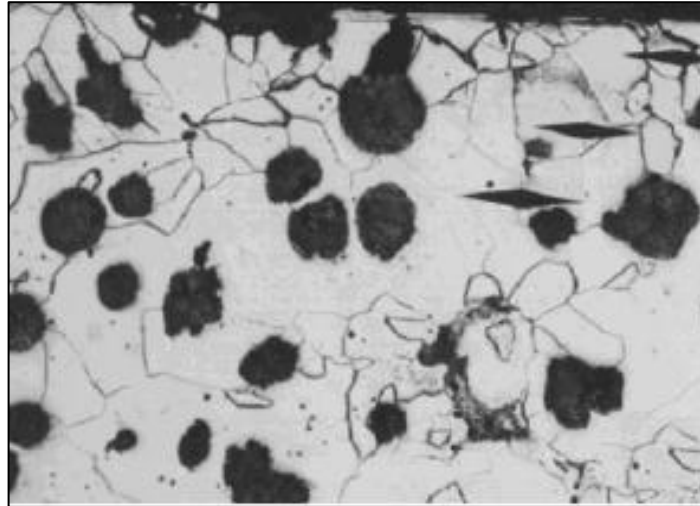
El arreglo atómico y los espaciamentos entre las capas de los granos, son los mismos en todos los cristales de un metal dado; sin embargo, debido a la nucleación al azar, los planos de los átomos en las cercanías de los granos no encajan perfectamente bien y el espacio entre ellos recibe el nombre de límite de grano. Si se dibuja una línea de 2.5 cm de longitud sobre la superficie de una aleación, esta deberá cruzar aproximadamente 100 límites de grano, los límites de grano son a veces atacados preferencialmente por un agente corrosivo y el ataque se relaciona con la segregación de elementos específicos o por la formación de un compuesto en el límite. La corrosión generalmente ocurre, porque el agente corrosivo ataca preferencialmente el límite de grano o una zona adyacente a él, que ha perdido un elemento necesario para tener una resistencia a la corrosión adecuada.

En un caso severo de corrosión ínter cristalina, granos enteros se desprenden debido a la deterioración completa de sus límites, en cuyo caso, la superficie aparecerá rugosa al ojo desnudo y se sentirá rasposa debido a la pérdida de los granos (Ver figura 7).

El fenómeno de límite de grano que causa la corrosión Inter cristalina, es sensible al calor por lo que la corrosión de este tipo, es un subproducto de un tratamiento térmico como la soldadura o el relevado de esfuerzos y puede ser corregido por otro tipo de tratamiento térmico o por el uso de una aleación modificada.



Figura 7. Corrosión Intergranular o Intercristalina.



Fuente: Tesis de Pregrado Instituto Politécnico Nacional- México D.C.¹

1.1.7. Corrosión de Fractura por Tensión

La acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un medio ambiente corrosivo, dará como resultado en algunos casos, la fractura de una aleación metálica. La mayoría de las aleaciones son susceptibles a este ataque, pero afortunadamente el número de combinaciones aleación – corrosivo que causan este problema, son relativamente pocas. Sin embargo, hasta la fecha, este es uno de los problemas metalúrgicos más serios. Los esfuerzos que causan las fracturas provienen de trabajos en frío, soldadura, tratamiento térmicos, o bien, pueden ser aplicados en forma externa durante la operación del equipo.

Las fracturas pueden seguir caminos Ínter cristalinos o transcristalinos (ver Figura 7.) que a menudo presentan una tendencia a la ramificación. Algunas de las características de la corrosión de fractura por tensión, son las siguientes:



- i. Para que esta corrosión exista, se requiere un esfuerzo de tensión.
- ii. Las fracturas se presentan quebradizas en forma macroscópica, mientras que las fallas mecánicas de la misma aleación, en ausencia de un agente corrosivo específico, generalmente presentan ductilidad.
- iii. La corrosión por esfuerzos depende de las condiciones metalúrgicas de la aleación.
- iv. Algunos medios ambientes específicos, generalmente causan fractura en una aleación dada. El mismo medio ambiente no causa fracturas en otras aleaciones.
- v. La corrosión por esfuerzo puede ocurrir en medios ambientes no considerados.
- vi. Agresivos para una aleación dada, por ejemplo la velocidad de corrosión uniforme es baja hasta que se presenta una fractura.
- vii. Largos periodos de tiempo, a menudo años, pueden pasar antes de que las fracturas sean visibles, pero entonces al presentarse, se propagan rápidamente con el resultado de una falla inesperada.
- viii. La corrosión por esfuerzo, no está completamente entendida en la mayoría de los casos; sin embargo, en la actualidad se dispone de muchos datos para ayudar al ingeniero a evitar este problema.

Para combatir la corrosión de fracturas por tensión, es necesario realizar el relevado de esfuerzo o seleccionar un material más resistente. El término de



fragilización por hidrógeno se confunde frecuentemente con la corrosión de fractura por tensión, debido a que el hidrógeno desempeña una función en algunos casos de ésta y para distinguir la fragilización por hidrógeno de la corrosión de fractura por tensión, es conveniente juzgar los siguientes conceptos:

- i. La fractura debido al hidrógeno introducido en el metal sin corrosión de éste, por ejemplo, en la protección catódica, no es definitivamente corrosión de fractura por tensión.
- ii. La fractura debido al hidrógeno producido por una alta velocidad de corrosión.
- iii. Uniforme como en el decapado, tampoco es corrosión de fractura por tensión porque no se necesita tener un esfuerzo mientras el hidrógeno se produce y la fractura se presenta posteriormente cuando la tensión es aplicada después de la reacción corrosiva con liberación de hidrógeno.
- iv. Cuando el hidrógeno se produce por corrosión local en una fractura o picadura sobre un metal sometido a esfuerzo de tensión y resulta una propagación en la fractura, entonces sí se considera que la corrosión pertenece al tipo de corrosión de fractura por tensión.

La corrosión por fatiga, es una forma especial del tipo de corrosión de fractura por tensión y se presenta en ausencia de medios corrosivos, debido a esfuerzos cíclicos repetidos. Estas fallas son muy comunes en estructuras sometidas a vibración continua. [1]



1.2. MÉTODOS DE PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

Existen múltiples formas para protección anti-corrosiva, por lo general antes de la instalación de dicha protección se deben tener en cuenta algunos factores de diseño para prevenir posibles fallas en las estructuras metálicas por corrosión.

Seguidamente se presentan algunas consideraciones en el diseño de las estructuras y algunos de los métodos utilizados para protegerlas de la corrosión.

Consideraciones de Diseño

- Selección del material.
- Evitar áreas catódicas grandes con áreas anódicas pequeñas.
- Aislamiento total de materiales diferentes.
- Evitar las uniones con rosca para materiales muy separados de la serie galvánica.
- Sobredimensionamiento de la parte anódica o que sea fácil de remplazar.

Métodos

- Recubrimientos
- Protección Catódica
- Inhibidores.

1.3. SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

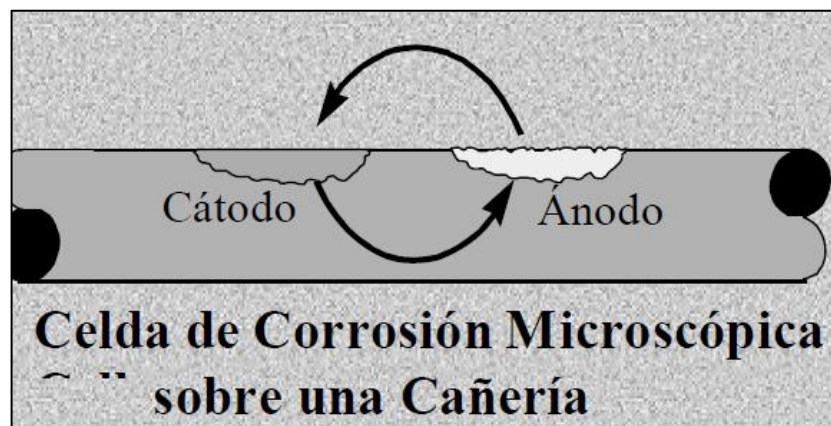
Este enfoque del control de corrosión, utilizando una corriente eléctrica, se limita a los metales expuestos a un electrolito como suelo, agua y concreto. No funciona



en la atmósfera. Frecuentemente, la protección catódica se utiliza junto con otros métodos de control de corrosión, como revestimientos y aislación eléctrica.

Sobre una superficie que se corroe, existen cientos de pilas de corrosión locales, o microscópicas. La Figura 8 muestra una de estas pilas sobre la superficie de una cañería. Existe una diferencia de potencial entre los ánodos y cátodos de estas celdas; esta diferencia de potencial es la que produce la corriente de corrosión.

Figura 8. Celda de corrosión Microscópica.



Fuente: Manual de Enseñanza, NACE Internacional. ²

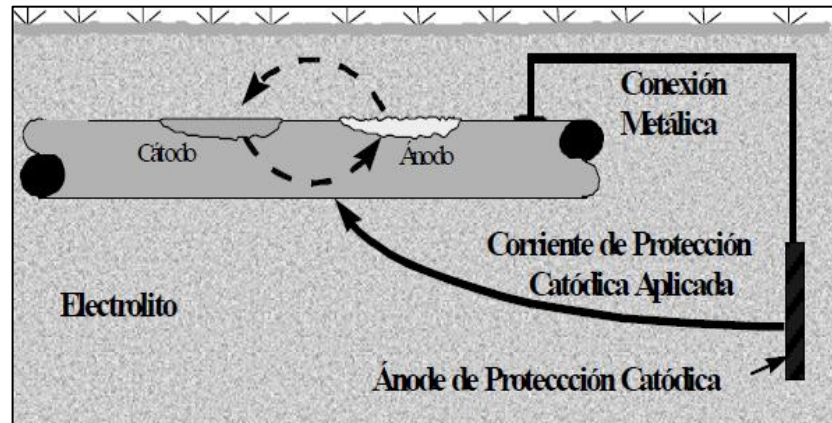
En teoría, la protección catódica implica reducir a cero la diferencia de potencial entre ánodos y cátodos localizados sobre una superficie metálica, reduciendo a cero la corriente de corrosión. Esto se puede lograr generando una corriente que ingrese a la estructura desde un ánodo externo, polarizando los sitios catódicos en dirección electronegativa. A medida que los potenciales de las zonas catódicas se polarizan acercándose a los de las zonas anódicas, se reduce la corriente de corrosión. Cuando los potenciales de todas las zonas catódicas alcanzan el potencial a circuito abierto de la zona anódica más activa, desaparece la diferencia de potencial entre ánodos y cátodos localizados y se detiene la corrosión.

En realidad, la protección catódica no elimina la corrosión. Lo que hace es



transferirla de la estructura a proteger, al ánodo(s) de protección catódica. Así, la estructura se convierte en el cátodo de una celda de corrosión artificial. La corrosión del metal se detiene una vez que la corriente de protección catódica iguala o excede la corriente de corrosión. Esto se ilustra en la Figura 9.

Figura 9. Protección Catódica de una Estructura.



Fuente: Manual de Enseñanza, NACE Internacional. ²

La corriente de protección abandona el ánodo de protección catódica, ingresa al electrolito y pasa en forma de iones a través del electrolito hasta la superficie metálica. En el punto donde esta corriente abandona el ánodo de protección catódica, tiene lugar una reacción anódica. En el punto donde esta misma corriente ingresa a la superficie protegida, tiene lugar una reacción catódica. Luego la corriente circula hacia la conexión metálica y regresa al ánodo.

1.3.1. Estructuras que Pueden Protegerse con Protección Catódica

La mayor parte de las estructuras inmersas en un electrolito puede ser protegidas con protección catódica. Algunos ejemplos de estructuras a las que generalmente



se aplica protección catódica son:

- Cañerías enterradas o sumergidas de acero, hierro, aluminio y cañerías de hormigón pretensado (PCCP).
- Fondos externos (tanto primarios como secundarios) de tanques de almacenamiento a nivel.
- Interiores de tanques de agua.
- Cascos de barco.
- Tanques de balasto.
- Muelles.
- Tablestacado.
- Pilotes de fundación en tierra y en agua.
- Calzadas de puentes.
- Interiores de tanques de almacenamiento de agua caliente.
- Cajas y placas de tubos de intercambiadores de calor.
- Superficies internas de calentadores de crudo.
- Acero en hormigón reforzado.
- Cables de teléfono y cables eléctricos forrados con plomo o acero.

Precaución: Existe la posibilidad de sobreproteger algunos materiales como alambre de pretensado, plomo y aluminio. En aceros de alta resistencia, una corriente de protección catódica elevada puede generar fragilización por hidrógeno; en metales anfóteros, como aluminio o plomo, puede incluso acelerar la corrosión.

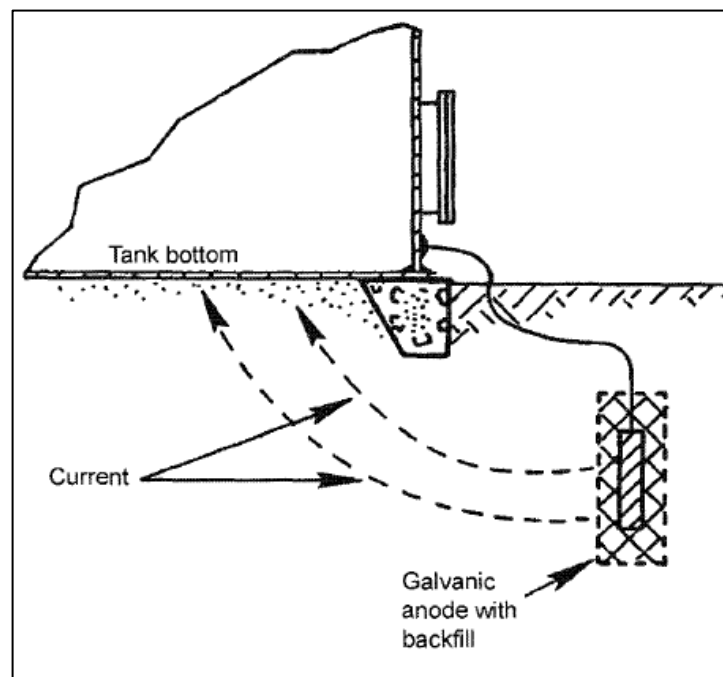
1.3.2. Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio

La celda de corrosión resulta del contacto de metales disímiles, en esa celda uno



de los metales es activo (negativo) con respecto al otro. En la protección catódica con ánodos galvánicos se aprovecha este efecto, estableciendo una celda de metales disímiles lo suficiente fuerte para contrarrestar la corrosión existente en los metales. Esto se realiza mediante la conexión de un metal muy activo al metal a proteger. Este metal se corroerá y por cuanto descargará corriente hacia el metal tal como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio.



Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Cathodic protection of above ground petroleum storage tanks. Washington D.C. API 1997 Second Edition. 11p. API RP 651..

Para el caso de protección catódica con ánodos galvánicos, la protección no elimina la corrosión, este desplaza la corrosión de la estructura protegida a los ánodos galvánicos. Bajo circunstancias normales, la corriente de los ánodos es



limitada. Por esta razón la protección por ánodos galvánicos es normalmente usada donde la corriente requerida para protección es pequeña y en suelos de baja resistividad.

Los ánodos galvánicos están hechos de magnesio, zinc o aluminio, y se instalan enterrados en el suelo rodeados de un relleno y empacados en sacos especiales. Estos se conectan al sistema de forma individual o en grupos. El material de relleno consiste en una mezcla de yeso, bentonita, y sulfato de sodio, que reduce la resistencia e incrementa el área de contacto del ánodo con el suelo.

1.3.2.1. Ventajas de La Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio

Existen múltiples ventajas de este tipo de protección.

- No se necesita una fuente externa de energía.
- La instalación es relativamente fácil.
- La inversión de capital es baja para tanques de diámetro pequeño.
- Los costos de mantenimiento son mínimos.
- Los problemas de interferencia (corrientes vagabundas) son raros.
- Menor frecuencia de monitoreo.

1.3.2.2. Desventajas de La Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio

Al igual que las diversas ventajas, también existen muchas desventajas en este sistema de protección por ánodos de sacrificio.

- Los potenciales de conducción son limitados.



- La corriente de salida es baja.
- Este método es limitado en suelos de baja resistividad.
- Este método no es práctico para proteger estructuras grandes desnudas.

1.3.2.3. Aplicación de Los Sistemas de Ánodos de Sacrificio

Algunas de las condiciones en las que se utilizan sistemas de ánodos galvánicos son:

- Cuando se requiere una corriente relativamente pequeña.
- Normalmente restringido a electrolitos de baja resistividad.
- Para suministrar protección catódica a una porción determinada de la estructura. Algunos operadores instalan un ánodo galvánico en cada uno de los puntos donde se repara una pérdida, en lugar de instalar un sistema de protección catódica completo. Estos casos pueden darse en sistemas de metal desnudo o pobremente revestido, en los que la protección catódica completa sería poco práctica desde el punto de vista del costo.
- Cuando se requiere corriente adicional en áreas problemáticas. Algunas estructuras con sistemas de protección catódica por corriente impresa, pueden tener algunos puntos en que se necesitan pequeñas cantidades de corriente adicional, que pueden suministrarse con ánodos galvánicos. Algunos ejemplos:
 - Válvulas enterradas con revestimiento incompleto o malo.
 - Caños camisa en corto que no pueden ser eliminados.
 - Secciones aisladas en las que el revestimiento está dañado.
 - Zonas en las que la pantalla eléctrica (electrical shielding) impide la distribución efectiva de corriente desde sistemas de corriente impresa



lejanos.

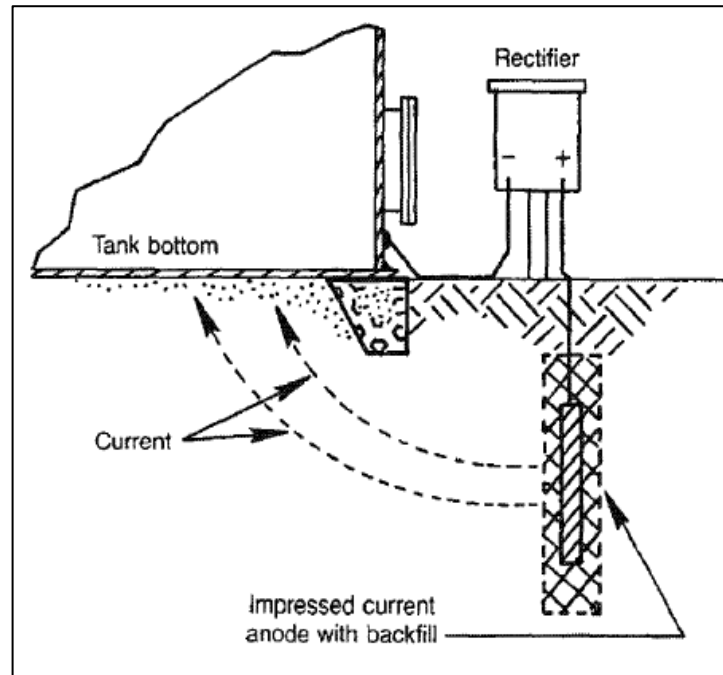
- En casos de interferencia catódica, si las condiciones lo permiten, pueden instalarse ánodos galvánicos en el punto de descarga de la línea ajena para revertir la corriente de interferencia.
- Para suministrar protección catódica a estructuras cercanas a otras estructuras enterradas, donde se hace difícil instalar un sistema por corriente impresa sin generar un problema de interferencia por corrientes vagabundas. Los ánodos galvánicos pueden resultar una opción económica en estas condiciones.
- Los ánodos galvánicos son muy usados para proteger la superficie interna de cajas de intercambiadores de calor y otros recipientes. También se usan dentro de recipientes para tratamiento del crudo, dependiendo de la calidad del revestimiento interno y de la composición química y temperatura de los fluidos.
- En estructuras *off-shore* se pueden usar grandes ánodos galvánicos para proteger los componentes sumergidos.

1.3.3. Protección Catódica Por Corriente Impresa

Para librarse del voltaje de conducción limitado asociado con los ánodos galvánicos, la corriente proveniente de una fuente de energía externa que puede ser impresa sobre el metal usando una cama enterrada y una fuente de poder, así como se muestra en la figura 11.



Figura 11. Protección Catódica por Corriente Impresa.



Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Cathodic protection of above ground petroleum storage tanks. Washington D.C. API 1997. Second Edition. 11p. API RP 651.

La fuente de energía más común es un rectificador, este dispositivo convierte la corriente alterna (CA) a corriente directa (CD).

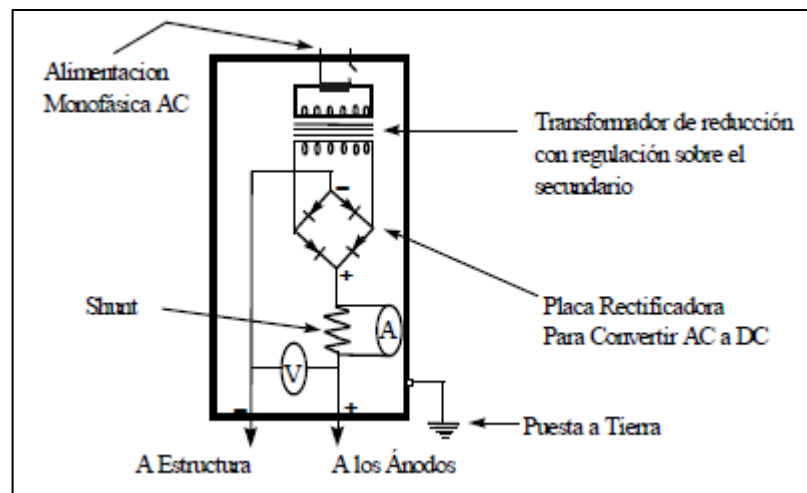
Los ánodos de corriente impresa deben ser de materiales como: grafito, hierro fundido con alto contenido de silicio, metales platinizados, magnetita y mezcla de óxidos metálicos entre otros. Estos ánodos se instalan desnudos con material de relleno especial tal como grafito pulverizado (con alto contenido de carbón). Están conectados individualmente o en grupos a una terminal positiva o a una fuente de corriente directa, mediante conductores aislados. Los ánodos pueden ser localizados en camas o distribuidos cerca, abajo o alrededor, de las estructuras a proteger.



1.3.3.1. Fuentes de Energía: Rectificadores

Lo que comúnmente se llama rectificador, es en realidad un transformador-rectificador. Contiene un transformador, algún medio de ajustar el voltaje, un rectificador para cambiar AC a DC, y diversos controles y otros componentes, dependiendo del uso. La Figura 12 muestra el esquema de un rectificador.

Figura 12. Esquema de un Rectificador de Protección Catódica.



Fuente: Manual de Enseñanza, NACE Internacional. ²

Básicamente, hay tres tipos de rectificadores:

1. Tensión constante — el voltaje DC en los terminales se mantiene constante para cualquier valor de corriente que permite el rectificador.
2. Corriente constante — el valor de corriente se mantiene constante para un amplio rango de valores de carga, hasta el máximo valor permitido de tensión en el rectificador.



3. Potencia constante — el flujo de corriente y voltaje varían para mantener un potencia determinada en la estructura.

Si hay energía AC disponible y es económica, los rectificadores tienen claras ventajas económicas y operativas sobre otras fuentes de energía.

1.3.3.2. Ventajas de La Protección Catódica por Corriente Impresa

Las ventajas de la protección por corriente impresa son:

- Alta corriente de salida capaz de proteger grandes estructuras metálicas.
- Capacidad de corrientes de salida variables.
- Aplicable a casi cualquier resistividad de suelo.

1.3.3.3. Desventajas de La Protección Catódica por Corriente Impresa

Las desventajas de este método son:

- Posibles problemas de interferencia (corrientes vagabundas) sobre estructuras.
- La pérdida de potencia AC que causa que se deteriore la protección.
- Altos costos para instalaciones pequeñas.
- Se requiere seguridad en la ubicación del rectificador.

1.3.3.4. Aplicaciones de Protección Catódica por Corriente Impresa

Algunos usos comunes de los sistemas por corriente impresa son:



- Para grandes requerimientos de corriente, en especial para estructuras desnudas o mal revestidas.
- Para cualquier resistividad (del electrolito).
- Para proteger en forma económica estructuras en las que se han gastado los ánodos galvánicos.
- Para superar problemas de interferencia catódica o por corrientes vagabundas
- Para proteger grande cajas de intercambiadores de calor, calentadores de crudo, y otros recipientes.
- En interiores de tanques de almacenamiento de agua.
- Para fondos externos (primarios y secundarios) de tanques de almacenamiento a nivel.
- Para tanques de almacenamiento enterrados.
- Para componentes sumergidos de estructuras *off-shore*.
Para pilotes de fundación y tablestacados, tanto enterrados como en agua.

1.3.4. Protección Catódica por Mallas de Titanio

Estos ánodos pueden instalarse, como dispersores de corriente de sistemas de protección catódica por corriente impresa, están constituidas por una combinación de óxido de titanio y de rutenio, que se adhiere a un soporte de titanio, mientras se controla el proceso a alta temperatura (700° C), como resultado se obtiene una estructura cristalina y dura que presenta una superficie rugosa, lo cual aminora los problemas de resistencia y facilita el proceso electroquímico.

La capa de activación puede estar formada por varios óxidos de metales, tales como el rutenio, iridio, platino, titanio y Tántalo, siendo la mezclas Ir – Ta – Ti, una de las más resistentes. Estas mallas son de aplicación universal en electrolitos,



desde tierra hasta agua de mar, en cuyo medio soportan densidades de corriente hasta de 700 A/m^2 . La duración de este tipo de ánodo se estima de 75 a 100 años, lo que es de vital importancia si se compara con la duración estimada con otros tipos de ánodos que suele ser como mucho de 20 a 30 años.

1.3.4.1. Ventajas de la Protección Catódica por Mallas de Titanio

La principal ventaja de este tipo de ánodo es su poco peso y facilidad de manejar, además de la gran capacidad de salida de corriente que tiene con una duración de 75 a 100 años.

1.3.4.2. Desventajas de la Protección Catódica por Mallas de Titanio

Una de las desventajas de las mallas es que por su composición y capacidad de salida de corriente se limita su uso a medios de alta resistividad, y los costos de instalación de estas mallas son altos.

1.3.5. Cama Anódica

La cama anódica es el sitio donde se instalan de forma permanente los dispositivos anódicos y no requieren de mantenimiento, estos dispositivos deben ser revisados cuando se tenga la seguridad de una falla en el ánodo o cama anódica y deben remplazarse cuando el tiempo de vida útil para el cual fueron diseñados haya concluido. Sin embargo se debe verificar la corriente de salida de los ánodos y la corriente total de la cama, con el fin de determinar si la cama anódica está funcionando según las especificaciones. Cuando se requiera, los ánodos de la cama anódica se deben humectar con adición de agua limpia para



mejorar la conducción de la corriente de salida del ánodo. [11]

1.4. PRUEBAS REALIZADAS EN CAMPO

Con el propósito de realizar un método efectivo de protección catódica, se efectuaron algunas pruebas de campo realizadas en la Estación Colorado, en donde se encontraron los valores de tensión y corriente para la fabricación del rectificador trifásico controlado.

Como primera medida se recopilaron los datos y parámetros de cada tanque de almacenamiento de crudo, los cuales son necesarios en el momento de diseñar el sistema de protección catódica. A continuación se presenta una tabla en donde se exhiben estos parámetros.

Tabla 1.Regiones de Utilización Semiconductores de Potencia.

PARAMETROS DEL DISEÑO DE PROTECCION CATODICA EXTERIOR		
PARAMETRO	K - 01	K - 02
Diámetro del fondo de los tanques	6.7034 [m]	6.6684[m]
Capacidad	500 Barriles	500 Barriles
Área desnuda según tipo de recubrimiento	100%	100%
Temperatura externa	85 °F	85 °F
Temperatura interna	80 °F	80 °F
Material de fabricación	Lamina	Lamina

Fuente: Autores del Proyecto.

Las pruebas que deben realizarse antes de iniciar un Sistema de Protección anticorrosiva son las siguientes:

- Toma de potencial a la estructura metálica a proteger.
- Medición de resistividad del terreno en el cual se va a realizar la protección



catódica.

- Prueba de requerimiento de corriente para protección exterior de la estructura metálica a proteger.

1.4.1. Toma de Potenciales a Los Tanques de almacenamiento de Crudo

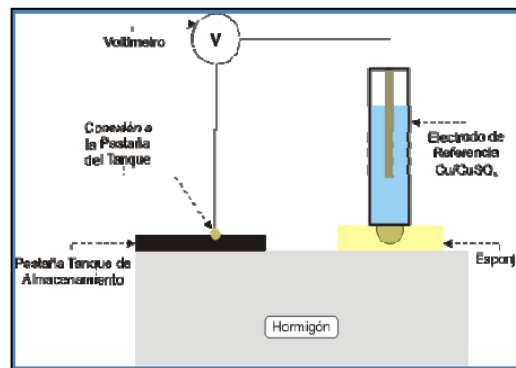
Mediante el uso de la norma ASTM C 876 – 99, se realizó la toma de potencial en campo para determinar si las estructuras se encuentran en un rango de protección catódica (-0.80V a -0.90V) o si por el contrario esta fuera de este rango.

Los materiales que se utilizan para el desarrollo de esta práctica son:

- Electrodo de referencia Cu/CuSO₄
- Voltímetro
- Esponja
- Agua destilada

El montaje de las pruebas realizadas en esta parte se representa en las siguientes figuras.

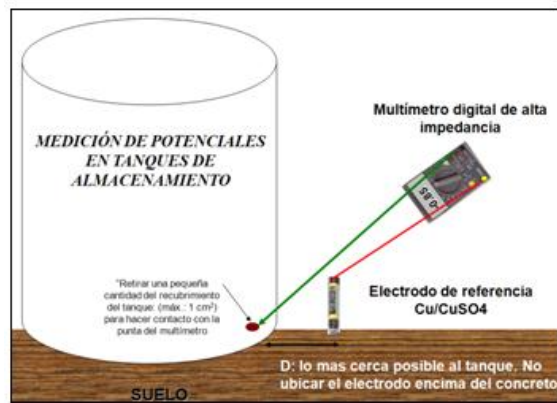
Figura 13. Prueba realizada tomando como referencia una esponja húmeda.



Fuente: Tesis de pregrado UIS.³



Figura 14. Prueba realizada tomando como referencia el suelo.



Fuente: Tesis de pregrado UIS.³

El criterio de interpretación para las mediciones se presenta a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 2. Relación Entre El Potencial y El Riesgo de Corrosión en Acero Enterrado.

POTENCIAL (V vs. CU/CUSO ₄)	CONDICIÓN DE LA ESTRUCTURA
-0,5 a -0.6	Corrosión intensa
-0,6 a -0.7	Corrosión
-0,7 a -0.8	Algún tipo de protección
-0,8 a -0.9	Protección catódica
-0,9 a 1.0	Sobreprotección
-1,0 a -1.1	Aumento de la sobreprotección
-1,1 a -1.4	Cada vez mas grave la sobreprotección, caída del revestimiento y aumento de riesgo de fragilización por hidrogeno

Fuente: Handbook of corrosión Engineering.⁴

En las pruebas realizadas en la Estación Colorado se encontraron los siguientes datos tomados a los tanques de almacenamiento K-01 y K-02.



Tabla 3. Datos obtenidos en la prueba de potencial realizado en campo.

	TANQUE K-01	TANQUE K-02
PRUEBA 1	-0.679 [V]	-0.654 [V]
PRUEBA 2	-0.641 [V]	-0.639 [V]

Fuente: Autores del Proyecto.

Analizando las pruebas obtenidas y comparándolas con la tabla de resultados podemos concluir que los tanques de almacenamiento se encuentran en riesgo de corrosión.

1.4.2. Medición de la Resistividad del Terreno

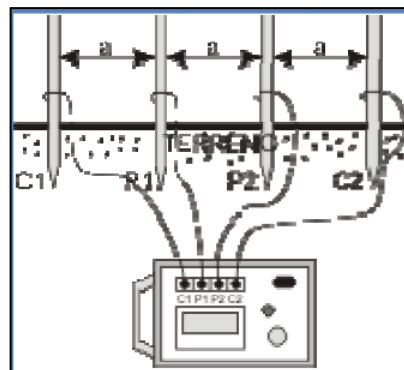
Utilizando el método de cuatro electrodos de Wenner descrito en la norma ASTM G 57 – 06, se desarrollo la medición en cuatro puntos diferentes en la Estación Colorado, con el propósito de obtener un perfil de resistividades del terreno. [2]

Los materiales utilizados para realizar esta prueba fueron los siguientes:

- Teluometro Earth-insulation Tester METREL
- Pines metálicos
- Cinta métrica

El montaje de la prueba se presenta en la siguiente figura.

Figura 15. Montaje para la toma de resistividad por el método de Wenner.



Fuente: Tesis de pregrado UIS.¹¹



En la siguiente tabla encontramos el grado de corrosividad del suelo según su grado de resistividad.

Tabla 4. Resistividad del suelo vs grado de corrosividad.

RESISTIVIDAD DEL SUELO (ohm - cm)	GRADO DE CORROSIVIDAD
0 – 500	Muy Corrosivo
500 – 1000	Corrosivo
1000 – 2000	Moderadamente Corrosivo
2000 – 10000	Medianamente Corrosivo
Por encima de 10000	Despreciable

Fuente: A.W. Peabody. Peabody's Control of Pipeline Corrosion 2ª Edición Pág. 88

Los siguientes fueron los resultados obtenidos en la prueba de resistividad realizada al suelo de la Estación Colorado. Vale la pena aclarar que estas pruebas se realizaron en cuatro puntos diferentes con el propósito de tener un estudio profundo.

Tabla 5. Datos de las resistividades del suelo de la Estación Colorado tomados en cuatro puntos de la estación.

RESISTIVIDADES ESTACIÓN COLORADO			
	DISTANCIA (m)	RESISTIVIDAD (Ω-m)	DISTANCIA TANQUE (m)
PUNTO I	1	7,69	11
	2	7,22	
	4	6,76	
	8	6,17	
	16	124,55	
PUNTO II	1	28,25	3
	2	8,24	

	4	7,68	
PUNTO III	1	89,9	3,6
	2	19	
	4	5,74	
PUNTO IV	1	5,62	2,5
	2	5,74	
	4	5,98	

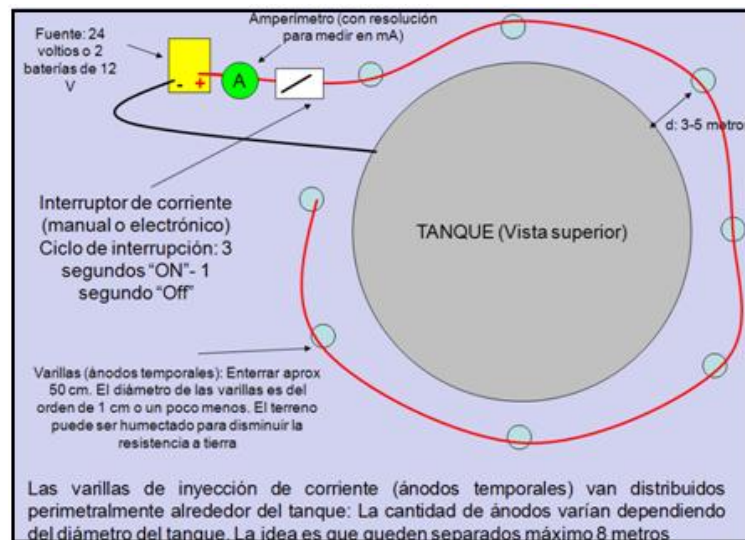
Fuente: Tesis de pregrado UIS.¹¹

De acuerdo con la tabla 3 la resistividad del suelo en La estación Colorado es de 6.74 [Ω -m], este suelo se clasifica como suelo corrosivo, con lo cual se reitera la necesidad de un sistema de protección catódica.

1.4.3. Prueba de Requerimiento de Corriente

Con el objetivo de determinar la corriente requerida para proteger la estructura metálica (tanques de almacenamiento de crudo), se realizaron las pruebas de inyección de corriente, para lo cual se instaló una cama anódica temporal en las instalaciones de la Estación Colorado. El montaje de la prueba realizada se muestra en la siguiente figura.

Figura 16. Montaje realizado en la prueba de requerimiento de corriente.



Fuente: Tesis de pregrado UIS.¹¹



Para determinar la corriente requerida en cada uno de los tanques de almacenamiento de crudo es necesario consultar la siguiente formula.

$$I_{req} = \frac{|(-0,85 - \text{potencial natural})|}{V_{ON} - V_{INSTANT OFF}} * I_{ensayo} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

En donde,

I_{req} : corresponde a la corriente de protección catódica requerida [A].

I_{ensayo} : Corriente aplicada durante el ensayo [A].

V_{ON} : potencial de encendido [V].

$V_{INSTANT OFF}$: potencial registrado después de interrumpir el sistema [V].

Potencial natural: corresponde al valor de potencial de la estructura metálica sin protección catódica, que según las pruebas de campo es de -0.654 [V].

Cabe resaltar que al aplicar la ecuación anterior, debe emplearse el menor valor de potencial natural y el menor valor de la diferencia de potencial ($V_{ON} - V_{INSTANT OFF}$). De esta manera, se obtiene la corriente requerida que garantiza la protección catódica.

Contrastando los resultados obtenidos en la prueba de campo con los realizados en la tesis de Mauro Sergio Percovich Meneses y Néstor Raúl Sanabria Cordero de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales en el año 2009, se puede concluir que el margen de error de los datos es mínimo, por tal motivo se consignan los siguientes valores de corriente requerida, 0.317637A y 0.314325 A para los tanques de almacenamiento K-01 y K-02 respectivamente.

Teniendo presente que la corriente requerida para proteger los tanques de almacenamiento con los que cuenta la Estación Colorado no excede los 10 A, se



diseño y construyo un rectificador trifásico que puede llegar a entregar corrientes del orden de los 200 A.

El propósito de construir un rectificador con grandes características, se debe a que con él se pueden proteger muchas más estructuras metálicas, como tuberías, torres de energía, y demás sistemas que se encuentren empotrados en tierra y se vean afectados por la corrosión. Además se cuenta con una herramienta que tiene una lista de aplicaciones numerosas, las cuales son de gran utilidad en campo, como por ejemplo, procesos electroquímicos, procesos metalúrgicos y de galvanoplastia, alimentación y control de motores de corriente continua entre otras muchas más aplicaciones que son de gran utilidad.

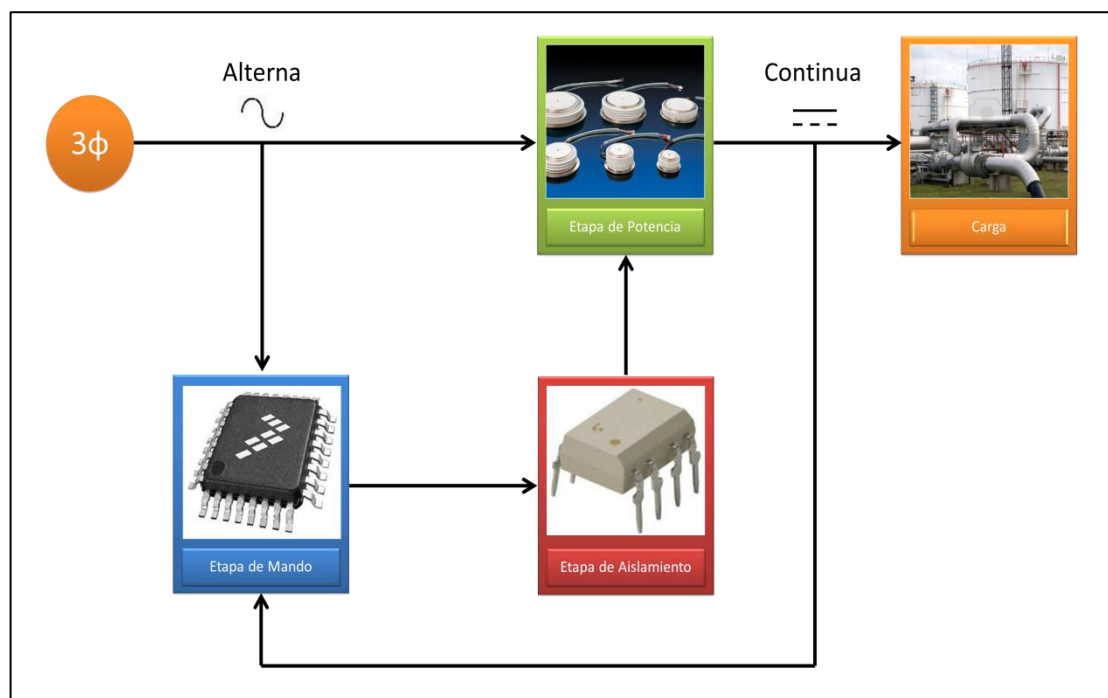
A lo largo de este capítulo se mencionaron las distintas formas de corrosión y los métodos con los cuales se pueden contrarrestar sus efectos. Finalmente podemos concluir que los tipos de corrosión que experimentan las estructuras metálicas en La Estación Colorado, son corrosión galvánica y por agrietamiento, que se controlan con el fin de detener el avance en su proceso degenerativo por medio del método de corriente impresa.

2. DISEÑO DEL RECTIFICADOR TRIÁFÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA

Este capítulo tiene como propósito presentar y exponer cada una de las etapas y partes físicas del proyecto, enfatizando en la importancia de cada componente del sistema y su función dentro del mismo.

El modelo del sistema se encuentra dividido en tres etapas generales, como se muestra en la figura 17.

Figura 17. Modelo por etapas del sistema de Rectificación Implementado.



Fuente: Autores del Proyecto.

Dentro de la etapa de mando se encuentran: el circuito detector de cruces por cero que tiene como finalidad detectar cuando la señal de la red corta el eje de tensión

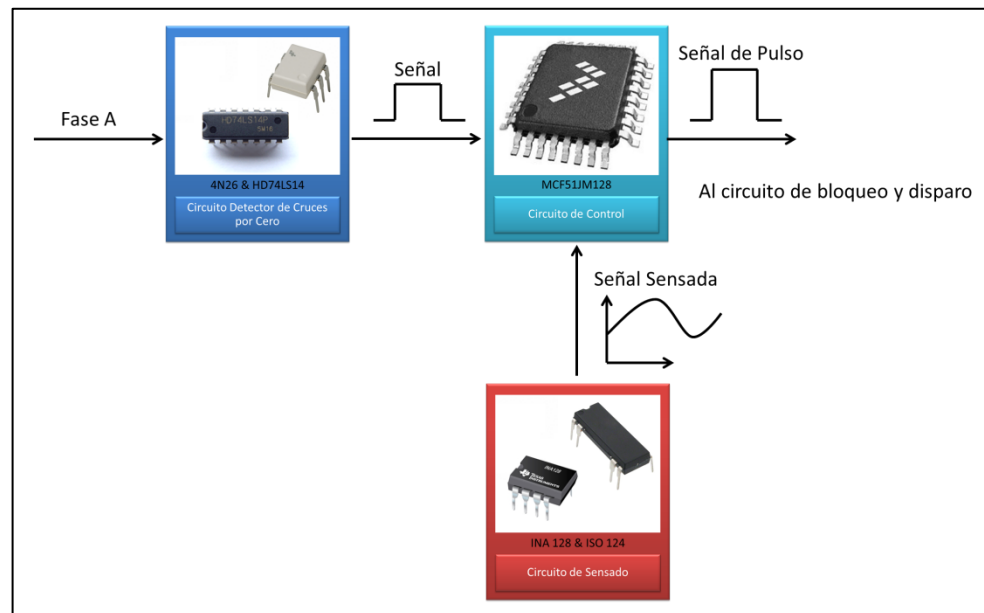


en cero, el circuito control que genera los pulsos de activación de los semiconductores de potencia y el circuito de sensado cuya función es detectar las variaciones en la señal de salida. La etapa de aislamiento se encarga de aislar la etapa de mando con la etapa de potencia y además, suministra las señales adecuadamente para disparar los SCRs. Finalmente se presenta la etapa de Potencia, que se compone por el transformador trifásico y el circuito rectificador trifásico conformado por los SCRs.

2.1. ETAPA DE MANDO

La etapa de mando se encarga de todo lo referente al control y sensado del rectificador. Dentro de esta se despliegan tres circuitos, como se aprecia en la figura 18.

Figura 18. Diagrama de bloques de la etapa de mando.



Fuente: Autores del Proyecto.

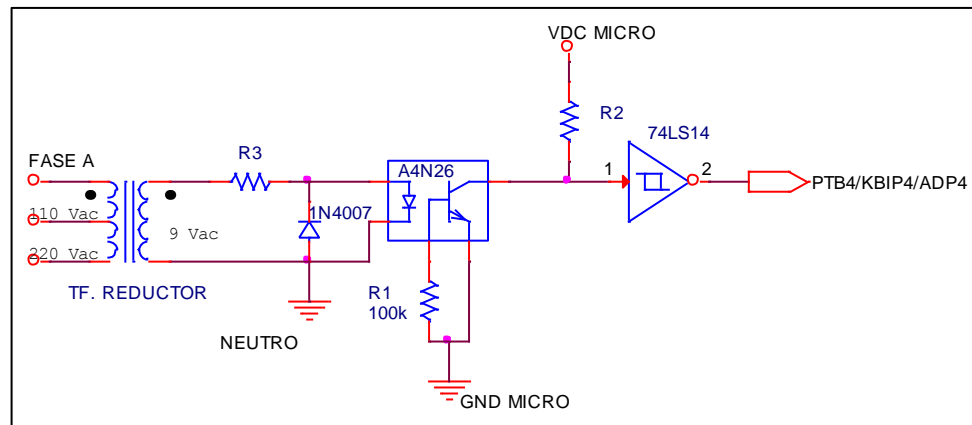


2.1.1. Circuito detector de cruces por cero

Este circuito instaura un punto de referencia para que haya sincronismo entre la señal de disparo de los tiristores y la señal de fase de la red. **

El circuito detector de cruce por cero diseñado para la fase A se muestra en la figura 19, de igual forma se aplica el diseño para las fases A y C.

Figura 19. Circuito detector de cruces por cero para la fase A.

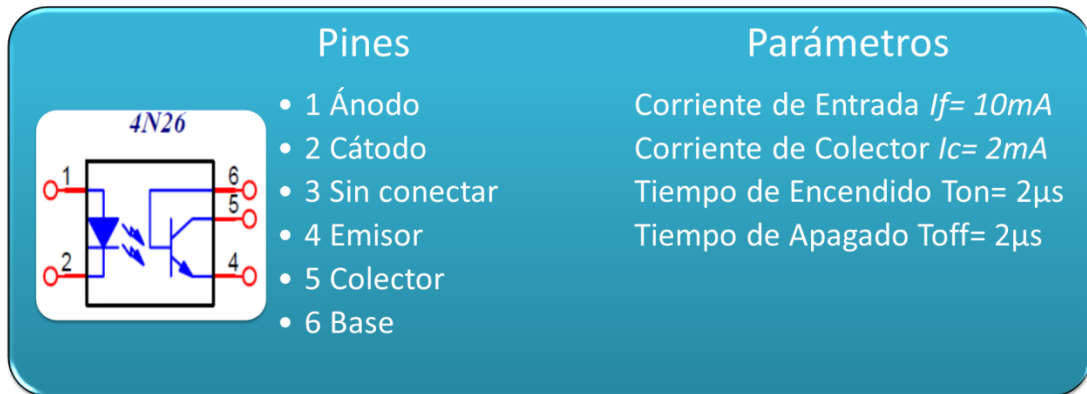


Fuente: Autores del Proyecto.

A continuación se muestran los elementos más representativos de este circuito (Ver figura 20 y figura 21).

**La referencia de entrada al Microcontrolador se origina a partir del cruce por cero de la fase A, pero se desfasa 30° por que la envolvente de la tensión de salida del rectificador se origina con respecto a las tensiones de línea y no con respecto a las tensiones de fase.

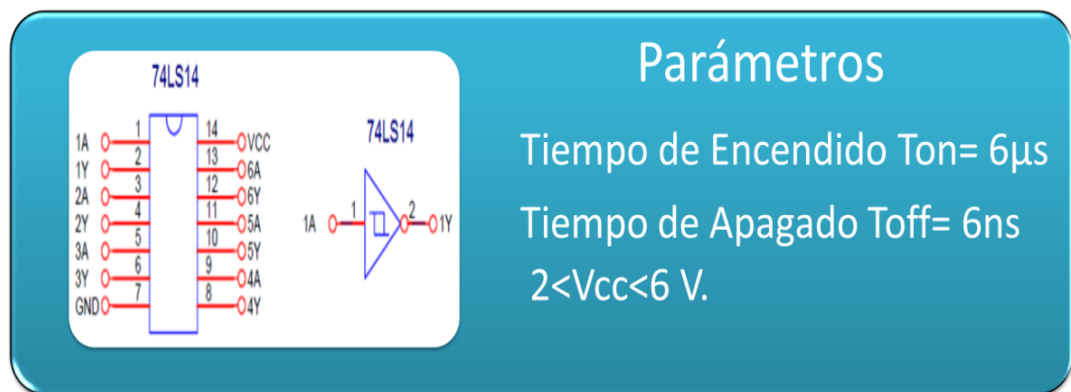
Figura 20. Características principales del fototransistor 4N26.



Fuente: Autores del Proyecto.

La principal característica del fototransistor 4N26 es la capacidad que posee para detectar rápidamente niveles de tensión, generando pulsos de salida según el nivel de voltaje de entrada. Al ser también inversor, hace que la señal cuadrada que se visualiza a la salida de este cambie sus niveles de tensión altos a bajos y viceversa. Las principales características de esta compuerta inversora 74LS14 se pueden observar en la figura 21.

Figura 21. Características Principales de la compuerta inversora 74LS14.



Fuente: Autores del Proyecto.



Para obtener la corriente de entrada de 10 mA sugerida por el fabricante del circuito integrado 4N26 se calcula la resistencia R3 de la siguiente manera:

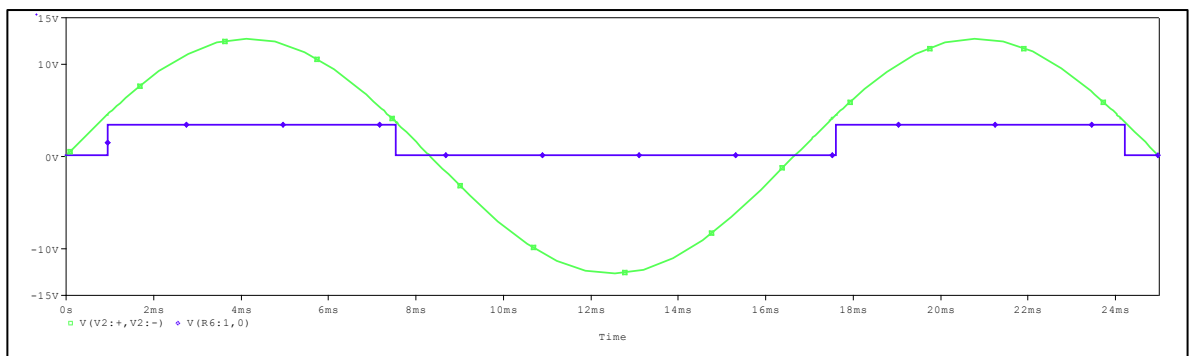
$$R_3 = \frac{V_{mfase_sec}}{I_F} = \frac{V_{mfase_sec}}{0.01} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Y para conseguir una corriente de 2mA en el colector se calcula la resistencia R2 así:

$$R_2 = \frac{V_{DC\ MICRO}}{I_C} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Una vez que la señal pasa por el fototransistor las entradas altas las hace cero y las bajas las ajusta al valor de su alimentación, formando así una onda cuadrada desfasada 180° de la señal de fase. Para obtener el flanco de subida de ésta señal a partir del cero en donde la tensión de fase comienza a hacerse positiva se utiliza un circuito integrado 74LS14. En la figura 22 se presentan las señal de entrada y salida del circuito detector de cruces por cero.

Figura 22. Señales de entrada (verde) y salida (azul) del circuito detector de cruces por cero.



Fuente: Autores del Proyecto.



2.1.2. Circuito de Control

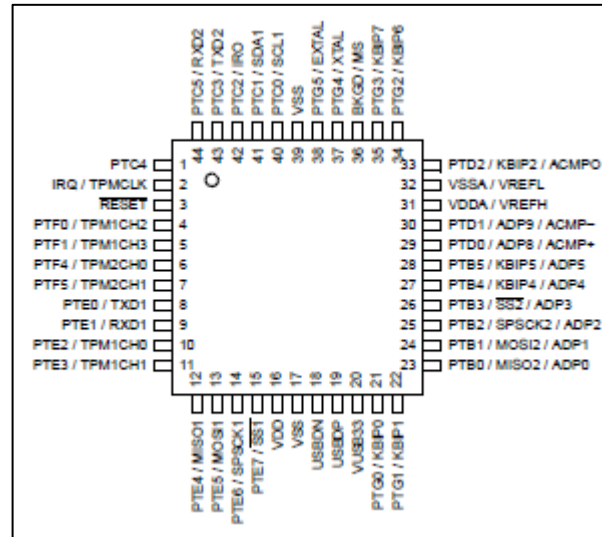
La generación y el control de los pulsos que llegan al puente rectificador trifásico compuesto por los seis tiristores, está a cargo del microcontrolador MCF51JM128 que se programa por medio de la tarjeta de desarrollo DEMOJM de Freescale. El MCF51JM128 es un microcontrolador miembro de la familia ColdFire V1, que ha sido desarrollado con las siguientes características internas:

- Núcleo ColdFire V1 en arquitectura RISC, con puerto para depuración y programación BDM (*Background Debug Module*).
- Velocidad de reloj de hasta 55.33 MHz.
- Hasta 128KBytes de memoria FLASH.
- Hasta 16KBytes de memoria estática SRAM.
- Generación de reloj interno de múltiple propósito.
- Puerto USB-OTG (*USB On The Go*).
- Módulo generador de números aleatorios.
- Comparadores análogos.
- Hasta 12 conversores A/D de 12 bits.
- Dos puertos IIC (*Inter Integrated Circuit*).
- Dos puertos SPI (*Serial Peripheral Interface*).
- Dos puertos SCI (*Serial Communication Interface*).
- Hasta 8 canales temporizadores/moduladores de ancho de pulso TPM (*Timer PWM Module*).
- Contador de tiempo real RTC (*Real Time Counter*).
- Hasta 51/66 pines I/O de propósito general en versiones de 64/80 pines respectivamente.
- Interface para teclado KBI (*KeyBoard Interrupts*).



En la figura 23 se muestra la distribución de pines para el microcontrolador en empaque LQFP/QFP de 44 pines.

Figura 23. Distribución de pines para el MCF51JM128 LQFP/QFP de 44 pines.



Fuente: Microcontroladores de 32 bits ColdFire V1/Familia JM.⁷

En este diseño se utilizaron los siguientes periféricos:

- Un módulo *TPM*, el cual crea una base de tiempo para generar los seis pulsos de disparo.
- 22 pines *GPIO* distribuidos de la siguiente manera: 6 pines para enviar los pulsos a los 6 *SCRs*, 2 pines para la determinación de la secuencia y presencia/ausencia de dos de las fases de la red de alimentación, 8 pines para el manejo del teclado matricial y 6 pines para el manejo de la *LCD*.
- 1 puerto *KBI* usado para la interrupción externa del cruce por cero y sincronización con la red.
- 1 pin *RTC* usado en la generación de retardos para la sincronización de los



pulsos *PWM* con la red y generación del paso mínimo en el cambio del ángulo de disparo.

- 2 canales del modulo *ADC* uno para sensar corriente y otro para sensar tensión.

En la siguiente tabla se presenta la distribución de pines del microcontrolador.

Tabla 6. Pines utilizados y propósito.

PIN MICROCONTROLADOR	PROPÓSITO
PTC4	Pulso de salida 1
PTC5/RXD2	Pulso de salida 3
PTC3/TXD2	Pulso de salida 5
PTC2/IRO	Pulso de salida 6
PTD1/ADP9/ACMP-	Pulso de salida 2
PTD0/ADP8/ACMP+	Pulso de salida 4
PTG4/XTAL	Entrada de interrupción cruce por cero 2
PTG5/XTAL	Entrada de interrupción cruce por cero 3
PTG0/KBIP0	Fila B teclado matricial
PTG1/KBIP1	Fila C teclado matricial
PTG2/KBIP6	Columna 1 teclado matricial
PTG3/KBIP7	Fila D teclado matricial
PTF0/TPM1CH2	Columna 2 teclado matricial
PTF1/TPM1CH3	Columna 3 teclado matricial
PTF4/TPM2CH0	Columna 4 teclado matricial
PTF5/TPM2CH1	Fila A teclado matricial
PTE5/MOSI1	RS LCD
PTE4/MISO1	Enable LCD
PTE0/TXD1	D4 LCD
PTE1/RXD1	D5 LCD
PTE2/TPM1CH0	D6 LCD
PTE3/TPM1CH1	D7 LCD
PTE4/KBI4/ADP4	Entrada de interrupción cruce por cero 1
PTB0/MISO2/ADP0	Entrada sensado de tensión
PTBI/MOSI2/ADP1	Entrada sensado de corriente
VDD	Entrada de alimentación
VDDAD/VREFH	Entrada de alimentación
VSS	GND microcontrolador
VSS1	GND microcontrolador
VSSAD/VREFL	GND microcontrolador

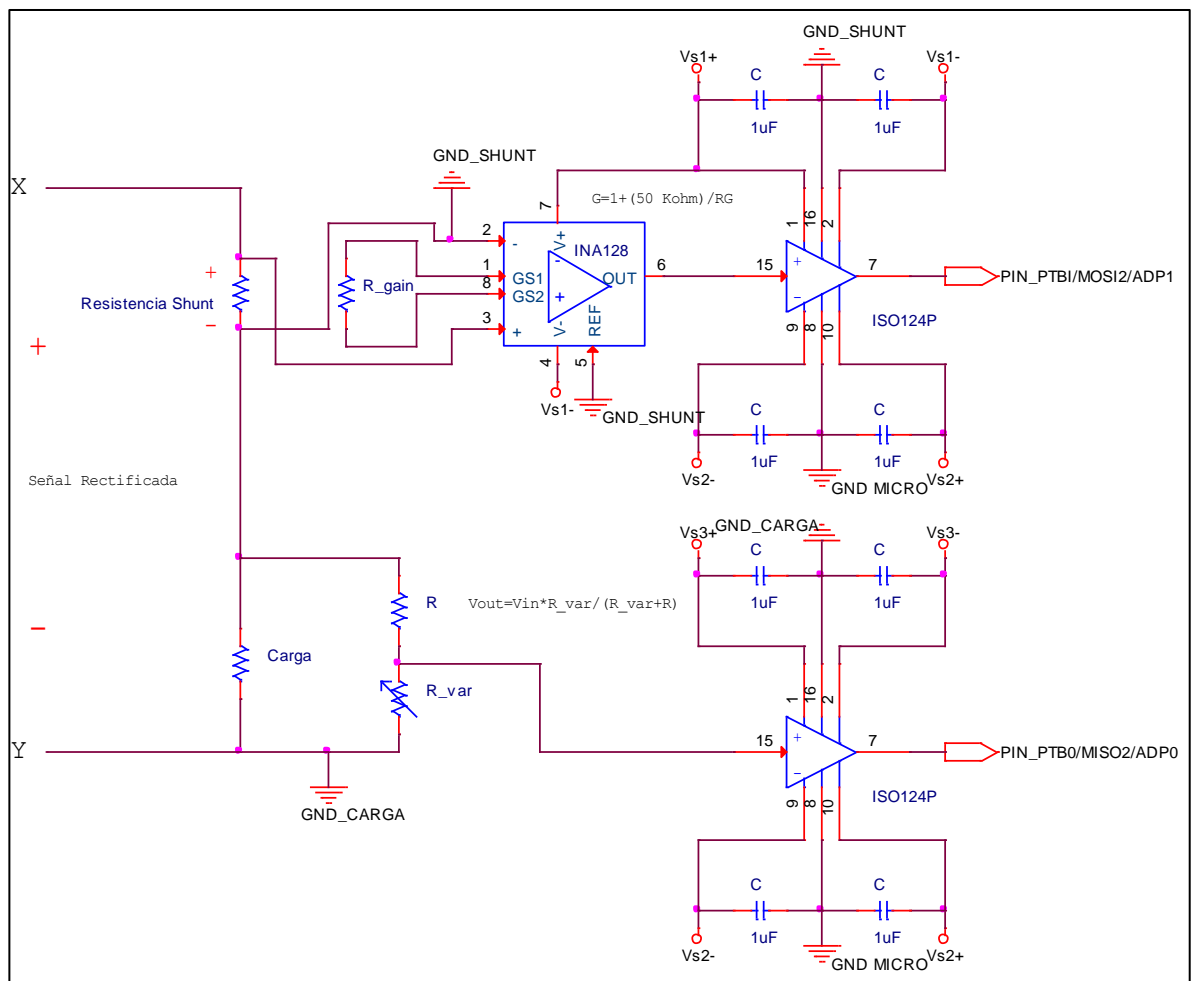
Fuente: Autores del Proyecto.



2.1.3. Circuito de Sensado

El circuito de sensado se encarga de realizar una serie de muestreos de la señal de salida del rectificador controlado, utilizando una resistencia *shunt* para el sensado de corriente y un divisor de tensión para el sensado de tensión, como se puede apreciar en la figura 24.

Figura 24. Circuito de sensado.



Fuente: Autores del Proyecto.



Por medio de adecuaciones se entregan al microcontrolador señales dentro del rango de aceptación que este permite. Por consiguiente, se diseñaron dos fases:

- Fase de sensado de la corriente
- Fase de sensado de la tensión

2.1.3.1. Fase de sensado de la corriente

En esta fase se sensa la corriente DC en la carga por medio de una resistencia *shunt* que maneja las siguientes especificaciones (ver figura 25). Luego esa diferencia de potencial vista se le realiza una adecuación por medio de un amplificador de instrumentación INA128 (ver figura 26), para poder tener los niveles de tensión permisibles en el microcontrolador; y gracias a un amplificador de aislamiento ISO124 (ver figura 27), se pudo aislar el circuito de sensado del circuito de control.

Figura 25. Características Principales resistencia Shunt.

Parámetros



Corriente: 200 A

Caída de Potencial: 50 mV

Resistencia: 250 $\mu\Omega$

Comportamiento lineal

Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 26. Características Principales del circuito integrado INA128.



Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 27. Características Principales del circuito integrado ISO124.



Fuente: Autores del Proyecto.

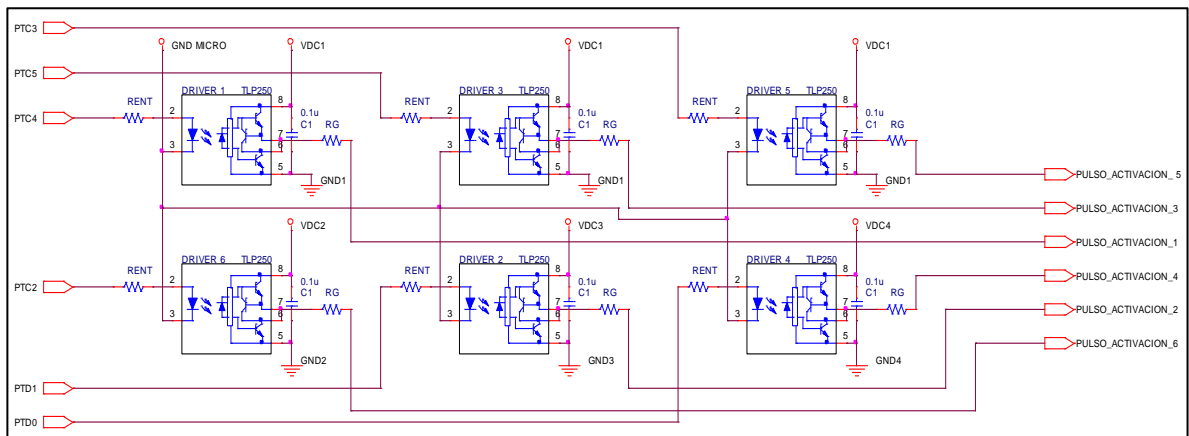
2.1.3.2. Fase de sensado de la tensión

El sensado de la tensión fue realizado por un divisor de tensión a la salida en paralelo con la carga, como se observó en la figura 24, para obtener los niveles de tensión permisibles en el microcontrolador.

2.2. ETAPA DE AISLAMIENTO

Esta etapa se conforma por *drivers-optoacopladores*, los cuales acoplan la etapa de mando con la etapa de potencia. Esto se realiza para crear un aislamiento óptico en el circuito de control, ya que este trabaja a niveles bajos de tensión y así evitar posibles daños debidos a fallas eléctricas. Este aislamiento se implementa por medio de una red de 6 optoacopladores TLP250 de Toshiba, uno para cada SCR utilizado, con resistencias limitadoras de corriente tanto en la entrada de los optoacopladores, como a la salida de estos, además de la conexión de un capacitor cerámico de $0.1\mu\text{F}$ como lo recomienda el fabricante, para estabilizar el funcionamiento del amplificador de alta ganancia lineal, ya que si no se dispone de este elemento capacitivo entre los pines 5 y 8 se coloca en peligro la propiedad de conmutación del optoacoplador. La etapa de aislamiento se observa en la figura 28.

Figura 28. Etapa de aislamiento.



Fuente: Autores del Proyecto.

Habría que decir que el valor de la resistencia R_{ENT} , se calcula por medio de la siguiente ecuación:



$$R_{ENT} = \frac{V_{DCMicro} - V_{F_TYP}}{I_{F_TYP}} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

En donde

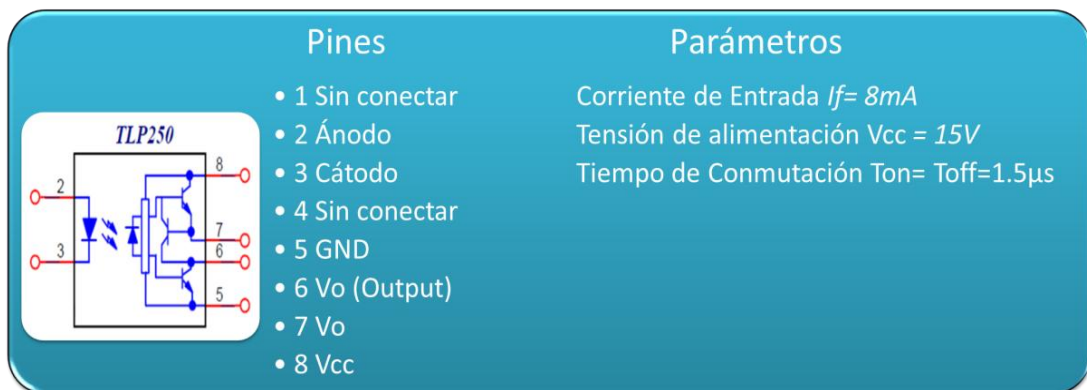
$V_{DCMicro}$: Es la tensión de alimentación del microcontrolador.

V_{F_TYP} : Es la tensión típica de entrada del optoacoplador.

I_{F_TYP} : Es la corriente de entrada del optoacoplador.

En la figura 29 se muestra el diagrama de pines y algunas características del driver.

Figura 29. Diagrama de pines para el driver TLP250.



Fuente: Autores del Proyecto.

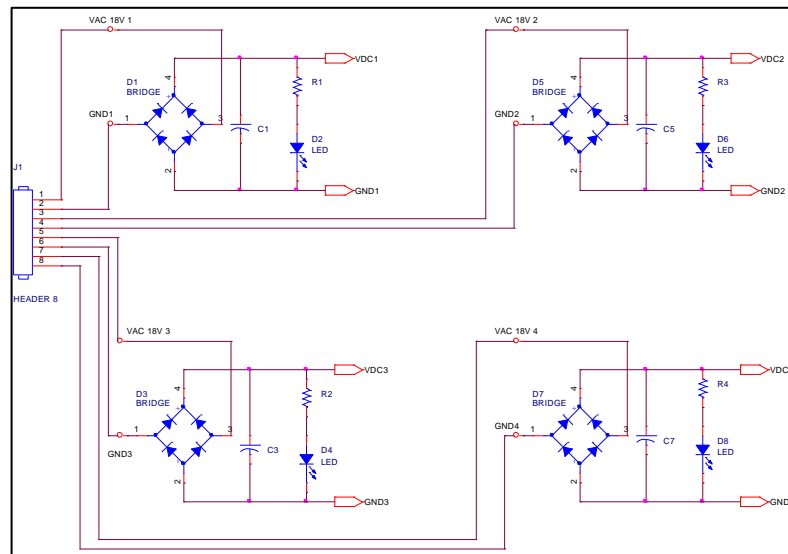
Para hallar la resistencia de puerta del SCR (resistencia de salida del optoacoplador), se desarrolla la siguiente ecuación, conociendo de antemano algunos parámetros del semiconductor de potencia utilizado y el voltaje de salida del circuito de aislamiento que proporciona el optoacoplador.

$$R_G = \frac{V_{out\ TLP250} - V_{GT}}{I_{GT}} \quad \text{Ecuación 2.4}$$



Para alimentar los TLP250 se diseñaron 4 fuentes de 23 VDC con aislamiento galvánico con diferentes referencias. Una fuente alimenta la fila superior de los driver TLP250 y las otras tres fuentes alimentan a los tres *driver* de la fila inferior. No se utilizan circuitos integrados reguladores de tensión sino que se dispondrá únicamente de un condensador electrolítico para obtener la salida de voltaje DC requerida, de esta forma no se incurre en más gastos para el diseño de esta fuente (Ver figura 30).

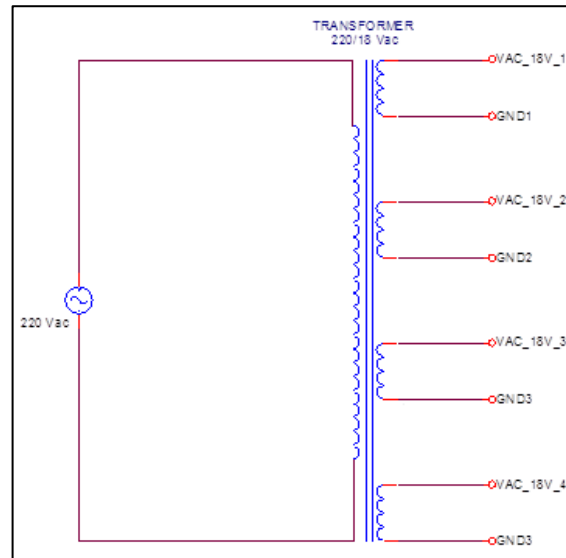
Figura 30. Diseño de la fuente de alimentación de los drivers TLP250.



Fuente: Autores del Proyecto.

En la figura 31 se muestra el transformador utilizado para alimentar las 4 fuentes.

Figura 31. Transformador de alimentación para las fuentes de 17 VDC.



Fuente: Autores del Proyecto.

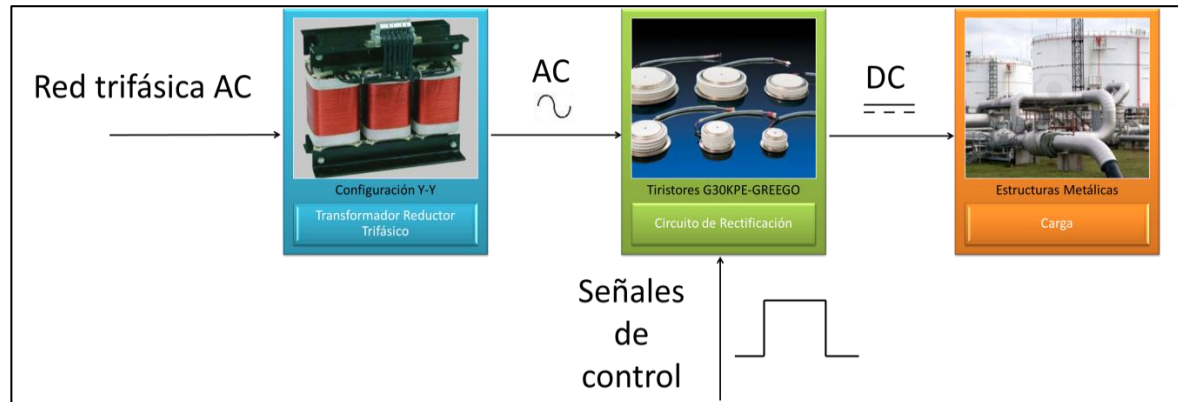
2.3. ETAPA DE POTENCIA

Una vez establecido el control a utilizar (Control por variación del ángulo de retraso o disparo α), se realiza la adecuación por medio de optoacopladores que le aporta las características adecuadas a los disparos para que los semiconductores de potencia sean correctamente controlados y se realice una óptima rectificación.

Esta sección está dedicada a la presentación del transformador trifásico implementado y el circuito de rectificación (Ver figura 32).



Figura 32. Diagrama de bloques de la etapa de potencia.



Fuente: Autores del Proyecto.

2.3.1. Transformador trifásico

Para este proyecto se utilizó un transformador trifásico con las siguientes especificaciones y características, que se consignan en la tabla que se muestra a continuación. (Ver Anexo B)

Tabla 7. Especificaciones y Características del Transformador Trifásico.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	
Potencia	15 KW
Frecuencia	60 Hz
Conexión	Y-Y
Tensión Primario	220 V / línea
Tensión Secundario	20 V
Corriente Secundario	250 A
Peso	50 Kg
Clase De Refrigeración	Tiro Forzado

Fuente: Autores del Proyecto.



2.3.2. Circuito rectificador trifásico

El circuito de rectificación se encarga de actuar sobre la energía eléctrica AC presente en la entrada del sistema para convertirla en energía DC, disponible en la salida del sistema.

Mediante el retraso del ángulo de disparo de los tiristores, se consigue controlar el tiempo en que la tensión de la fuente está aplicada en la carga, alcanzando de esta forma regular el valor medio y eficaz de la tensión salida y con esto la potencia entregada a la carga.[8]

La topología del rectificador trifásico controlado de onda completa implementado para este proyecto se muestra en la figura 33.

La tensión de salida depende exclusivamente del dominio que se tenga de cada uno de los seis elementos semiconductores de potencia y varía de acuerdo al control que se implemente en el sistema. Una de las ventajas de esta configuración, es que la frecuencia del rizado de tensión en la salida es seis veces la frecuencia de alimentación y, por lo tanto, los requisitos de filtrado son menores que para los rectificadores de media onda. [9]

El valor medio de la tensión de salida está dado por la siguiente ecuación, donde V_m representa la tensión pico de fase y α el ángulo de retraso.

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3} V_m}{\pi} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right] \quad \text{Ecuación 2.5}$$

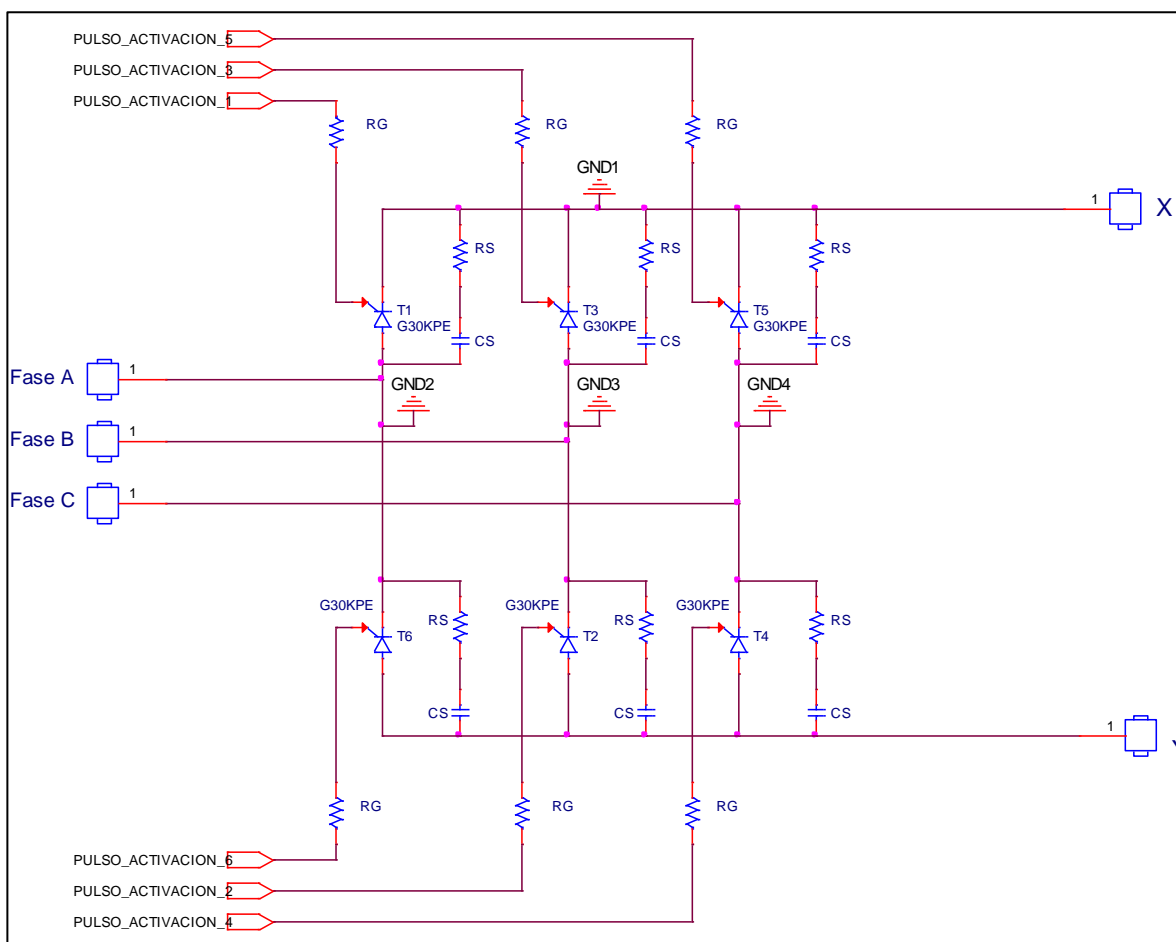
$$\text{Rango de control: } 0 < \omega t < 120^\circ$$

$$60^\circ < \alpha < 180^\circ$$



Analizando la ecuación anterior se puede observar que el valor medio de la tensión de salida depende directamente del ángulo de retraso de disparo de los SCRs.

Figura 33. Puente Rectificador trifásico y protecciones.



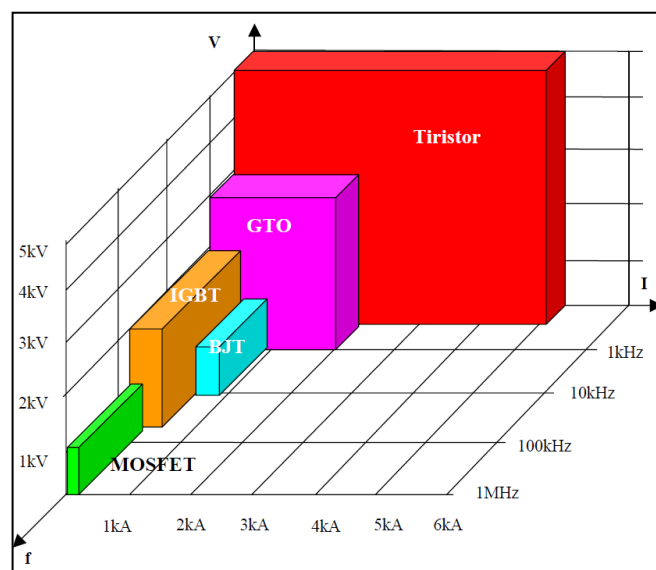
Fuente: Autores del Proyecto.



2.3.2.1. Características Principales de los SCRs

La elección de los SCRs como elementos de rectificación se basó en los datos comparativos con otros semiconductores de potencia como se muestra en la figura 34, en donde se observa que este tipo de semiconductores de potencia manejan capacidades de corriente y tensión adecuados para el diseño de este rectificador.

Figura 34. Comparativa de los dispositivos de potencia.



Fuente: *Dispositivos de Electrónica de Potencia*.¹⁰

Las características más importantes que distinguen a los SCRs de otros dispositivos son:

- La principal ventaja del tiristor frente a otros dispositivos semiconductores de potencia es que es capaz de conducir corrientes muy grandes y soportar altas tensiones, con una potencia de control mínima y pocas pérdidas.
- En cuanto a las intensidades a las que puede operar, estas van hasta los 10.000 A, con tiempos de apagado en torno a los 25 microsegundos (tiristores rápidos).




- Disparo por corriente.
- Es sencillo el circuito de mando.
- Si la corriente en un SCR alcanza valores demasiado elevados y también en caso de que di/dt sea alto, el dispositivo se puede destruir. Se puede colocar, en serie con el SCR, una inductancia que haga que di/dt se mantenga por debajo de un límite de seguridad especificado por el fabricante.

Un inconveniente presentado es que su frecuencia máxima de funcionamiento es baja, ya que se sacrifica la velocidad para conseguir una caída en conducción lo menor posible. No obstante, su funcionamiento se centra en aplicaciones a frecuencia de la red, que para este proyecto es más que suficiente, puesto que la frecuencia de trabajo del sistema de rectificación es de 50 ó 60 Hz.

El SCR utilizado para la realización de este proyecto fue el G30KPE de GREEGOO Electric, cuya información característica se muestra a continuación (ver figura 35).

Figura 35. Características principales del dispositivo semiconductor de potencia utilizado.

Parámetros



V_{DRM}/V_{RRM} (valor máximo de voltaje repetitivo directo-inverso)= 1100-1800 V.

I_T (corriente de trabajo media)= 300 A.

I_{TSM} (corriente directa de pico no repetitivo)= 3.8 KA.

I_{DRM}/I_{RRM} (corriente directa/inversa en estado de bloqueo)= 30 mA.

I_{GT} (corriente de disparo de puerta)= 35-250 mA.

V_{GT} (tensión de disparo de puerta)= 0.8-2 V.

dv/dt = 300 V/ μ S

di/dt = 100 A/ μ S

Precio SCR Genérico= 150.000 pesos

Precio SCR Original= 350.000

Fuente: Autores del Proyecto.



2.4. PROTECCIONES

Esta sección trata todas las protecciones que se implementaron en el diseño y la construcción del rectificador trifásico controlado.

2.4.1. Red Snubber

La protección desarrollada para los tiristores fue una red Snubber de apagado, está se encarga de controlar la tensión en el interruptor durante la desactivación. La red Snubber amortigua las posibles resonancias parásitas y controla la pendiente de la tensión en el semiconductor. Otro punto importante a cuidar es el dv/dt característico de los *SCRs*. [9]

Esta protección se encuentra conformada por un circuito RC colocado directamente sobre los terminales de ánodo y cátodo del dispositivo (ver figura 36). Para hallar los parámetros de capacitancia y resistencia para la Red Snubber se utilizaron las siguientes ecuaciones.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{0.632R_L V_S}{C_S(R_S + R_L)} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Es importante saber que el valor de la resistencia R_S , se encuentra ligado a la corriente de descarga, I_{TD} (que circulara cuando se descargue el capacitor), y que siempre se sugiere unas 10 veces mayor a la corriente de la carga, de esta forma:

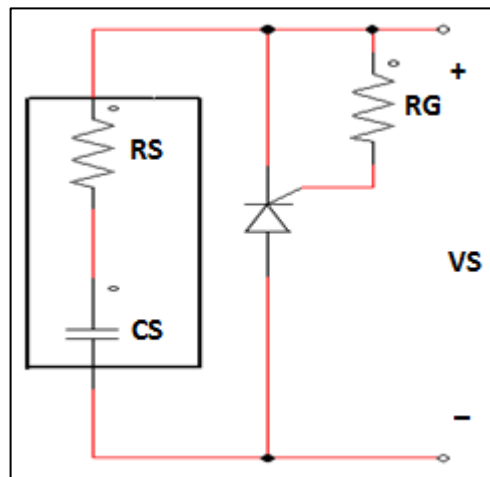
$$R_S = \frac{V_S}{I_{TD}} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Además, se utilizó una resistencia instalada entre la compuerta y cátodo R_G , con el



objetivo de limitar la corriente que podría aparecer si se produce una variación violenta de tensión entre los terminales de ánodo y cátodo que pueda formar una condición de disparo. Esta resistencia aumenta la capacidad dv/dt del tiristor y la inmunidad al ruido, reduce el tiempo de desactivación y aumenta las corrientes de mantenimiento (I_H) y de enganche (I_L).^{††}

Figura 36. Red Snubber de apagado y resistencia de compuerta y cátodo.



Fuente: Autores del Proyecto.

2.4.2. Interruptor automático o *breaker*

Es un dispositivo capaz de interrumpir o abrir un circuito eléctrico cuando la intensidad de la corriente eléctrica que circula por este, excede un determinado valor o, en el que se ha producido un cortocircuito, con el objetivo de no causar daños a los equipos eléctricos. A diferencia de los fusibles, que deben ser reemplazados tras un único uso, el disyuntor puede ser rearmado una vez localizado y reparado el daño que causó el disparo o desactivación automática. En

^{††}MUHAMMAD H. Rashid, *Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. Segunda edición, Prentice Hall, México, 1995, Capítulo 4, Pag 120.



la figura 37 se puede observar un disyuntor o *breaker*, y en la tabla siguiente se muestran sus principales características.

Figura 37. Breaker eléctrico.



Fuente: Zhejiang Chint Electrics.

Tabla 8. Especificaciones y Características del Interruptor Automático.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL INTERRUPTOR AUTOMÁTICO	
N° Serie	NM1-63S/3300
N° de Polos	3 Fases
Frecuencia	50Hz/60Hz
Tensión de Entrada	500 V
Regulación de Base	32 A
Poder de Corte (Icu)	20KA

Fuente: Autores del Proyecto.



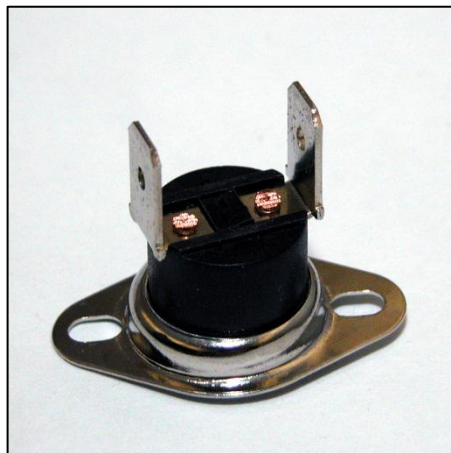
2.4.3. Fusibles

Estos dispositivos se encargan de proteger la Etapa de Mando y la Etapa de Aislamiento contra posibles sobrecargas de corriente eléctrica. El fusible fue instalado entre la fuente de alimentación eléctrica y el circuito a electrificar.

2.4.4. Fusible térmico o termostato

Es un dispositivo de un sistema de control simple que se abre o cierra en un circuito eléctrico en función de su temperatura. Los termostatos bimetalicos como los utilizados en este proyecto, consisten en dos láminas de metal unidas, con diferente coeficiente de dilatación térmico. Cuando la temperatura cambia, la lámina cambia de forma actuando sobre los contactos que cierran un circuito eléctrico. En la figura 38 se observa este dispositivo eléctrico.

Figura 38. Fusible eléctrico.



Fuente: ELMWOOD INC.



3. DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL PARA EL SISTEMA ELECTRÓNICO DE RECTIFICACIÓN

El presente capítulo trata todo lo referente al algoritmo de control del sistema de rectificación implementado. Como primera medida se llevo a cabo la inicialización de una pantalla grafica *LCD* de 4 bits con el propósito de visualizar las opciones de control contenidas dentro de un menú de funciones y que son escogidas por medio de un teclado matricial. En este caso se diseñaron dos tipos de control los cuales son de tensión y de corriente. Luego de haber elegido el tipo de control deseado, este detecta la señal de cruce por cero y genera pulsos cada vez que se ejecuta un cruce. Los pulsos salen de puertos establecidos para esta labor en el microcontrolador, realizándoseles una adecuación para que puedan ingresar a las puertas de los tiristores en el circuito de rectificación. Al mismo tiempo que se generan los pulsos, se deben recibir las señales de salida del circuito de sensado y muestrearlas por medio del modulo conversor *A/D* del microcontrolador, posteriormente, el microcontrolador realiza procesos matemáticos que permitirán el control y ajuste de la tensión ó corriente de salida requerida según el valor de la carga, y finalmente, la visualización de estos valores.

El esquema del algoritmo de control para el sistema electrónico de rectificación se basa en: el algoritmo de control para los pulsos de disparo y el algoritmo de control de tensión y corriente en la salida.

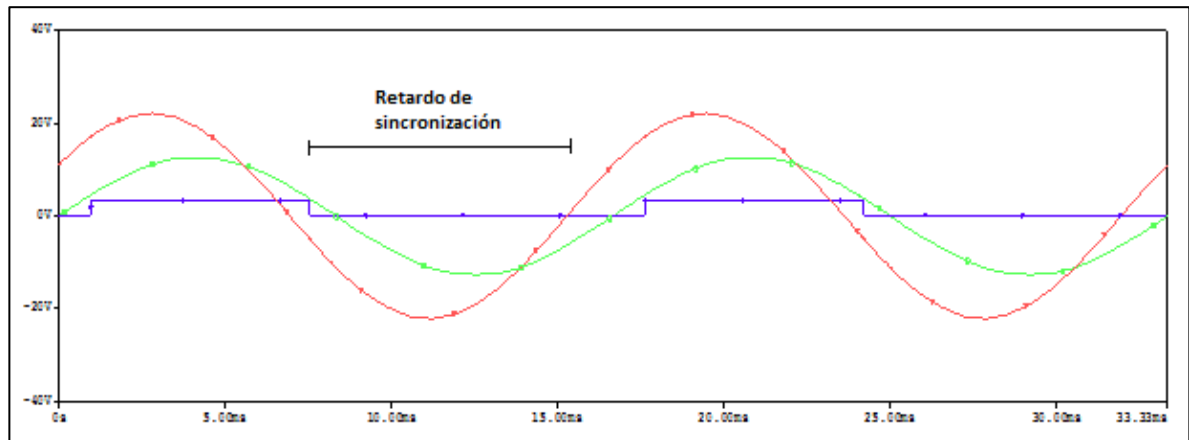
3.1. ALGORITMO DE CONTROL PARA LOS PULSOS DE DISPARO

Para este algoritmo se sensa el cruce por cero de una fase, luego esta señal ingresa al microcontrolador y es detectada como una interrupción de referencia, a



partir de la cual se genera un retardo (ver figura 39), para que la base de tiempo quede sincronizada con respecto al cero de la tensión de línea de la red de alimentación trifásica. Después de esto, el microcontrolador activa los pulsos que van a controlar los ciclos de trabajo de los tiristores en el circuito de rectificación. †

Figura 39. Retardo de sincronización con respecto a la tensión de línea.



Fuente: Autores del Proyecto.

Cabe señalar que la emisión de los pulsos por parte del microcontrolador se realiza dependiendo de la secuencia de conexión de la red trifásica, puesto que, el orden de envío de los pulsos es diferente en cada caso. Para esto, se ha utilizado tres canales del microcontrolador permitiendo la detección de la secuencia de la red de alimentación.

3.1.1. Detección de cruces por cero y secuencia de la red

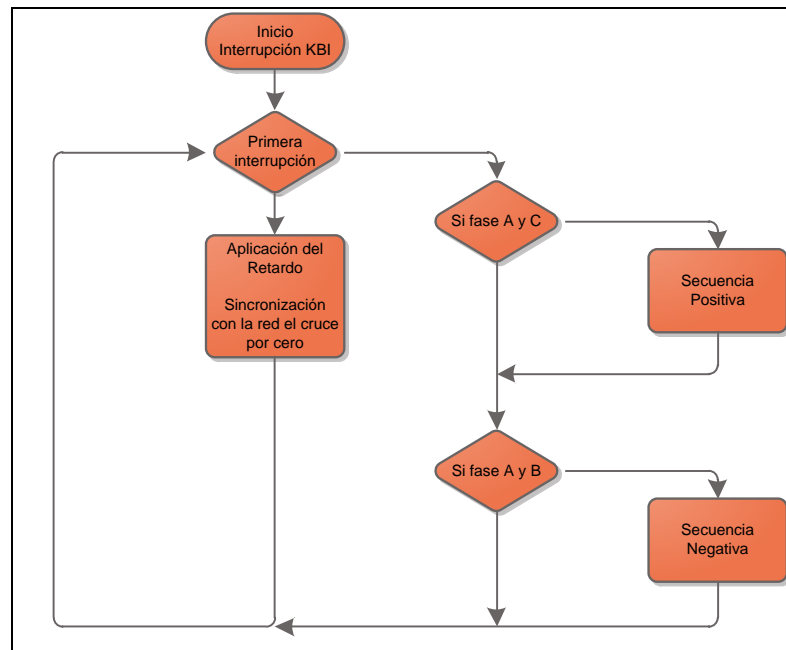
La señal de cruce por cero ingresa al microcontrolador por el puerto PTB4 / KBIP4, la cual genera una interrupción cada vez que se produzca el cruce por cero. La primera interrupción detecta la secuencia de la red y las sucesivas sincronizan la

† Los ciclos de trabajo se generan a partir de la base de tiempo configurada en el modulo TPM, la cual es de 2.77 milisegundos.



base de tiempo con el cruce por cero de la tensión de línea, a través de un retardo calculado por el contador de tiempo real (RTC).

Figura 40. Diagrama de flujo de detección de cruces por cero y secuencia de la red.



Fuente: Autores del Proyecto.

3.1.2. Generación de los pulsos

En este segmento del proyecto es importante destacar que los semiconductores de potencia son disparados con intervalos de 60° en un orden determinado, ancho de pulso de 120° y frecuencia de 60 Hz, además el orden de disparo de los interruptores depende de la detección de la secuencia de la red trifásica.

Cumplida la sincronización del cruce por cero con la red, y si la secuencia detectada es positiva se genera la primer base de tiempo equivalente a 2.77



milisegundos, cumplido este tiempo, se genera una interrupción en la cual se coloca en lógica baja el puerto PTD0 correspondiente al T4 y puerto PTC2 se coloca en lógica alta correspondiente al T6. Pasados 2.77 milisegundos más, se vuelve a generar otra interrupción en la cual se pone en lógica baja el puerto PTC5 correspondiente al T3 y en lógica alta el puerto PTC3 correspondiente al T5, y así se sigue la secuencia de las señales de pulso de los interruptores de potencia como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 9. Ciclo de trabajo de los semiconductores para secuencia positiva.

DISPARO	α	$\alpha + 60^\circ$	$\alpha + 120^\circ$	$\alpha + 180^\circ$	$\alpha + 240^\circ$	$\alpha + 300^\circ$
T2	1	1	0	0	0	0
T1	0	1	1	0	0	0
T4	0	0	1	1	0	0
T3	0	0	0	1	1	0
T6	0	0	0	0	1	1
T5	1	0	0	0	0	1

Fuente: Autores del Proyecto.

De igual forma ocurre con la secuencia negativa, en donde solo cambia el orden de envío de los pulsos, y esto es consignado en la tabla 10.

Tabla 10. Ciclo de trabajo de los semiconductores para secuencia negativa.

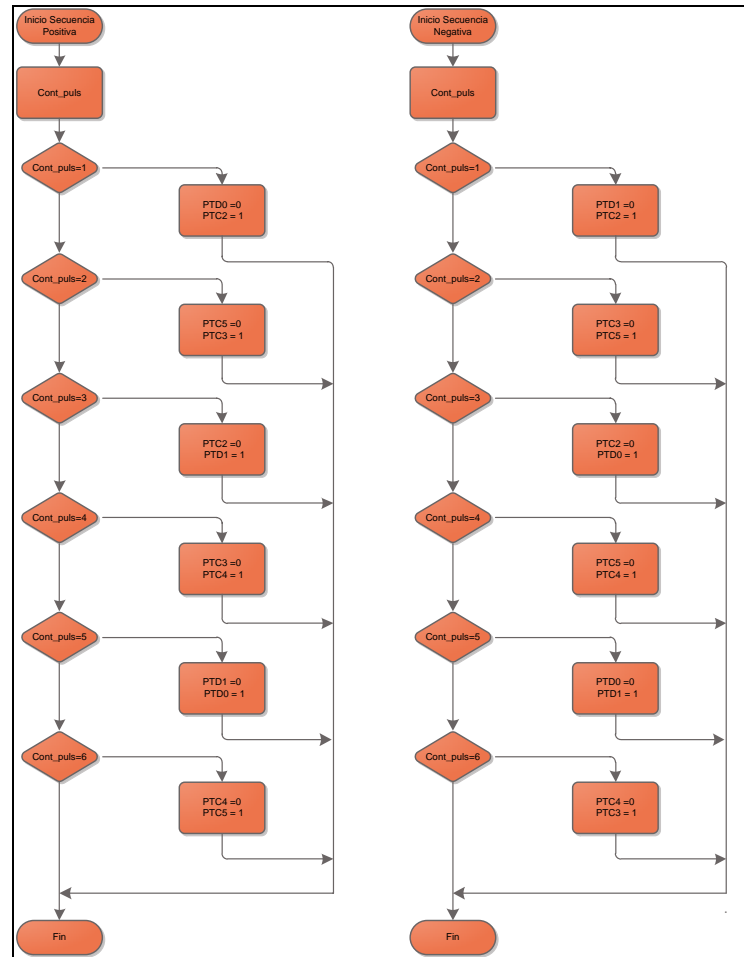
DISPARO	α	$\alpha + 60^\circ$	$\alpha + 120^\circ$	$\alpha + 180^\circ$	$\alpha + 240^\circ$	$\alpha + 300^\circ$
T4	1	1	0	0	0	0
T1	0	1	1	0	0	0
T2	0	0	1	1	0	0
T5	0	0	0	1	1	0



T6	0	0	0	0	1	1
T3	1	0	0	0	0	1

Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 41. Diagrama de flujo para envío de pulsos de encendido según la secuencia seleccionada.



Fuente: Autores del Proyecto.



3.2. ALGORITMO DE CONTROL DE TENSIÓN Y CORRIENTE DE SALIDA

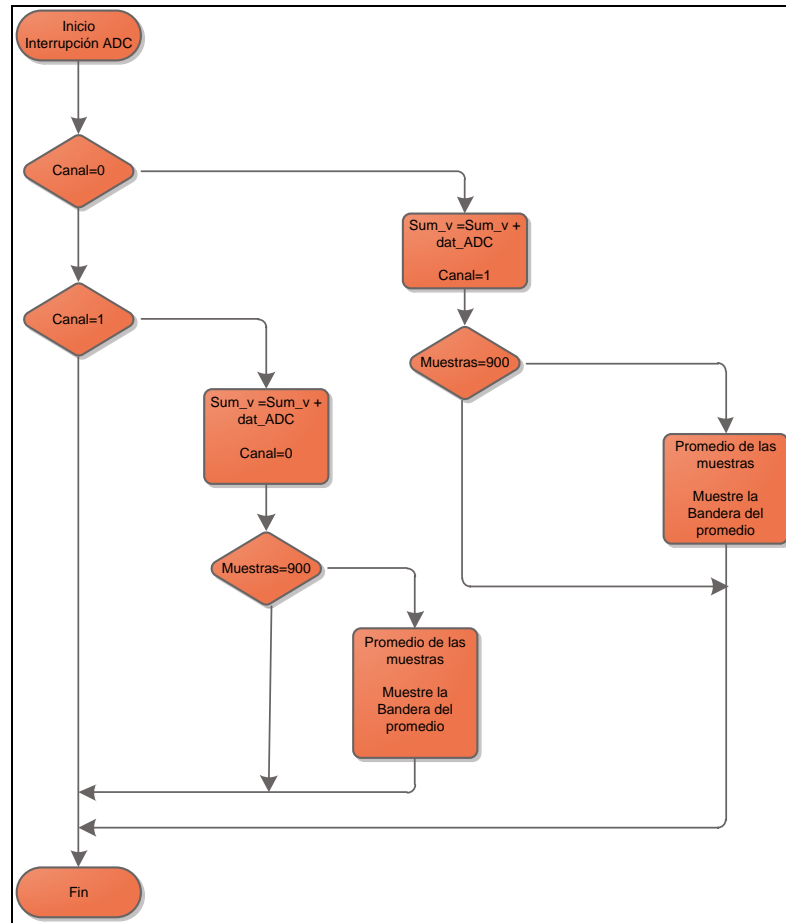
El algoritmo de control implementado en esta sección del proyecto se divide en dos fragmentos importantes que son el muestreo de las señales que ingresan al microcontrolador y el control realizado a la tensión y corriente en la salida del sistema de rectificación.

3.2.1. Muestro de señales de ingreso al microcontrolador

El muestreo de la señales de tensión y corriente que se realimentan, ingresan al microcontrolador por medio de los puertos PTB0 y PTB1, que corresponden a los canales 0 y 1 del modulo *ADC*. A través del canal cero se muestrea la señal de tensión y por el canal uno se muestrea la señal de corriente. Para calcular el valor promedio de las señales tanto de tensión como de corriente, se toman 900 muestras cada 244.44 microsegundos las cuales se van acumulando y guardando en dos registros independientes. Estas 900 muestras equivalen 79 periodos de las señales rectificadas de tensión y corriente.

El diagrama de flujo que presenta el muestreo de las señales de tensión y corriente en la carga se muestra en la figura 42.

Figura 42. Diagrama de flujo para el muestreo de las señales de salida.



Fuente: Autores del Proyecto.

3.2.2. Control de tensión y corriente

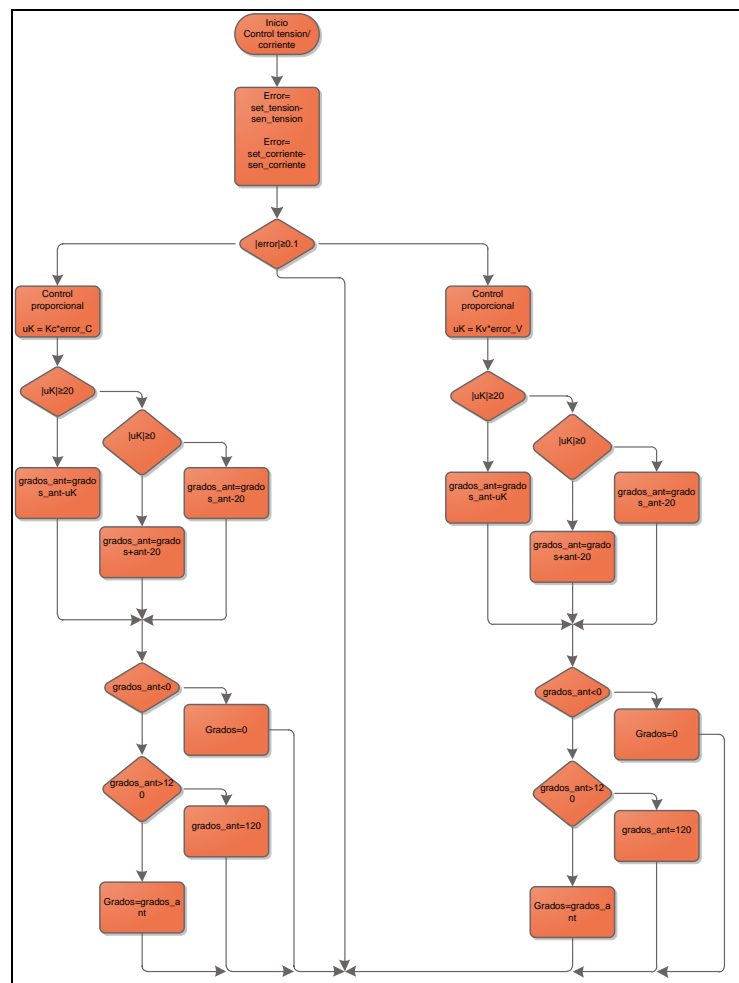
Una vez realizado el promedio se encienden las banderas de lectura del *ADC* del microcontrolador, esto indica que hay un dato disponible para calcular el error y posteriormente realizar la acción de control. El control implementado es un controlador PID Digital con constantes K_i y K_D iguales a cero, en el cual se calcula el error a partir del dato ingresado por el usuario a través del teclado y la lectura promedio de la señal de salida obtenida a través de *ADC*. Cabe señalar que antes



de realizar una acción de control se monitorea la presencia de las tres fases para proceder a calcular dicha acción de control, si alguna fase no esta presente el dispositivo se apaga hasta que sean detectadas las tres.

El diagrama de flujo que presenta el control tensión y corriente se muestra en la figura 43.

Figura 43. Diagrama de flujo para el control de corriente y tensión de salida.





4. PRUEBAS DE LABORATORIO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Esta sección presenta los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio realizadas a cada etapa que conforma el sistema de rectificación en su totalidad. Por consiguiente, se exponen las gráficas generadas por los dispositivos de laboratorio, y se establecen semejanzas y diferencias con las simulaciones realizadas por medio de software.

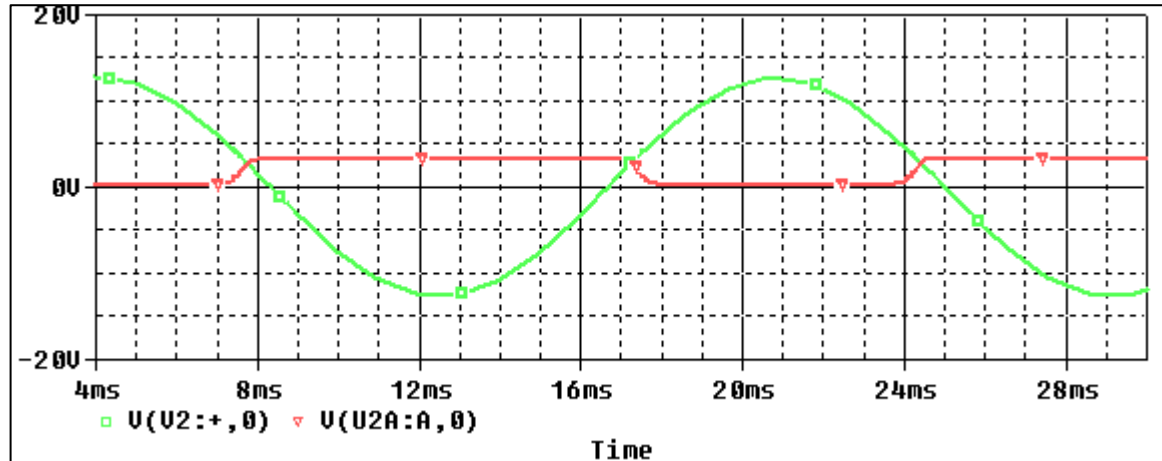
4.1. PRUEBAS REALIZADAS A LA ETAPA DE MANDO

Para comenzar a contrastar los resultados experimentales (simulaciones) y resultados reales (pruebas de laboratorio) se analizará la etapa de mando y cada circuito que la conforma.

4.1.1. Pruebas realizadas al Circuito de Cruces por Cero

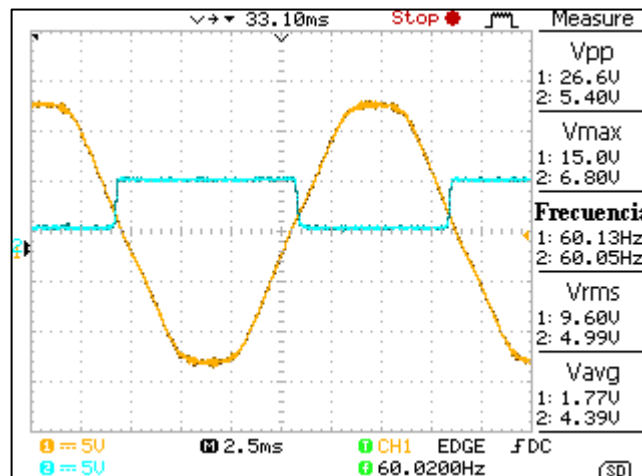
En las figuras 44 y 46 se muestra la simulación realizada al circuito detector de cruces por cero, por medio de OrCAD Capture de Cadence, las cuales se comparan con las señales obtenidas por medio del osciloscopio digital GW Instek GDS-1062.

Figura 44. Formas de onda del circuito detector de cruces por cero. Señal de fase A (verde), forma de onda medida a la salida del fototransistor 4N26 (rojo).



Fuente: Autores del Proyecto.

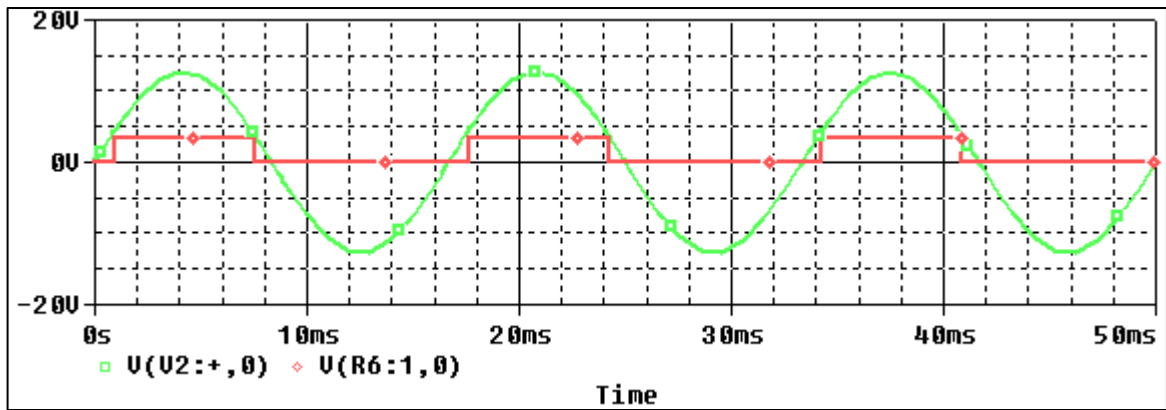
Figura 45. Formas de onda del circuito detector de cruces por cero obtenidas por medio del osciloscopio. Señal de fase A (amarillo), forma de onda medida a la salida del fototransistor 4N26 (azul).



Fuente: Autores del Proyecto.

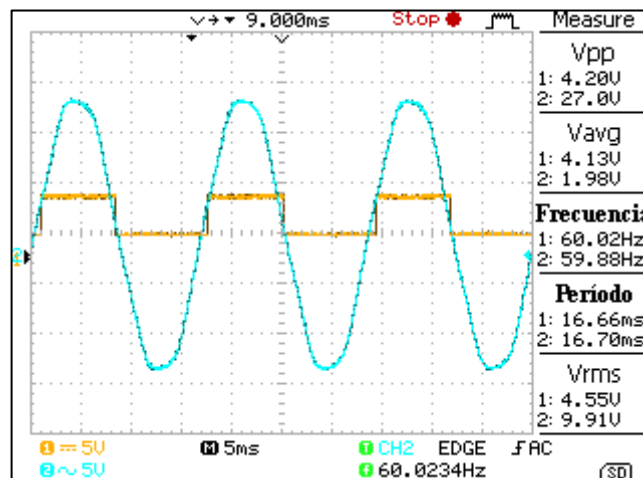


Figura 46. Formas de onda del circuito detector de cruces por cero. Señal de fase A (verde), forma de onda medida a la salida del integrado 74LS14 (azul).



Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 47. Formas de onda del circuito detector de cruces por cero obtenidas por medio del osciloscopio. Señal de fase A (azul), forma de onda medida a la salida del circuito integrado 74LS14 (amarillo).



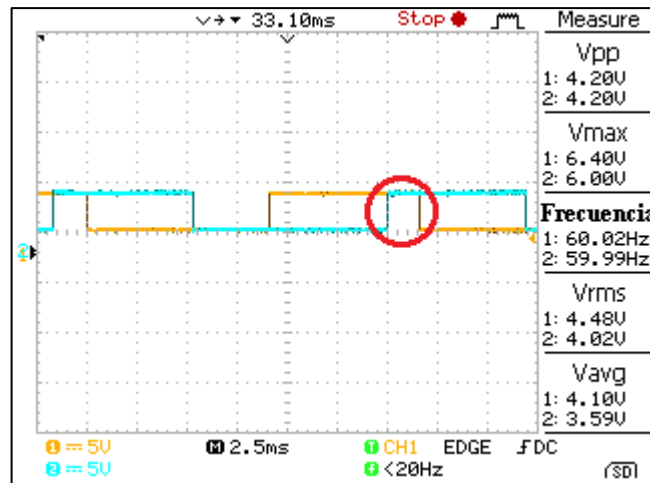
Fuente: Autores del Proyecto.

Se observa que al implementar el diseño planteado del circuito de cruces por cero, se obtienen las señales esperadas, como se puede apreciar en las figuras 45 y 47.

4.1.2. Pruebas realizadas al Circuito de Control

La primera tarea que realiza el circuito de control es la detección de la secuencia de la red según su conexión (ver figura 48).

Figura 48. Señales de salida de los cruces por cero fase A (azul) con fase C (amarilla).



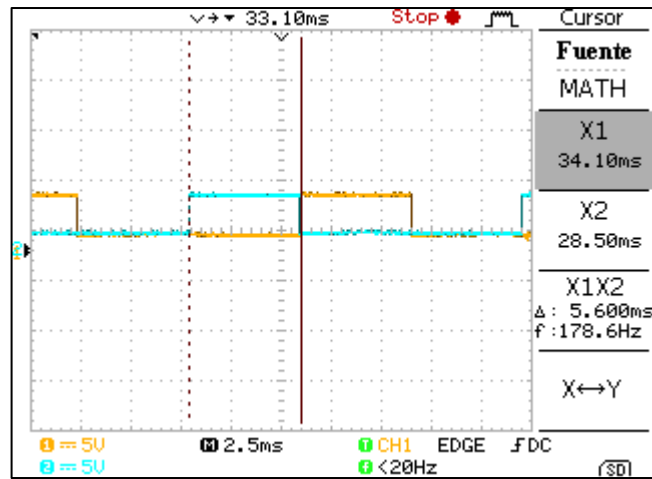
Fuente: Autores del Proyecto.

Esta grafica presenta las señales de ingreso al microcontrolador provenientes del circuito detector de cruces por cero de las fases A y C. La forma en que el microcontrolador detecta la secuencia, es por medio del flanco ascendente del pulso de la fase A y en ese instante compara que fase esta activa en lógica alta. Para este caso se observa dentro del círculo rojo que la fase C esta activa y por consiguiente, la secuencia es positiva. Dado el caso que la fase B hubiese estado activa el microcontrolador manifiesta que la secuencia es negativa.

En las figuras que se presentan a continuación se observan las señales de salida del microcontrolador, mostrando el desfase que existe entre disparos.



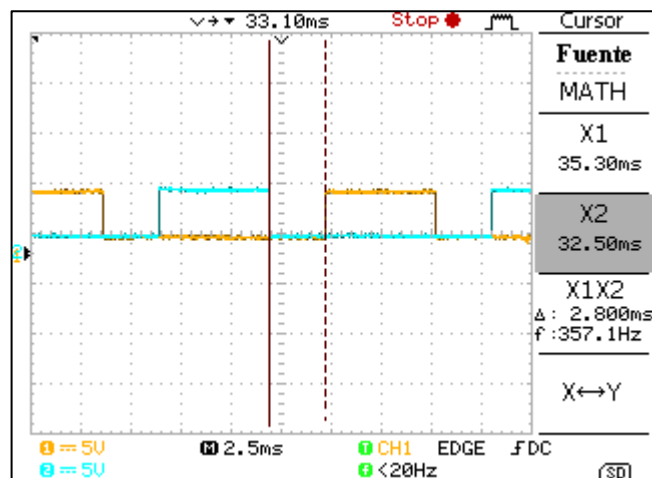
Figura 49. Señales de salida del microcontrolador para los tiristores T1 (azul) y T3 (amarillo).



Fuente: Autores del Proyecto.

En la figura 33 se muestra el orden de conexión de los tiristores y de acuerdo al diseño planteado el desfase entre las señales de disparo de los semiconductores de potencia T1, T3 y T5 es de 120° ó 5.55 milisegundos, como se observa en la figura 49.

Figura 50. Señales de salida del microcontrolador para los tiristores T4 (azul) y T5 (amarillo).



Fuente: Autores del Proyecto.



Ahora en la figura anterior observamos que el desfase que hay entre las señales de disparo de los tiristores de una misma columna (T1-T6, T3-T2, T5-T4), es de 180° o 8.33 milisegundos.

Otra parte fundamental de este circuito de control es el control que este ejerce sobre la tensión y la corriente a la salida del sistema de rectificación. Para regular la tensión se implemento un control PID digital, programando solamente su constante proporcional. Este tipo de controlador genera una salida que es proporcional al error actuante, por consiguiente existe una relación lineal entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Habría que decir también, que la sintonización (ajuste) del controlador se realizó mediante modificaciones sucesivas de los parámetros de control hasta lograr conseguir las especificaciones deseadas, lo que comúnmente se conoce como ajuste empírico o manual de controladores.

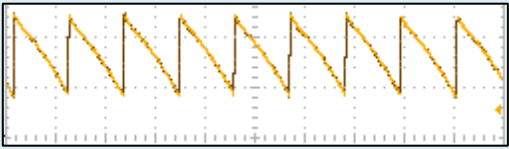
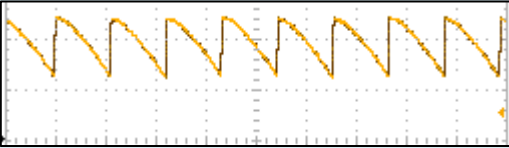
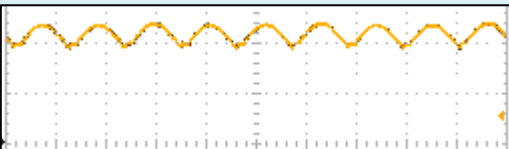
En la tabla que se muestra a continuación se puede observar la variación de la señal de tensión rectificada a diferentes valores de voltaje ingresados a través del teclado matricial, estos tienen su respectiva correspondencia en grados del ángulo de disparo de los semiconductores de potencia.



Tabla 11. Comprobación del control de tensión implementado en el sistema de rectificación.

VALOR DE VOLTAJE INGRESADO EN [V]	VOLTAJE PROMEDIO VISTO EN EL OSCILOSCOPIO [V]	ANGULO DE DISPARO EN GRADOS	SEÑAL DE SALIDA DEL RECTIFICADOR
0	0	120°	
5	5.22	86°	
10	10.4	74°	
15	15.1	66°	
20	20.6	56.6°	
25	25.7	48°	



30	30.3	38°	
35	35.4	28°	
40	40.5	12°	

Fuente: Autores del Proyecto.

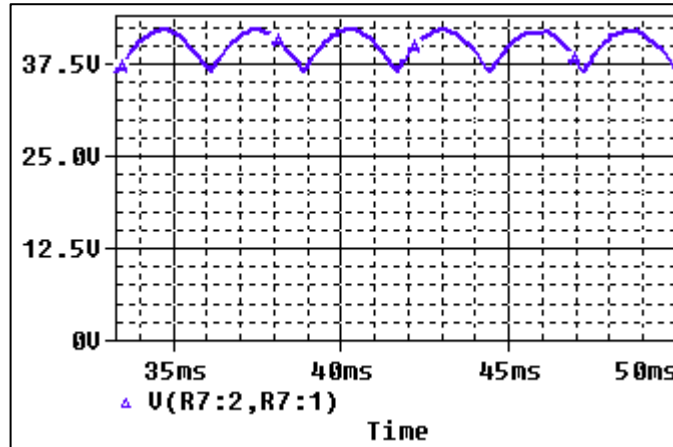
Cabe resaltar que esta prueba se realizó para una carga resistiva de $10,6 \Omega$ y el osciloscopio fue configurado con un *TIME/DIV* de 2.5 ms y un *VOLTS/DIV* de 20V.

4.2. PRUEBAS REALIZADAS A LA ETAPA DE POTENCIA

En esta sección se plasman los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio al circuito rectificador trifásico. Estas pruebas se llevaron a cabo realizando una variación al ángulo de disparo y obteniendo a la salida las distintas formas de onda de la tensión rectificada. Es necesario indicar que la señal de corriente tiene la misma forma que la señal de tensión. Siendo la corriente la variable de mayor importancia en el proceso de protección catódica por corriente impresa. Las figuras que a continuación se exponen muestran las señales de tensión de salida tomadas por medio del osciloscopio digital y se contrastan con la respectiva simulación.

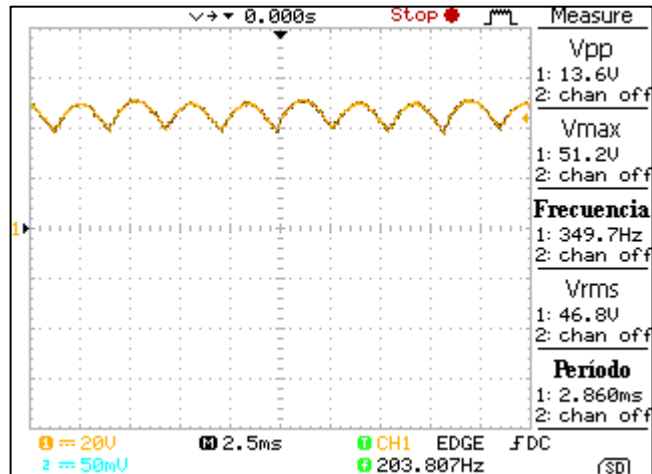


Figura 51. Simulación de la señal de tensión rectificada con $\alpha=0$.



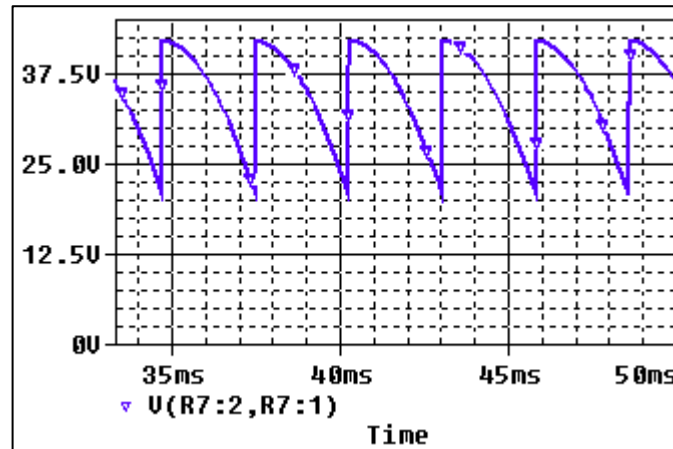
Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 52. Señal de tensión rectificada con $\alpha=0$ obtenida con Osciloscopio.



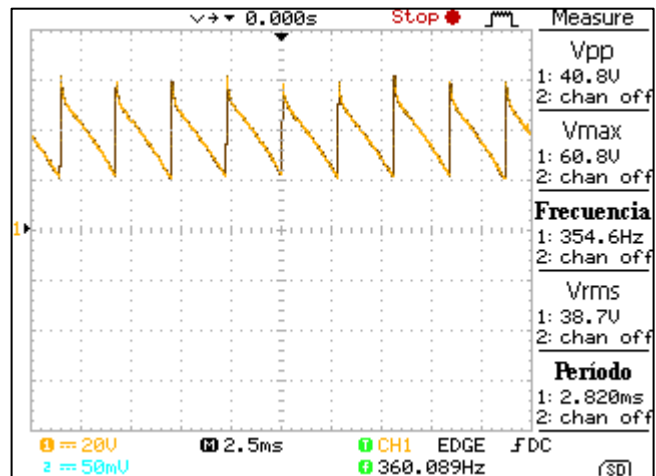
Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 53. Simulación de la señal de tensión rectificada con $\alpha=30$.



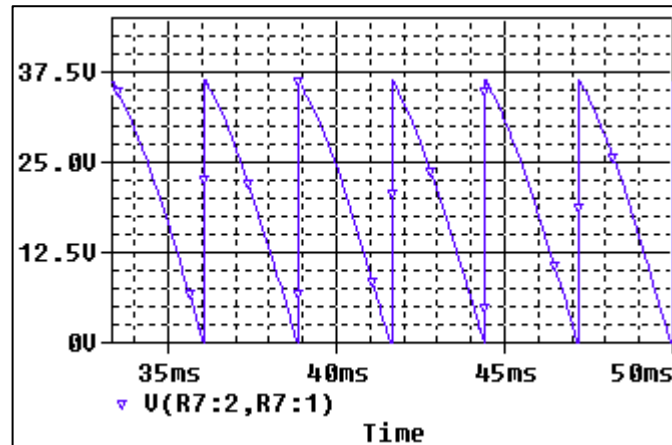
Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 54. Señal de tensión rectificada con $\alpha=30$ obtenida con Osciloscopio.



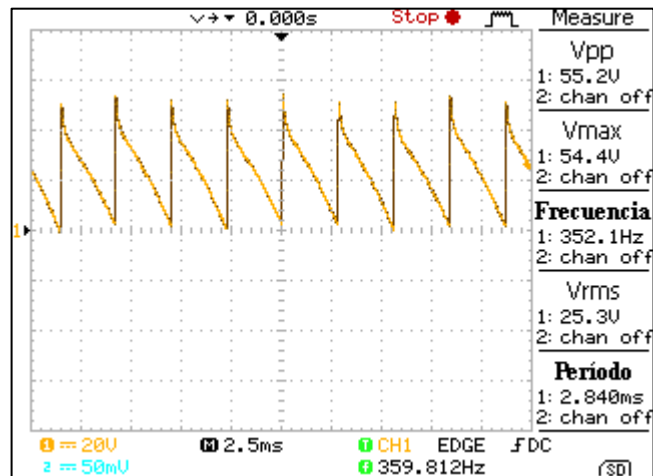
Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 55. Simulación de la señal de tensión rectificada con $\alpha=60$.



Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 56. Señal de tensión rectificada con $\alpha=60$ obtenida con Osciloscopio.



Fuente: Autores del Proyecto.



5. CONCLUSIONES

A continuación se exponen las observaciones y conclusiones con respecto al trabajo desarrollado, además se presentan las recomendaciones y sugerencias para trabajos futuros buscando mejorar lo planteado en este proyecto. Asimismo la tesis planteada procura servir de apoyo para trabajos consecuentes a estas ramas de la ingeniería.

5.1. CONCLUSIONES

- Examinando los objetivos del plan de proyecto de grado se concluye que se cumplió satisfactoriamente con las metas propuestas, como son: la programación del control de disparo en el microcontrolador, el diseño del rectificador trifásico y la adecuada instrumentación para visualizar las variables a controlar.
- Al momento de elegir las resistencias que limitan la corriente de disparo de los tiristores, es necesario tomar un valor cercano al límite superior del rango que ofrece el fabricante en el parámetro I_{GT} , ya que puede que algunos de los SCRs no sean disparados por carencia de corriente en su terminal de *Gate*, debido a que dos semiconductores no poseen propiedades de fabricación idénticas.
- Fue necesario implementar una mejor conexión entre el circuito de acoplamiento y la etapa de potencia, ya que se observó arco voltaico entre conductores de energía eléctrica, y esto generó un daño en el circuito de aislamiento.



- Se efectuaron los cruces por cero en el primario del transformador trifásico, puesto que el secundario de este posee diferentes taps de tensión. Y Además el circuito integrado 4N26 solo acepta un nivel máximo de corriente y se tendría que ajustar diferentes valores de resistencias para obtener lo requerido por este optoaislador. A su vez la detección de estos cruces por cero fueron tomados de las tensiones de fase y no de línea, ya que las tensiones de línea manejan un nivel de voltaje alto.
- El numero de muestras seleccionado en el algoritmo de control de tensión y corriente para el promedio se realiza a forma de prueba y error. Si se toman pocas muestras el dato del promedio no es confiable, por otro lado, si se toman muchas muestras ocuparía un espacio considerable en la memoria, y no habrían cambios significativos con respecto al valor del promedio con un numero apropiado de muestras.
- Cabe resaltar que los rectificadores para aplicaciones en protección catódica manejan tres topologías, voltaje constante, corriente constante y potencia constante. Teniendo en cuenta que uno de los objetivos esenciales de este proyecto era construir un rectificador por corriente constante los autores desarrollaron un sistema de rectificación versátil e innovador ya que este cuenta con una segunda aplicación, voltaje constante.
- Es satisfactorio para los autores hacer parte de un proyecto de desarrollo tecnológico y de innovación mediante la alianza de distintas unidades académicas, e invitamos a que se sigan desarrollando proyectos novedosos que contribuyan con el crecimiento de la Universidad Industrial de Santander y el Campo Escuela Colorado.



5.2. OBSERVACIONES

- Se dispuso la construcción de este rectificador de grandes propiedades, debido a que La Estación Colorado se proyecta para una producción de crudo en masa, por ende, la necesidad de aumentar su planta física, lo cual conlleva a requerir de elementos metálicos de grandes dimensiones, los cuales deben ser protegidos.
- Los autores recomiendan que para obtener un sistema de protección catódica completo, por medio del método de corriente impresa es necesario ejecutar una segunda fase de investigación, que es el diseño y construcción bajo normas técnicas internacionales de una cama anódica, por tanto se invita a la realización de un proyecto de grado complementario a este por parte de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
- Se recomienda tener precauciones básicas en manejo de circuitos de potencia, debido a que el sistema de rectificación trabaja con niveles altos de corriente y tensión, evitando daños a personas y equipos de laboratorio.

5.3. MEJORAS Y SUGERENCIAS FUTURAS

- Para mejorar este sistema de rectificación los autores recomiendan realizar el algoritmo de control pertinente para cubrir las tres topologías de rectificadores existentes en aplicaciones de protección catódica.
- Para optimizar el diseño se recomienda quitar los transformadores reductores utilizados en el circuito de cruces por cero y realizar el cálculo



correspondiente de la resistencia que limita la corriente de entrada del optotransistor 4N26, y de igual forma tener en cuenta la potencia que disipa.

- Si se desea reducir el rizado de la corriente de salida del rectificador, se recomienda calcular y agregar una bobina en serie a la carga.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] RAYO. AGUILAR, Mario Orlando. "PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO PARA PLATAFORMAS MARINAS", Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco. México D.F. abril de 2006.
- [2] Protección Catódica Nivel 1, Manual de Enseñanza. NACE Internacional, 2000.
- [3] FREDY ALBERTO ROJAS ESPINOZA Y CARLOS ALBERTO NIETO, "Diseño e Implementación de Un Rectificador Totalmente Controlado Con Factor de Potencia Mejorado Basado En Tecnología CMOS Y DSP", Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander., Bucaramanga-2007.
- [4] ROBERGE, Pierre R. Handbook of Corrosion Engineering. New York: Mc Graw-Hill, 2000. 1130p. ISBN 0-07-076516-2.
- [5] JAVIER EDUARDO ACEVEDO CASTRO, RODRIGO ROJAS RAMOS "Obtención y Visualización en Tiempo Real de Los Parámetros de Rendimiento de Un Rectificador Trifásico Basado En Tecnología CMOS Usando Un DSP", Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander., Bucaramanga-2009.
- [7] Múnera, h. d., Alejandro. "Microcontroladores de 32 bits ColdFire V1/Familia JM". Revisión técnica 0.1.
- [8] Mohan N., T. M. Undeland, W. P. Robbins (1995). Power Electronics: Converters, Applications and Design. John Wiley & Sons Inc., 2nd edition. New York.



[9] Victor H. Compeán J., Claudio A. Lara R., Gregorio Moctezuma J., Gabriel G. Luna M. y Daniel U. Campos D. "DISEÑO DIDÁCTICO DE UN RECTIFICADOR CONTROLADO TRIFÁSICO", Facultad de Ciencias (UASLP), Av. Salvador Nava s/n, Zona Universitaria, C.P. 78290, San Luis Potosí, S.L.P., México-2002.

[10] Rectifier, S. C., Current, A., Transistor, B. J., Oxide, M., Field, S., Transistor, E., Gate, I., et al. (n.d.). Capítulo 2 Dispositivos de Electrónica de Potencia. Potencia.

[11] MAURO SERGIO PERCOVICH MENESES, "Diseño de Un Sistema de Protección Catódica Para Los Tanques de Almacenamiento de Crudo K-01 Y K-02 del Campo Escuela Colorado", Tesis Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga-2009.

[12] FREDY ALBERTO ROJAS ESPINOZA Y CARLOS ALBERTO NIETO, "Diseño e Implementación de Un Rectificador Totalmente Controlado Con Factor de Potencia Mejorado Basado En Tecnología CMOS Y DSP", Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander., Bucaramanga-2007.



ANEXO A. DEFINICIONES Y TERMINOS

Las definiciones y términos que se muestran a continuación son una antesala al trabajo desarrollado, en el cual se explican conceptos básicos previos al avance del mismo.

RECTIFICADOR

Un rectificador es un circuito que convierte una señal de corriente alterna en una señal unidireccional o continua, Por tanto es considerado como un procesador de potencia que debe proporcionar una salida de DC con una cantidad mínima de rizado. Al mismo tiempo deberá mantener la corriente de entrada tan sinusoidal como sea posible y en fase con el voltaje de entrada, de tal manera que el factor de potencia esté cercano a la unidad.

MICROCONTROLADOR

Los microcontroladores son sistemas digitales inteligentes (programables). Incluyen en un mismo chip todos los componentes más importantes de un sistema basado en microprocesador: CPU, memoria, puertos de E/S.

PWM

La modulación por ancho de pulsos de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (senoidal o cuadrada), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva



en relación con el período.

SCR

El SCR (Rectificador Controlado de Silicio), es un dispositivo semiconductor biestable formado por tres uniones pn con la disposición pnpn. Está formado por tres terminales, llamados Ánodo, Cátodo y Puerta. La conducción entre ánodo y cátodo es controlada por el terminal de puerta. Es un elemento unidireccional (sentido de la corriente es único), que trabaja como un conmutador ideal.

TRANSFORMADOR

El transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, por medio de interacción electromagnética, conservando la frecuencia de trabajo. Este elemento se compone por dos o más bobinas de material conductor, aisladas entre sí eléctricamente y por lo general enrolladas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético. La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que se establece en el núcleo. Los transformadores son dispositivos basados en el fenómeno de la inducción electromagnética y están constituidos, en su forma más simple, por dos bobinas devanadas sobre un núcleo cerrado, fabricado bien sea de hierro dulce o de láminas apiladas de acero eléctrico, aleación apropiada para optimizar el flujo magnético. Las bobinas o devanados se denominan primarios y secundarios según correspondan a la entrada o salida del sistema en cuestión, respectivamente.



RESISTENCIA DE DERIVACIÓN

Conocida también como derivador de corriente, resistencia *shunt* ó resistencia de derivación. Una resistencia *shunt* es aquella instalada en serie con el circuito principal de medición o toma de datos, cuyo valor es varias veces más pequeño que la impedancia original del circuito, y que sirve como transductor. Así, el efecto es poder medir grandes corrientes con el mismo circuito, derivando la mayor parte de la corriente por la resistencia shunt y dejando una pequeña parte como muestra para el circuito principal.

OPTOACOPLADOR

Los optoacopladores, llamados también elementos de acoplamiento optoelectrónicos, permiten transmitir señales entre dos circuitos de corriente aislados ópticamente entre sí. Entre los dos circuitos de corriente puede haber una diferencia de potencial de varios miles de voltios.

El Optoacoplador es un dispositivo de emisión y recepción que trabaja como un interruptor excitado mediante la luz emitida por un diodo LED que satura un componente optoelectrónico, normalmente en forma de fototransistor o fototriac, de este modo se combinan en un solo dispositivo semiconductor, un fotoemisor y un fotorreceptor cuya conexión entre ambos es óptica. Se suelen utilizar para aislar eléctricamente a dispositivos muy sensibles.

DETECTOR DE CRUCE POR CERO

Este circuito se encarga de monitorear la señal de alimentación del rectificador controlado mediante la detección del cruce de la señal alterna por la línea de



referencia cero y de establecer un punto de partida entre esta señal de entrada y el control que se realiza sobre los tiristores.

PROTECCIÓN CATÓDICA

La protección catódica es la polarización de las zonas con potenciales nobles (cátodos) hasta el potencial más activo sobre la superficie metálica. La protección catódica se alcanza convirtiendo la estructura en el cátodo de un circuito de corriente continua. Se ajusta la circulación de corriente para asegurar que el potencial polarizado es al menos tan activo como el del sitio anódico más activo de la estructura.

ANEXO B. CONTENIDO FOTOGRÁFICO DEL RECTIFICADOR CONTROLADO

Figura B.1 Transformador trifásico cara posterior.



Figura B.2 Transformador trifásico cara frontal.



Figura B.3 Bases metálicas para el sistema de rectificación.



Figura B.4 Semiconductores de potencia.

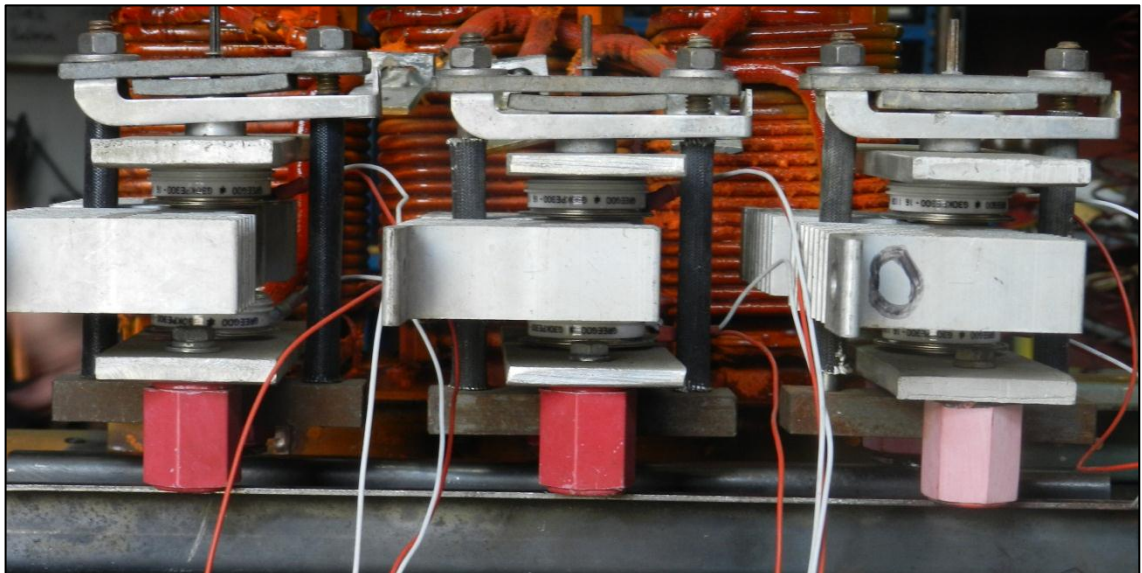


Figura B.5 Cara superior del sistema electrónico diseñado.

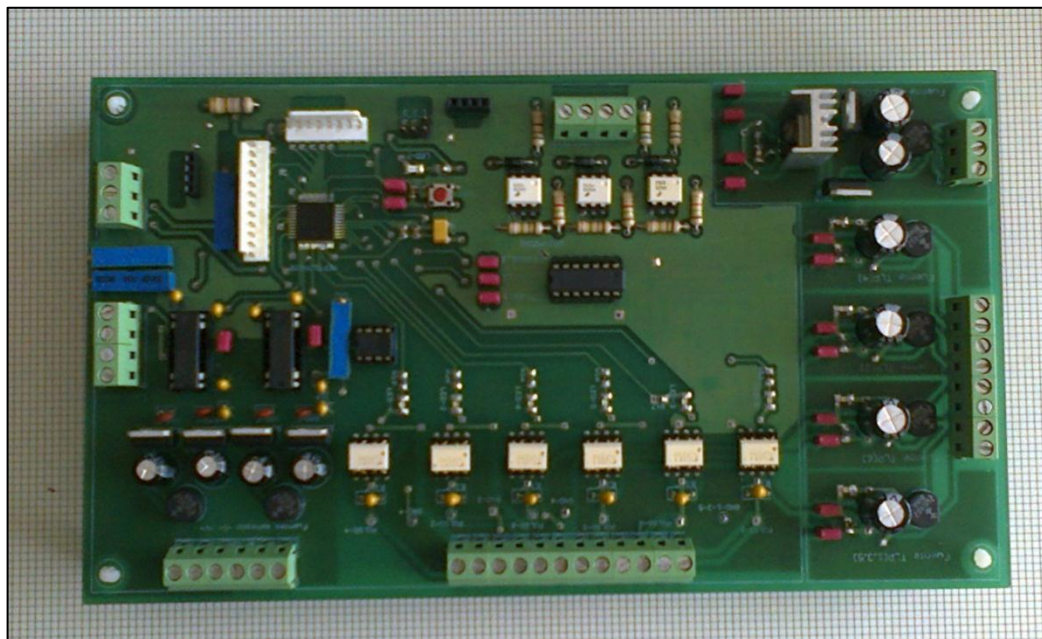
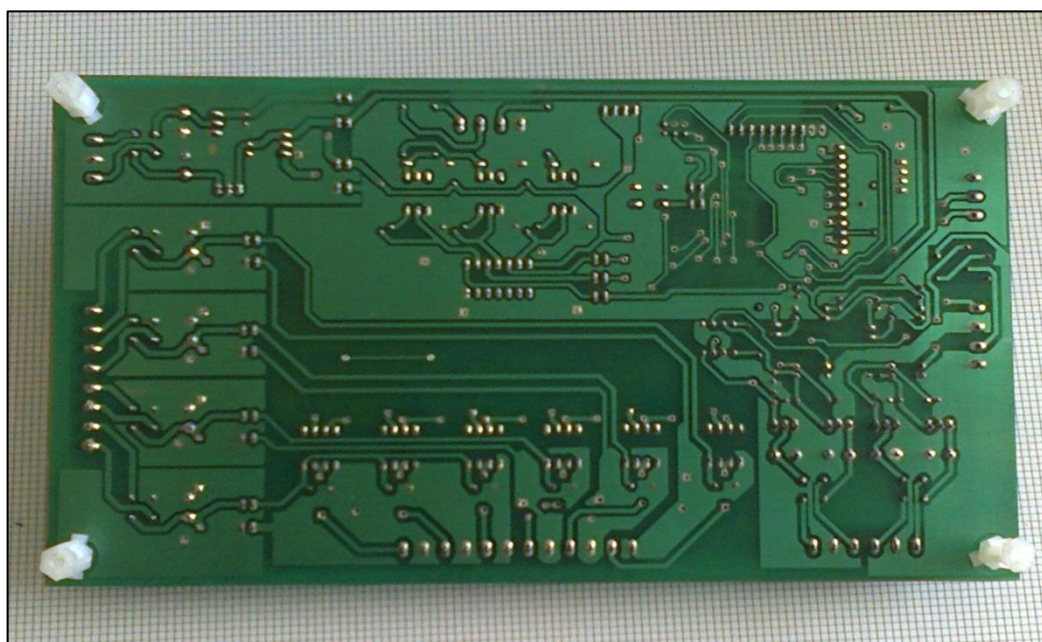


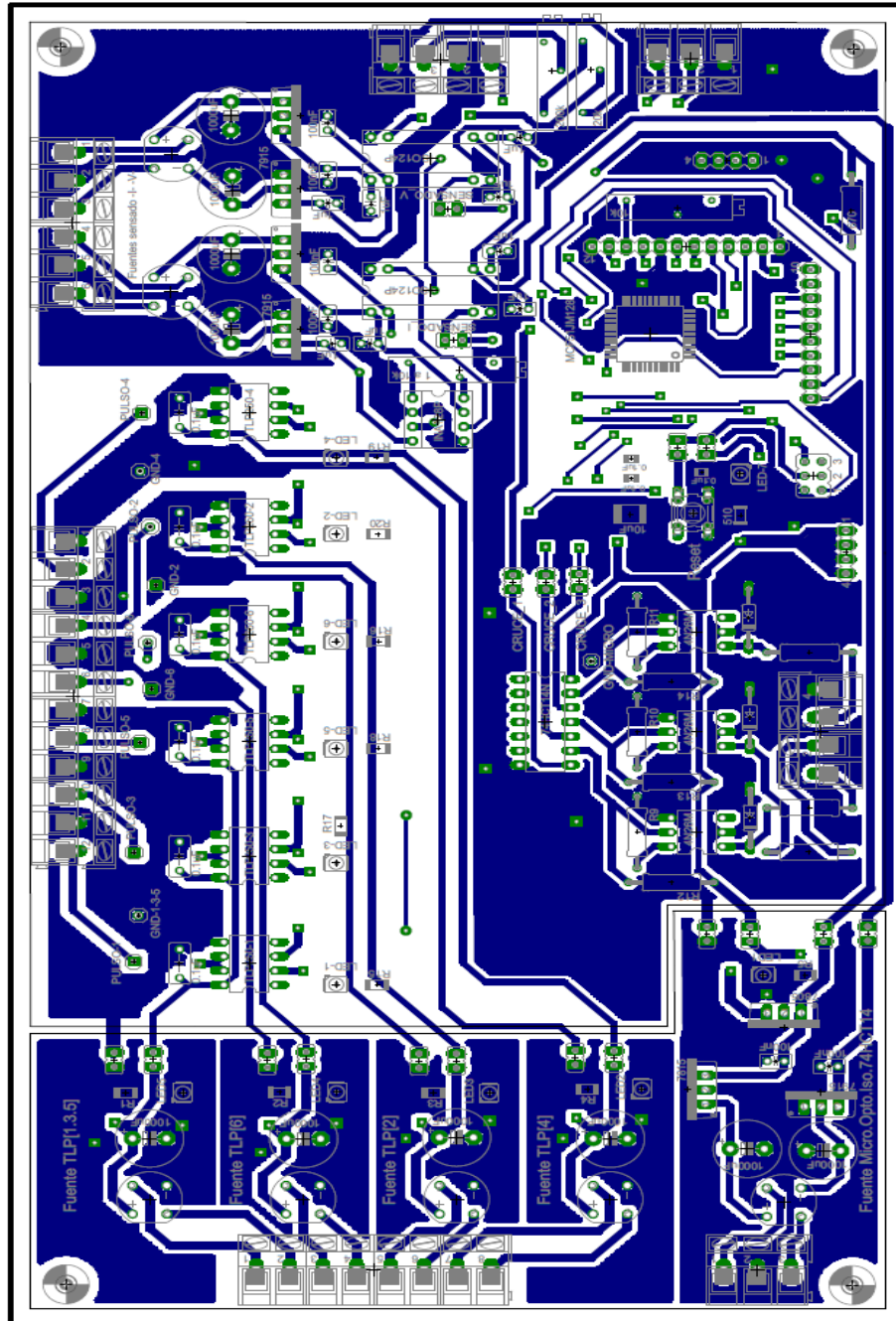
Figura B.5 Cara inferior del sistema electrónico diseñado.





ANEXO C. CIRCUITO IMPRESO MEDIANTE EAGLE LAYOUT EDITOR PROFESSIONAL-TRIAL

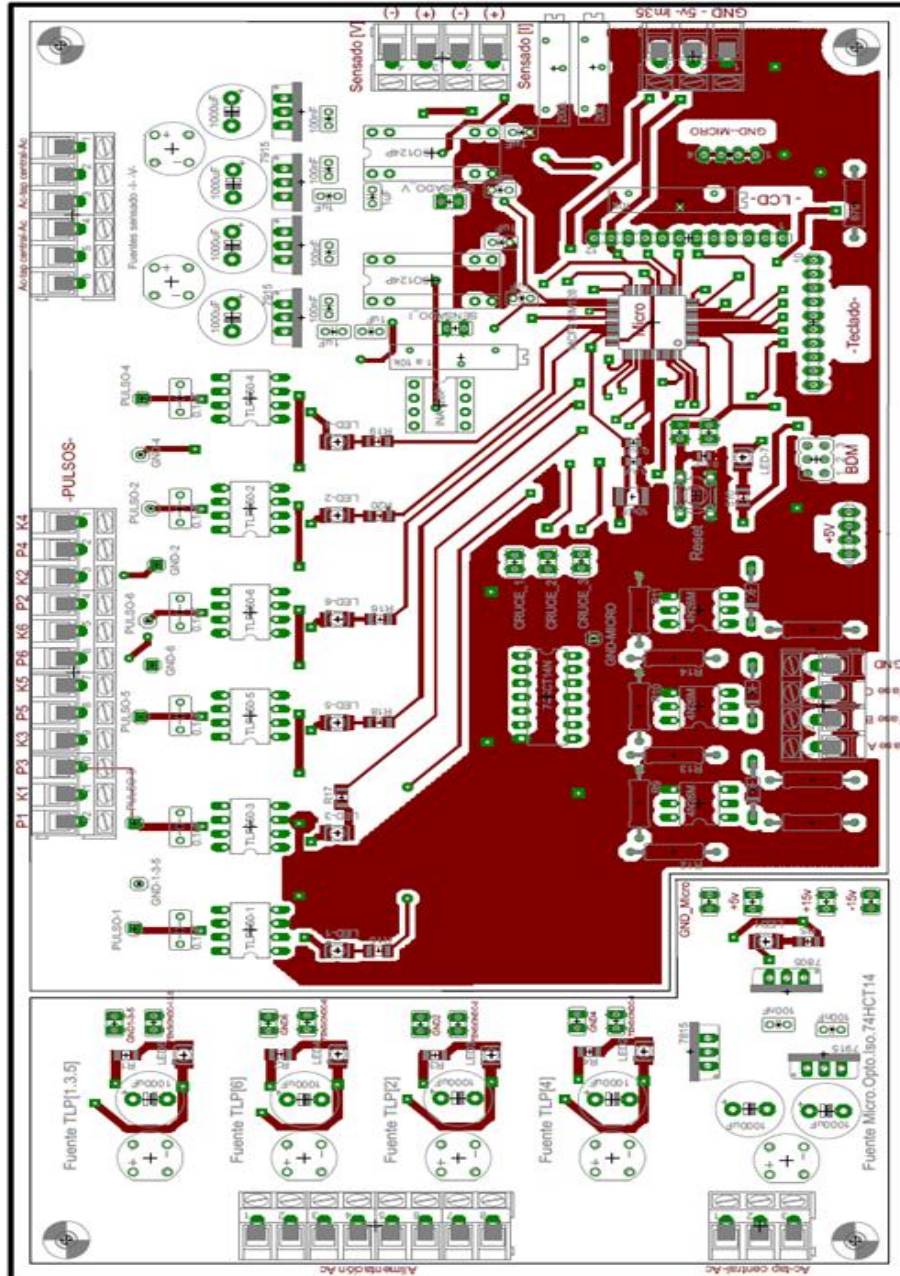
Figura C.1 Capa top del circuito impreso.



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA PARA APLICACIONES EN PROTECCIÓN CATÓDICA.



Figura C.2 Capa Bottom del circuito impreso.





ANEXO D. HOJA DE DATOS DE LOS ELEMENTOS ELECTRÓNICOS UTILIZADOS

Figura D.1 Hoja de datos TLP250.

TOSHIBA
TLP250

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC

TLP250

Transistor Inverter
 Inverter For Air Conditionor
 IGBT Gate Drive
 Power MOS FET Gate Drive

The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.
 This unit is 8-lead DIP package.
 TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current: $I_T = 8 \text{ mA (max.)}$
- Supply current (IO): 11 mA (max.)
- Supply voltage (VOC): 10-55V
- Output current (IO): $\pm 1.5 \text{ A (max.)}$
- Switching time (t_{pLH}/t_{pHL}): $1.5 \mu\text{s (max.)}$
- Isolation voltage: $2500V_{rms} (\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, EIS No. E67549
- Option (D4) type
 VDE approved: DIN VDE0884/06.92, certificate No. 76825
 Maximum operating insulation voltage: $650V_{PK}$
 Highest permissible over voltage: $4000V_{PK}$

(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"

- Creepage distance: 0.4 mm (min.)
- Clearance: 0.4 mm (min.)

Schematic

A 0.1 μ F bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

Pin Configuration (top view)

1: N.C.
 2: Anode
 3: Cathode
 4: N.C.
 5: GND
 6: V_o (Output)
 7: V_o
 8: V_{cc}

Truth Table

Input LED		Tr1	Tr2
On	On	On	Off
Off	Off	Off	On

1
2002-09-25



Figura D.2 Hoja de datos HD74LS14.

HD74LS14

Hex Schmitt Trigger Inverters

REJ03D0399-0300
Rev.3.00
Jul.13.2005

Features

- Ordering Information

Part Name	Package Type	Package Code (Previous Code)	Package Abbreviation	Taping Abbreviation (Quantity)
HD74LS14P	DILP-14 pin	PRDP0014AB-B (DP-14AV)	P	—
HD74LS14FPEL	SOP-14 pin (JEITA)	PRSP0014DF-B (FP-14DAV)	FP	EL (2,000 pcs/teel)

Note: Please consult the sales office for the above package availability.

Pin Arrangement

(Top view)

Absolute Maximum Ratings

Item	Symbol	Rating	Unit
Input voltage	V_{IN}	7	V
Supply voltage	V_{CC}	7	V
Power dissipation	P_T	400	mW
Storage temperature	T_{stg}	-65 to +150	°C

Note: Voltage value, unless otherwise noted, are with respect to network ground terminal.

Recommended Operating Conditions

Item	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Supply voltage	V_{CC}	4.75	5.00	5.25	V
Output current	I_{OH}	—	—	-400	μ A
	I_{OL}	—	—	8	mA
Operating temperature	T_{opr}	-20	25	75	°C

Rev.3.00, Jul.13.2005, page 1 of 5

Figura D.3 Hoja de datos 4N26.

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR®

**GENERAL PURPOSE 6-PIN
PHOTOTRANSISTOR OPTOCOUPLERS**

4N25 4N37	4N26 H11A1	4N27 H11A2	4N28 H11A3	4N35 H11A4	4N36 H11A5
--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

WHITE PACKAGE (-M SUFFIX)

SCHEMATIC

PIN 1: ANODE
 2: CATHODE
 3: NO CONNECTION
 4: EMITTER
 5: COLLECTOR
 6: BASE

BLACK PACKAGE (NO -M SUFFIX)

DESCRIPTION

The general purpose optocouplers consist of a gallium arsenide infrared emitting diode driving a silicon phototransistor in a 6-pin dual in-line package.

FEATURES

- Also available in white package by specifying -M suffix, eg. 4N25-M
- UL recognized (File # E90700)
- VDE recognized (File # 94786)
 - Add option V for white package (e.g., 4N25V-M)
 - Add option 300 for black package (e.g., 4N25.300)

APPLICATIONS

- Power supply regulators
- Digital logic inputs
- Microprocessor inputs

© 2002 Fairchild Semiconductor Corporation
Page 1 of 13
6/6/02





Figura D.4 Hoja de datos Microcontrolador MCF51JM128.


Freescale Semiconductor
Data Sheet: Technical Data


Document Number: MCF51JM128
Rev. 4, 05/2012

MCF51JM128


 80 LQFP
14 mm × 14 mm


 64 LQFP
10 mm × 10 mm


 44 LQFP
10 mm × 10 mm


 64 QFP
14 mm × 14 mm

MCF51JM128 ColdFire Microcontroller

The MCF51JM128 is a member of the ColdFire family of 32-bit reduced instruction set computing (RISC) microprocessors. This document provides an overview of the MCF51JM128 series, focusing on its highly integrated and diverse feature set.

The MCF51JM128 series is based on the V1 ColdFire core and operates at processor core speeds up to 50.33 MHz. As part of Freescale's Controller Continuum®, it is an ideal upgrade for designs based on the MC9S08JM60 series of 8-bit microcontrollers.

The MCF51JM128 features the following functional units:

- V1 ColdFire core with background debug module
- Up to 128 KB of flash memory
- Up to 16 KB of static RAM (SRAM)
- Multipurpose clock generator (MCG)
- Dual-role Universal Serial Bus On-The-Go device (USBOTG)
- Controller-area network (MSCAN)
- Cryptographic acceleration unit (CAU)
- Random number generator accelerator (RNGA)
- Analog comparators (ACMP)
- Analog-to-digital converter (ADC) with up to 12 channels
- Two Inter-integrated circuit (IIC) modules
- Two serial peripheral interfaces (SPI)
- Two serial communications interfaces (SCI)
- Carrier modulation timer (CMT)
- Eight-channel timer/pulse-width modulators (TPM)
- Real-time counter (RTC)
- 66 general-purpose input/output (GPIO) modules plus Interrupt request input
- Eight keyboard interrupts (KBI)
- 16-bit Rapid GPIO

This document contains information on a product under development. Freescale reserves the right to change or discontinue this product without notice.

© Freescale Semiconductor, Inc., 2008-2012. All rights reserved.






Figura D.5 Hoja de datos puente rectificador W005G.

W005G THRU W10G

GLASS PASSIVATED SINGLE-PHASE BRIDGE RECTIFIER

Reverse Voltage - 50 to 1000 Volts Forward Current - 1.5 Amperes

Case Style W00G

Dimensions in inches and (millimeters)

FEATURES

- Plastic material has Underwriters Laboratory Flammability Recognition 94V-0
- This series is UL listed under the Recognized Component Index, file number E54214
- Glass passivated chip junctions
- High case dielectric strength
- Typical I_R less than 0.1 μ A
- High overload surge capability
- Ideal for printed circuit boards
- High temperature soldering guaranteed: 260°C/10 seconds, 0.375" (9.5mm) lead length, 5lbs (2.3kg) tension

MECHANICAL DATA

Case: Molded plastic body over passivated junctions
 Terminals: Plated leads solderable per MIL-STD-750, Method 2026
 Mounting Position: Any
 Weight: 0.04 ounce, 1.1 grams

MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.


	SYMBOLS	W005G	W01G	W02G	W04G	W06G	W08G	W10G	UNITS
Maximum repetitive peak reverse voltage	V_{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	Volts
Maximum RMS voltage	V_{RMS}	35	70	140	280	420	560	700	Volts
Maximum DC blocking voltage	V_{DC}	50	100	200	400	600	800	1000	Volts
Maximum average forward rectified current at 0.375" (9.5mm) lead length at $T_A=25^\circ\text{C}$	$I_{(AV)}$				1.5				Amps
Peak forward surge current single sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method)	I_{FSM}				50.0				Amps
Rating for fusing (t<8.3ms)	I^2t				10.0				A ² sec
Maximum instantaneous forward voltage drop per leg at 1.0A	V_f				1.0				Volts
Maximum DC reverse current at rated $T_A=25^\circ\text{C}$	I_R				5.0				μ A
DC blocking voltage per leg $T_A=125^\circ\text{C}$					500.0				
Typical junction capacitance per leg (NOTE 1)	C_J				14.0				pF
Typical thermal resistance per leg (NOTE 2)	$R_{\theta JA}$ $R_{\theta JL}$				36.0 11.0				$^\circ\text{C}/\text{W}$
Operating junction temperature range	T_J				-55 to +150				$^\circ\text{C}$
Storage temperature range	T_{STG}				-55 to +150				$^\circ\text{C}$

NOTES:

(1) Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0 Volts
 (2) Thermal resistance from junction to ambient and from junction to lead at 0.375" (9.5mm) lead length P.C.B. mounting

4/98

Figura D.6 Hoja de datos regulador de voltaje MC7805 y MC7815.


www.fairchildsemi.com

MC78XX/LM78XX/MC78XXA

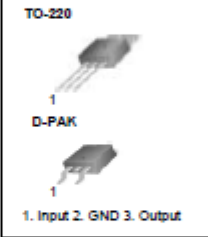
3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator

Features

- Output Current up to 1A
- Output Voltages of 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24V
- Thermal Overload Protection
- Short Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Protection

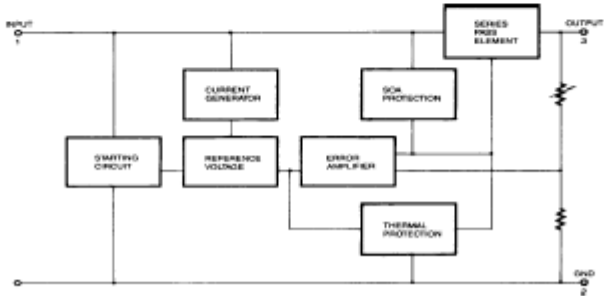
Description

The MC78XX/LM78XX/MC78XXA series of three terminal positive regulators are available in the TO-220/D-PAK package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut down and safe operating area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.



TO-220
D-PAK
1. Input 2. GND 3. Output

Internal Block Diagram



Rev. 1.0.1

©2001 Fairchild Semiconductor Corporation

Figura D.7 Hoja de datos regulador de voltaje MC7905 y MC7915.

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR*

www.fairchildsemi.com

MC79XX/MC79XXA/LM79XX

3-Terminal 1A Negative Voltage Regulator

Features

- Output Current in Excess of 1A
- Output Voltages of -5, -6, -8, -9, -10, -12, -15, -18 and -24V
- Internal Thermal Overload Protection
- Short Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Compensation

Description

The MC79XX / MC79XXA / LM79XX series of three terminal negative regulators are available in TO-220 package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut down and safe operating area protection, making it essentially indestructible.

TO-220

1

1. GND 2. Input 3. Output

Internal Block Diagram

©2001 Fairchild Semiconductor Corporation

Rev. 1.0.0

Figura D.8 Hoja de datos SCR G30KPE DE GREEGOO.

2-5

Semiconductor Device
 Rectifier diode & thyristor (General purpose)

Type and meanings

G 50 KK E
1 2 3 4

1: Greego
2: Diameter of chips
3: Model no:
KP: phase control thyristor
KK: fast turn-off thyristor
KA: high-frequency thyristor
KS: bi-directional thyristor
ZP: rectifier diode
ZK: fast recovery diode
DS: super high speed semiconductor switch

Phase control thyristor

Features

- Full diffusibility
- Disc type hermetic ceramic seal
- Center-amplifying gate structure
- Double side cooling
- Big current



Applications

- Hipower convertor
- AC/DC motor control
- AC/DC switch
- Phase control rectifying
- Active and negative inverter

Technical parameter

Type	V _{CRM} /V _{FRM}		I _{T(AV)} @T _{ns}		I _{RM} 10ms	dv/dt	di/dt	I _{BRM} FRM	t _{ST}		V _{ST}	I _H	V _{TM/THM}		V _{TD}	r _r	R _{TH(j-hs)}	T _{JM}	F	Outline
	25 °C		125 °C						25 °C				125 °C							
	V	A	C	KA					V/μs	A/μs			mA	V						
G24KPE	1100-1800	200	97	2.5	300	100	16	30-200	0.8-2.0	20-150	22600	0.85	1.20	0.095	125	33x55	1			
G30KPEA	1100-1800	200	106	2.5	300	100	30	35-250	0.8-2.0	20-150	24600	0.89	1.10	0.065	125	53x12	2B			
G24KPC	400-1000	300	82	2.5	300	100	16	30-200	0.8-2.0	20-150	202900	0.75	1.00	0.095	125	33x55	1			
G30KPE	1100-1800	300	98	3.8	300	100	30	35-250	0.8-2.5	20-200	22800	0.877	1.02	0.065	125	53x10	2			
G30KPC	400-1000	400	91	3.8	300	100	30	35-250	0.8-2.5	20-200	221200	0.70	0.85	0.065	125	53x10	2			
G35KPEA*	1100-1800	400	98	5	300	100	40	35-250	0.8-2.5	20-200	241200	0.92	0.75	0.040	125	10x20	29			
G38KPU	3100-4500	400	88	6.4	300	100	50	35-300	0.8-2.5	20-250	321200	1.18	1.49	0.035	125	10x20	3			
G35KPC*	400-1000	500	95	5	300	100	40	35-250	0.8-2.5	20-200	181500	0.89	0.65	0.035	125	10x20	3			

Figura D.9 Hoja de datos ISO 124.



ISO124

**Precision Lowest Cost
ISOLATION AMPLIFIER**

FEATURES

- 100% TESTED FOR HIGH-VOLTAGE BREAKDOWN
- RATED 1500Vrms
- HIGH IMR: 140dB at 60Hz
- 0.010% max NONLINEARITY
- BIPOLAR OPERATION: $V_{OS} = \pm 10V$
- 16-PIN PLASTIC DIP AND 28-LEAD SOIC
- EASE OF USE: Fixed Unity Gain Configuration
- $\pm 4.5V$ to $\pm 18V$ SUPPLY RANGE

APPLICATIONS

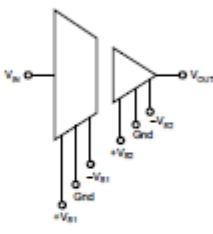
- INDUSTRIAL PROCESS CONTROL: Transducer Isolator, Isolator for Thermocouples, RTDs, Pressure Bridges, and Flow Meters, 4mA to 20mA Loop Isolation
- GROUND LOOP ELIMINATION
- MOTOR AND SCR CONTROL
- POWER MONITORING
- PC-BASED DATA ACQUISITION
- TEST EQUIPMENT

DESCRIPTION

The ISO124 is a precision isolation amplifier incorporating a novel duty cycle modulation-demodulation technique. The signal is transmitted digitally across a 2pF differential capacitive barrier. With digital modulation the barrier characteristics do not affect signal integrity, resulting in excellent reliability and good high frequency transient immunity across the barrier. Both barrier capacitors are imbedded in the plastic body of the package.

The ISO124 is easy to use. No external components are required for operation. The key specifications are 0.010% max nonlinearity, 50kHz signal bandwidth, and 200 μ V/°C V_{OS} drift. A power supply range of $\pm 4.5V$ to $\pm 18V$ and quiescent currents of $\pm 5.0mA$ on V_{S1} and $\pm 5.5mA$ on V_{S2} make these amplifiers ideal for a wide range of applications.

The ISO124 is available in 16-pin plastic DIP and 28-lead plastic surface mount packages.



International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11408, Tucson, AZ 85711 • Street Address: 6750 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85710 • Tel: (520) 746-1111 • Fax: (520) 482-1111
Internet: <http://www.burr-brown.com> • RJL/Line (US) 800-4113 (25/Canada Only) • Cable: BURROBP • Telex: 984441 • FAX: (520) 482-1010 • Immediate Product Info: (800) 564-4132

©1997 Burr-Brown Corporation PDS-1405A Printed in U.S.A. September, 1997



Figura D.9 Hoja de datos INA128.

INA128
INA129

Precision, Low Power INSTRUMENTATION AMPLIFIERS

FEATURES

- LOW OFFSET VOLTAGE: 50µV max
- LOW DRIFT: 0.5µV/°C max
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 5nA max
- HIGH CMR: 120dB min
- INPUTS PROTECTED TO ±40V
- WIDE SUPPLY RANGE: ±2.25 to ±18V
- LOW QUIESCENT CURRENT: 700µA
- 8-PIN PLASTIC DIP, SO-8

APPLICATIONS

- BRIDGE AMPLIFIER
- THERMOCOUPLE AMPLIFIER
- RTD SENSOR AMPLIFIER
- MEDICAL INSTRUMENTATION
- DATA ACQUISITION

DESCRIPTION

The INA128 and INA129 are low power, general purpose instrumentation amplifiers offering excellent accuracy. Their versatile 3-op amp design and small size make them ideal for a wide range of applications. Current-feedback input circuitry provides wide bandwidth even at high gain (200kHz at G = 100).

A single external resistor sets any gain from 1 to 10,000. INA128 provides an industry standard gain equation; INA129's gain equation is compatible with the AD620.

The INA128/INA129 is laser trimmed for very low offset voltage (50µV), drift (0.5µV/°C) and high common-mode rejection (120dB at G ≥ 100). It operates with power supplies as low as ±2.25V, and quiescent current is only 700µA—ideal for battery operated systems. Internal input protection can withstand up to ±40V without damage.

The INA128/INA129 is available in 8-pin plastic DIP, and SO-8 surface-mount packages, specified for the -40°C to +85°C temperature range. The INA128 is also available in dual configuration, the INA2128.

NOTE: (1) INA128: 24.7kΩ

International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85736 • Street Address: 4735 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85736 • Tel: (520) 716-1111 • Fax: (520) 716-1110
Internet: <http://www.burr-brown.com/> • FAXLine: (800) 541-4133 (US/Canada Only) • Cable: BURROIP • Telex: 0864691 • FAX: (520) 716-1210 • Immediate Product Info: (800) 541-4132

©1995 Burr-Brown Corporation PDS-1290C Printed in U.S.A., October, 1995

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA PARA APLICACIONES EN PROTECCIÓN CATÓDICA.

129



ANEXO E. CÓDIGO GENERAL DEL CIRCUITO DE CONTROL MEDIANTE CODEWARRIOR IDE 6.3

```

/* Archivos de cabecera */
#include <hidef.h> //macro para interrupciones
#include "derivative.h" //macro de declaraciones del MCU

#define DIG_BUF_SIZE 8
#define SIZE_REG_LCD 7
#define BUF_SIZE 1800
#define Max_PasoV 5
#define Max_PasoI 20

unsigned int DIG_buf_write_pointer = 0, DIG_buf_read_pointer = 0;
unsigned int div = 0, entero_ADC, pos_cur = 0;
unsigned int cont_set;

float sen_tension = 0, set_tension = 0, sen_corriente = 0, set_corriente = 0, error = 0;
float uc_V = 0, Kv = 5, error_V = 0, uK=0, uc_C = 0, Kc = 17, error_C = 0;
float set_int = 0, div_dec = 0, set=0;
float dat_PE = 0;
float dato_ADC=0, f_ADC=0, f_ADC1=0;
float deltaC_ADC=0, dato_antC_ADC=0,deltaV_ADC=0, dato_antV_ADC=0;

int grados = 180, uc_Ve = 180, uc_Ce = 180, cont_dis=0, grados_ant = 180;
int tecla,tipo,canal =0x60; //mas variables temporales
int cenE=0,decE=0,uniE=0,cenF=0,decF=0,uniF=0,dat_PF;
int cont = 0, cont_KBI = 0, cont_cero = 0,cont_FA = 0, cont_FBFC = 0, puntero_V, puntero_C;
int long contp = 0,cont_ver =0;
unsigned int error_abs=0;

byte flag = 1, flag_LR = 1, flag_sec_pos = 0, flag_sec_neg = 0, bandera_configuracion = 0;
byte flag_setting = 1, flag_inicio = 0, flag_corriente = 0, flag_tension = 0, flag_selet = 1,flag_act =0,
flag_lcd_sen = 0, flag_set = 0; // bandera de ajuste parametros
byte bandera=0, flag_faul = 0;
byte bandera_ADC_V=0,bandera_ADC_C=0;
byte flag_star=1, flag_RTC = 0, flag_setcero =0;

char i=0,j=0; //variable de iteracion
char columna=0; //columna detectada del teclado
char fila=0; //fila detectada del teclado
char comando8=0; //parametro inicializacion LCD modo 8 bits
    
```



```
char dato4; //dato a enviar al LCD
char rs=0; //señal de dato o comando al LCD
char a=0; //variable temporal
char temp=0,pos =0;

word dat_ADC=0;
//volatile word Buf_V[BUF_SIZE], Buf_C[BUF_SIZE];
int long sum_VA = 0, sum_V = 0, sum_CA = 0, sum_C = 0;

char *pM, pm=15; //Puntero a mensaje para el LCD

volatile char DIG_buffer[DIG_BUF_SIZE];
volatile char act_lcd[SIZE_REG_LCD];

unsigned long retardo=0; //parametro para hacer retardo

/* Declaracion de variables y constantes */
const unsigned char mensaj1[] = "RECTIFICADOR 3Ø ";
const unsigned char mensaj2[] = " CONTROLADO ";
const unsigned char mensaj3[] = " CAMPO ESCUELA ";
const unsigned char mensaj4[] = " COLORADO - E3T ";
const unsigned char mensajeV1[] = "TENSION(V) [1]";
const unsigned char mensajeC1[] = "CORRIENTE(A) [2]";
const unsigned char mensajeV[] = "TENSION:  V";
const unsigned char mensajeC[] = "CORRIENTE:  A";
const unsigned char mensajeC2[] = "CORR/TE:  A";
const unsigned char mensaj5[] = " FALLO HARDWARE ";
const unsigned char mensaj6[] = " O LINEA CAIDA ";
const unsigned char mensaj7[] = " DATO NO VALIDO ";
const unsigned char mensaj8[] = " FUERA DE RANGO ";

////////////////////////////////////

void GPIO_Init(void) {

PTCDD = 0xFF; /* Configure PTC pin as output */
PTCD = 0x00;

PTDDD_PTDDD0 = 0x01; /* Configure PTDD pin as output */
PTDD_PTDD0 = 0x00;

PTDDD_PTDDD1 = 0x01; /* Configure PTD1 pin as output */
PTDD_PTDD1 = 0x00;

PTBDD_PTDD2 = 0x01; /* Configure PTB pin as output */
```



```

PTBD_PTBD2 = 0x00;
}

/* Funcion para inicializar el puerto A */
void PTE_Init(void){

    PTED=0x00; //inicialice estado pines PTA
    PTEDD=0xFF; //inicialice dirección de pines PTA
    PTEPE=0x00; //inicialice estado de pullups PTA
    PTESE=0xFF; //inicialice estado del slew rate PTA
    PTEDS=0x00; //inicialice estado de drive strength PTA
    // PTAIFE=0xFF; //inicialice estado del filtro PTA
}

/* Funcion para inicializar el puerto G */
void PTG_Init(void){

    PTGD=0x00; //inicialice estado pines PTA
    PTGDD=0x00; //inicialice dirección de pines PTA
    PTGPE=0xFF; //inicialice estado de pullups PTA
    PTGSE=0xFF; //inicialice estado del slew rate PTA
    PTGDS=0x00; //inicialice estado de drive strength PTA
    // PTAIFE=0xFF; //inicialice estado del filtro PTA
    PTGPE_PTGPE4=0;
    PTGPE_PTGPE5=0;

}

/* Funcion para inicializar el puerto F */
void PTF_Init(void){

    PTFD=0xFF; //inicialice estado pines PTF
    PTFDD=0xFF; //inicialice dirección de pines PTF
    PTFPE=0x00; //inicialice estado de pullups PTF
    PTFSE=0xFF; //inicialice estado del slew rate PTF
    PTFDS=0x00; //inicialice estado de drive strength PTF
    //PTFIFE=0xFF; //inicialice estado del filtro PTF
}

/* Funcion para inicializar el KBI */
void KBI_Init(void){

    KBISC &= (unsigned char)~2;
    KBIES_KBEDG4 = 1;
    KBISC &= (unsigned char)~1;
    KBIPE_KBIPE4 = 1;
    KBISC |= (unsigned char)4;
    
```



```

KBISC |= (unsigned char)2;

}

/*Funcion para inicializacion del ADC */
void ADC_Init(void){

    ADCCFG=0x79; //inicializa registro ADCCFG del ADC
    ADCSC2=0x00; //inicializa registro ADCSC2 del ADC
    APCTL1=0x03; //inicializa registro APCTL1 del ADC
    ADCSC1=0x60; //inicializa registro ADCSC1 del ADC
}

/* ### Init_TPM init code */
void TPM1_configuration (void) {

    (void)(TPM1C5SC == 0);      /* Channel 0 int. flag clearing (first part) */
    TPM1C5SC = 0x64;           /* Int. flag clearing (2nd part) and channel 0 contr. register setting */
    TPM1C5V = 0x32U;          /* Compare 0 value setting */
    TPM1SC = 0x00;            /* Stop and reset counter */
    TPM1MOD = 0xACU;          /* Period value setting */
    (void)(TPM1SC == 0);      /* Overflow int. flag clearing (first part) */
    TPM1SC = 0x0F;           /* Int. flag clearing (2nd part) and timer control register setting */
}

/* Declaracion de funciones */
void Delay(unsigned long retardo); //funcion para hacer reatrdos varios
void LCD_Init(void); //funcion para inicilaizar LCD
void Lcd_4bit_Wr(char dato4,char rs); //funcion para escribir dato al LCD
void Comando_8bit(char comando8); //funcion para inicio del LCD a 8 bits
void Rote_Col (void); //funcion para rotar un cero por columnas teclado
void Leer_parametros_teclado (void); // Funcionpara leer parametros del teclado CORRIENTE
void convertir_a_decimal (void);
void convertir_valor_tension (void);
void convertir_valor_correiente (void);
void teclado (void);

/* main(): Funcion principal */
void main(void) {

    SPMSC1 = 0x1C;
    SPMSC2 = 0x00;
    if (*(unsigned char*far)0xFFAF != 0xFF) { /* Test if the device trim value is stored on the specified address */
        MCGTRM = *(unsigned char*far)0xFFAF; /* Initialize MCGTRM register from a non volatile memory */
        MCGSC = *(unsigned char*far)0xFFAE; /* Initialize MCGSC register from a non volatile memory */
    }
    MCGC2 = 0x40;          /* Set MCGC2 register */
}
    
```



```
MCGC1 = 0x06;          /* Set MCGC1 register */
MCGC3 = 0x01;          /* Set MCGC3 register */
while(!MCGSC_LOCK) {   /* Wait until FLL is locked */
}

```

EnableInterrupts; //habilita interrupciones

```
PTE_Init(); //pines inician en "0",pines como salida, no pullups, si slew, no strength y si filtro
PTF_Init(); //pines inician en "1",pines como salida, no pullups, si slew, no strength y si filtro
PTG_Init(); //pines inician en "0",pines como entrada,si pullups, si slew, no strength y si filtro
GPIO_Init();
KBI_Init();
LCD_Init(); //inicialice LCD

```

```
Lcd_4bit_Wr(0x01,0); //borrar pantalla LCD
Lcd_4bit_Wr(0x06,0); //desplaza cursor a la derecha con cada caracter

```

```
Lcd_4bit_Wr(0x80,0); //primer caracter fila 1 columna 1
pM = (char *)mensaje1; //puntero toma dirección del mensaje con definicion
for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
    Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
    pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
}
Lcd_4bit_Wr(0xC0,0); //primer caracter fila 1 columna 1
pM = (char *)mensaje2; //puntero toma dirección del mensaje con definicion
for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
    Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
    pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
}

```

Delay(100000);

```
Lcd_4bit_Wr(0x80,0); //primer caracter fila 1 columna 1
pM = (char *)mensaje3; //puntero toma dirección del mensaje con definicion
for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
    Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
    pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
}
Lcd_4bit_Wr(0xC0,0); //primer caracter fila 1 columna 1
pM = (char *)mensaje4; //puntero toma dirección del mensaje con definicion
for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
    Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
    pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
}

```

Delay(100000);

Leer_parametros_teclado (); // Funcionpara leer parametros del teclado



```
}
}
```

```
if(flag_faul){
    flag_lcd_sen = 0;
    Lcd_4bit_Wr(0x01,0); //borrar pantalla LCD
    Lcd_4bit_Wr(0x06,0); //desplaza cursor a la derecha con cada caracter
```

```

    Lcd_4bit_Wr(0x80,0); //primer caracter fila 1 columna 1
    pM = (char *)mensaje5; //puntero toma dirección del mensaje con definicion
    for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
        Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
        pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
    }
    Lcd_4bit_Wr(0xC0,0); //primer caracter fila 1 columna 1
    pM = (char *)mensaje6; //puntero toma dirección del mensaje con definicion
    for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
        Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
        pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
    }
}
```

```
while(flag_faul){__RESET_WATCHDOG();if( PTGD_PTGD4 && PTGD_PTGD5){cont_FBFC = 0; }}
}
```

```
while(flag_set){
    flag_set = 0;
    DIG_buf_write_pointer=0;
    flag_setting = 1;
    flag_inicio = 0;
    cont_set = 0;
    Leer_parametros_teclado ();
    flag_lcd_sen = 0;
    convertir_a_decimal ();
    grados_ant = 180;
}
```

```
}
}
```

```

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////          FUNCIONES          //////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
```

/ Funcion para inicializacion del LCD a 4 bits */*



```

void LCD_Init(void){

    Delay(1926); //hace retardo////////// 200000 = 2926 ////////////
    Comando_8bit(0x30); //llama funcion enviar comando en 8 bits con comando
    Delay(1926); //hace retardo
    Comando_8bit(0x30); //llama funcion enviar comando en 8 bits con comando
    Delay(1926); //hace retardo
    Comando_8bit(0x20); //LCD 2x16 y manejo a 4 bits
    Lcd_4bit_Wr(0x28,0); //LCD 2x16 y manejo a 4 bits
    Lcd_4bit_Wr(0x0C,0); //ON LCD, OFF cursor
    Lcd_4bit_Wr(0x01,0); //borrar pantalla LCD
    Lcd_4bit_Wr(0x06,0); //desplaza cursor a la derecha con cada caracter
    Lcd_4bit_Wr(0x80,0); //primer caracter fila 1 columna 1

}

/* Funcion para escribir a 4 bits en el LCD */
void Lcd_4bit_Wr(char dato4,char rs){
    if (rs==0){ //pregunte si se va a enviar un comando o un dato
        PTED_PTED5=0; //prepara envío de comando RS = 0
    }
    else{
        PTED_PTED5=1; //prepara envio de dato RS = 1
    }
    a=dato4; //almacena temporalmente el dato
    a=a>>4; //desplaza parte alta dato para la baja
    PTED&=0xF0; //enmascara parte alta del puerto A
    a&=0x0F; //enmascara parte baja del dato a enviar al LCD
    PTED_PTED4=1; //sube pin de enable
    Delay(30); //hace retardo //////////// 1000 = 147 ////////////
    PTED|=a; //envía nibble alto del dato
    Delay(30); //hace retardo
    PTED_PTED4=0; //baja pin de enable
    Delay(30); //hace retardo
    PTED&=0xF0; //enmascara parte alta del puerto A
    dato4&=0x0F; //enmascara parte baja del dato a enviar al LCD
    PTED_PTED4=1; //sube pin de enable
    Delay(30); //hace retardo
    PTED|=dato4; //envía nibble bajo del dato
    Delay(30); //hace retardo
    PTED_PTED4=0; //baja pin de enable
    Delay(30); //hace retardo
}
    
```



```

/* Funcion para envio de comando en 8 bits al LCD (solo para inicio) */
void Comando_8bit(char comando8){

    PTED_PTED5=0; //prepara envio de comando
    PTED&=0xF0; //enmascara parte baja del puerto A
    comando8&=0xF0; //enmascara parte alta de comando a enviar al LCD
    comando8=comando8>>4; //desplaza para tomar nibble alto
    PTED_PTED4=1; //sube pin de enable
    Delay(1463); //hace retardo 10000 1463
    PTED|=comando8; //envía comando
    Delay(1463); //hace retardo
    PTED_PTED4=0; //sube pin de enable
    Delay(1463); //hace retardo

}

/* Funcion Delay(): Retarda basado en una variable tipo entera */
void Delay(unsigned long retardo){
    while(retardo>0){ //llego a cero?
        __RESET_WATCHDOG();
        if( PTGD_PTGD4 && PTGD_PTGD5){cont_FBFC = 0;}
        retardo--; //no --> decrementa
    }
}

/* Funcion para rotar cero por columnas teclado */
void Rote_Col (void){

    PTFD = 0x32; //Cero a la columna 1
    if(PTGD_PTGD0==0 || PTGD_PTGD1==0 || PTGD_PTGD2==0 || PTGD_PTGD3==0){teclado();}
    Delay(732); //hace retardo 5000 = 732
    PTFD = 0x31; //Cero a la columna 2
    if(PTGD_PTGD0==0 || PTGD_PTGD1==0 || PTGD_PTGD2==0 || PTGD_PTGD3==0){teclado();}
    Delay(732); //hace retardo
    PTFD = 0x23; //Cero a la columna 3
    if(PTGD_PTGD0==0 || PTGD_PTGD1==0 || PTGD_PTGD2==0 || PTGD_PTGD3==0){teclado();}
    Delay(732); //hace retardo
    PTFD = 0x13; //Cero a la columna 3
    if(PTGD_PTGD0==0 || PTGD_PTGD1==0 || PTGD_PTGD2==0 || PTGD_PTGD3==0){teclado();}
    Delay(732); //hace retardo

}

// funcion para leer parametros del teclado
void Leer_parametros_teclado (void){ // Funcion para leer parametros del teclado CORRIENTE

    Inicio:

```



```

DIG_buf_write_pointer = 0;
flag_inicio = 0;
flag_selet = 0;
flag_tension = 0;
flag_corriente = 0;

Lcd_4bit_Wr(0x01,0); //borrar pantalla LCD
Lcd_4bit_Wr(0x06,0); //desplaza cursor a la derecha con cada caracter
Lcd_4bit_Wr(0x80,0); //primer caracter fila 1 columna 1

pM = (char *)mensajeV1; //puntero toma dirección del mensaje con definicon
for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
    Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
    pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
}

Lcd_4bit_Wr(0xC0,0); //primer caracter fila 1 columna 1

pM = (char *)mensajeC1; //puntero toma dirección del mensaje con definicon
for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
    Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
    pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
}

while(flag_inicio == 0){
do{ //espere a que se ingrese una tecla
    Rote_Col(); //mientras, rote el cero por las columnas
}while (bandera==0 );
bandera = 0; //aclare bandera
Lcd_4bit_Wr(0xC8+i,0); //cursor del LCD a posicion decenas horas

if(tecla == 1){
    flag_inicio = 1;
    flag_selet = 1;
    flag_tension = 1; //parametro a controlar corriente
    Delay(26575); //retardo para esperar siguiente tecla //////////////// 2500000 = 36575 ////////////////
    while(flag_setting){
        Lcd_4bit_Wr(0x01,0); //borrar pantalla LCD
        Lcd_4bit_Wr(0x06,0); //desplaza cursor a la derecha con cada caracter
        Lcd_4bit_Wr(0x80,0); //primer caracter fila 1 columna 1

        pM = (char *)mensajeV; //puntero toma dirección del mensaje con definicon
        for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
            Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
            pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
        }
        //Programación ajuste set pion voltaje :
    }
}
    
```




```

    flag_setting = 0;
    Delay(1780); //retardo para esperar siguiente tecla 6000 8780
}else{
    if(tecla == 0x7F){ // borrar o suprimir
        i = 8;
        DIG_buf_write_pointer = 0;
        Delay(6575); //retardo para esperar siguiente tecla 26575
    }
}
}
}
}
Lcd_4bit_Wr(0x0C,0); //ON LCD, OFF cursor
Delay(26575); //retardo para esperar siguiente tecla
}
}else{
    if(tecla ==2){
        flag_inicio = 1;
        flag_selet = 1;
        flag_corriente = 1; //parametro a controlar corriente
        Delay(6575); //retardo para esperar siguiente tecla 26575

        while(flag_setting){
            Lcd_4bit_Wr(0x01,0); //borrar pantalla LCD
            Lcd_4bit_Wr(0x06,0); //desplaza cursor a la derecha con cada caracter
            Lcd_4bit_Wr(0x80,0); //primer caracter fila 1 columna 1
            pM = (char *)mensajeC; //puntero toma dirección del mensaje con definicon
            for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
                Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
                pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
            }
            //Programación ajuste set pion voltaje :

            for(i=1;i<=5;i++){
                do{ //espere a que se ingrese una tecla
                    Rote_Col(); //mientras, rote el cero por las columnas
                }while (bandera==0);
                bandera = 0; //aclare bandera
                Lcd_4bit_Wr(0xC8+i,0); //cursor del LCD a posicion decenas horas
                if(tecla >= 0 && tecla <= 9){
                    Lcd_4bit_Wr(tecla + 0x30,1);
                    DIG_buffer[DIG_buf_write_pointer++] = tecla;
                    Delay(6575); //retardo para esperar siguiente tecla 26575
                }else{
                    if(tecla == 0x2E){ //punto decimal
                        Lcd_4bit_Wr(tecla,1);
                        DIG_buffer[DIG_buf_write_pointer++] = tecla;
                        Delay(6575); //retardo para esperar siguiente tecla 26575
                    }else{

```



```

if(tecla == 0xA9){ // confirmar o enter
    cont_set=0;
    flag_set = 0;
    i = 8;
    flag_setting = 0;
    Delay(1780); //retardo para esperar siguiente tecla 6000 8780
}else{
    if(tecla == 0x7F && DIG_buf_write_pointer == 0){ // borrar o suprimir
        Delay(1575); //retardo para esperar siguiente tecla 6575
        goto Inicio;
    }else{
        if(tecla == 0x7F){ // borrar o suprimir
            i = 8;
            DIG_buf_write_pointer = 0;
            Delay(6575); //retardo para esperar siguiente tecla 26575
        }else{
            i-- ;
        }
    }
}
}
}
}

while( i>=5 && i!=8){
    do{ //espere a que se ingrese una tecla
        Rote_Col(); //mientras, rote el cero por las columnas
    }while (bandera==0);
    bandera = 0;
    if(tecla == 0xA9){ // confirmar o enter
        cont_set = 0;
        flag_set = 0;
        i = 8;
        flag_setting = 0;
        Delay(1780); //retardo para esperar siguiente tecla 6000 8780
    }else{
        if(tecla == 0x7F){ // borrar o suprimir
            i = 8;
            DIG_buf_write_pointer = 0;
            Delay(6575); //retardo para esperar siguiente tecla 26575
        }
    }
}
}

Lcd_4bit_Wr(0x0C,0); //ON LCD, OFF cursor
Delay(6575); //retardo para esperar siguiente tecla 26575
}
}else{

```



```

if(tecla == 0x44){
    Delay(575); //retardo para esperar siguiente tecla 6575

}
}
}
}
}

// funcion para convertir dato ingresado desde el teclado a decimal
void convertir_a_decimal (void){
    div = 0;
    set_int = 0;
    for(i=0;i<DIG_buf_write_pointer;i++){

        temp = DIG_buffer[i];
        if(temp >= 0 && temp <= 9){
            set_int = set_int*10 + temp;
        }else{
            if(temp == 0x2E){
                div = DIG_buf_write_pointer-1-i;
            }
        }
    }

    switch(div){
    case 0:
        div_dec = 1;
        break;
    case 1:
        div_dec = 10;
        break;
    case 2:
        div_dec = 100;
        break;
    case 3:
        div_dec = 1000;
        break;
    case 4:
        div_dec = 10000;
        break;
    case 5:
        div_dec = 100000;
        break;
    case 6:
        div_dec = 1000000;
        break;
    }
}

```



```

    }
    set = set_int/div_dec;
    if(flag_tension){
        if(set>=0 && set<=50){
            set_tension = set;
        }else{
            flag_set = 1;
            Lcd_4bit_Wr(0x01,0); //borrar pantalla LCD
            Lcd_4bit_Wr(0x06,0); //desplaza cursor a la derecha con cada caracter

            Lcd_4bit_Wr(0x80,0); //primer caracter fila 1 columna 1
            pM = (char *)mensaje7; //puntero toma dirección del mensaje con definicon
            for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
                Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
                pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
            }
            Lcd_4bit_Wr(0xC0,0); //primer caracter fila 1 columna 1
            pM = (char *)mensaje8; //puntero toma dirección del mensaje con definicon
            for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
                Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
                pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
            }
            Delay(100000);
        }
    }

    if(flag_corriente){
        if(set>=0 && set<=200){
            set_corriente = set;
        }else{
            flag_set = 1;
            Lcd_4bit_Wr(0x01,0); //borrar pantalla LCD
            Lcd_4bit_Wr(0x06,0); //desplaza cursor a la derecha con cada caracter

            Lcd_4bit_Wr(0x80,0); //primer caracter fila 1 columna 1
            pM = (char *)mensaje7; //puntero toma dirección del mensaje con definicon
            for(i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
                Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
                pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
            }
            Lcd_4bit_Wr(0xC0,0); //primer caracter fila 1 columna 1
            pM = (char *)mensaje8; //puntero toma dirección del mensaje con definicon
            for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
                Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
                pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
            }
            Delay(100000);
        }
    }

```



```
}
}
```

```
//funcion para traducir lectura ADC sel sensor de tension
void convertir_valor_tension (void){
    puntero_V=0;
    bandera_ADC_V=0; //aclara bandera
    f_ADC = sum_VA;
    f_ADC1 = f_ADC/BUF_SIZE;
    dato_ADC = f_ADC1*50/1024; //ajuste resultado (1LSb = 0.001132V), escalado por 10000
    sen_tension = dato_ADC ;
    deltaV_ADC=dato_antV_ADC-dato_ADC;
    if(deltaV_ADC < 0.3 && deltaV_ADC > -0.3){dato_ADC=dato_antV_ADC;}
    dato_antV_ADC = dato_ADC;
    if(dato_ADC<0.49){dato_ADC=0;}
    entero_ADC = dato_ADC ;

    if(dato_ADC >= 1000){
        // deberia haver estallado esta m.....
    }
    if(dato_ADC >= 0 && entero_ADC <1000){
        cenE = entero_ADC/100;
        decE =(entero_ADC-cenE*100)/10;
        uniE = entero_ADC-(cenE*100)-(decE*10);
        act_lcd[0]=cenE;
        act_lcd[1]=decE;
        act_lcd[2]=uniE;
        act_lcd[3]=0x2E;

        dat_PE = cenE*100 + decE*10 + uniE;
        dat_PF = (dato_ADC-dat_PE)*1000;

        cenF = dat_PF/100;
        decF =(dat_PF-cenF*100)/10;
        uniF = dat_PF-cenF*100-decF*10;
        act_lcd[4]=cenF;
        act_lcd[5]=decF;
        act_lcd[6]=uniF;
    }
    if(flag_lcd_sen == 0){
        flag_lcd_sen = 1;
        Lcd_4bit_Wr(0x01,0); //borrar pantalla LCD
        Lcd_4bit_Wr(0x06,0); //desplaza cursor a la derecha con cada caracter
        Lcd_4bit_Wr(0x80,0); //primer caracter fila 1 columna 1

        pM = (char *)mensajeV; //puntero toma dirección del mensaje con definicon
        for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
```




```

if(dato_ADC<0.09){dato_ADC=0;}
entero_ADC = dato_ADC ;

if(dato_ADC >= 1000){
    // deberia haver estallado esta m.....
}
if(dato_ADC >= 0 && entero_ADC <1000){
    cenE = entero_ADC/100;
    decE =(entero_ADC-cenE*100)/10;
    uniE = entero_ADC-(cenE*100)-(decE*10);
    act_lcd[0]=cenE;
    act_lcd[1]=decE;
    act_lcd[2]=uniE;
    act_lcd[3]=0x2E;

    dat_PE = cenE*100 + decE*10 + uniE;
    dat_PF = (dato_ADC-dat_PE)*1000;

    cenF = dat_PF/100;
    decF =(dat_PF-cenF*100)/10;
    uniF = dat_PF-cenF*100-decF*10;
    act_lcd[4]=cenF;
    act_lcd[5]=decF;
    act_lcd[6]=uniF;

}

if(flag_lcd_sen == 0){
    flag_lcd_sen = 1;
    Lcd_4bit_Wr(0x01,0); //borrar pantalla LCD
    Lcd_4bit_Wr(0x06,0); //desplaza cursor a la derecha con cada caracter
    Lcd_4bit_Wr(0x80,0); //primer caracter fila 1 columna 1

    pM = (char *)mensajeV; //puntero toma dirección del mensaje con definicon
    for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
        Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
        pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
    }
    Lcd_4bit_Wr(0xC0,0); //primer caracter fila 1 columna 1
    pM = (char *)mensajeC2; //puntero toma dirección del mensaje con definicon
    for (i=0;i<=15;i++){ //ciclo para imprimir 10 caracteres del mensaje
        Lcd_4bit_Wr(*pM,1); //envia caracter al LCD
        pM++; //incrementa puntero al arreglo del mensaje
    }
}
flag_act = 0;
pos_cur = 0xC9;
for(i=0;i<=6;i++){
    
```



```

if(pos_cur < 0xCE){
    if(act_lcd[i] != 0 || i>1){flag_act = 1;}
    if(flag_act ==1 && act_lcd[i] != 0x2E){
        Lcd_4bit_Wr(pos_cur++,0); //prepare para enviar centesimas de temperatura
        Lcd_4bit_Wr(act_lcd[i]+0x30,1); //envia las centesimas de temperatura
    }
    if( act_lcd[i] == 0x2E && pos_cur == 0x8D){
        Lcd_4bit_Wr(pos_cur++,0); //prepare para enviar centesimas de temperatura
        Lcd_4bit_Wr(0x30,1); //envia las centesimas de temperatura
    }
    if(act_lcd[i] == 0x2E){
        Lcd_4bit_Wr(pos_cur++,0); //prepare para enviar centesimas de temperatura
        Lcd_4bit_Wr(act_lcd[i],1); //envia las centesimas de temperatura
    }
}
}
}
}

```

/*funcion para leer teclado */

```
void teclado (void){
```

```
    columna=PTFD & 0x33; //capture el valor de la columna
```

```
    if(PTGD_PTGD0==0 & columna==0x32){ //si detecto la fila 1 y la columna 1
        tecla=1; //marque tecla 1
    }

```

```
    if(PTGD_PTGD0==0 & columna==0x31){ //si detecto la fila 1 y la columna 2
        tecla=2; //marque tecla 2
    }

```

```
    if(PTGD_PTGD0==0 & columna==0x23){ //si detecto la fila 1 y la columna 3
        tecla=3; //marque tecla 3
    }

```

```
    if(PTGD_PTGD0==0 & columna==0x13){ //si detecto la fila 1 y la columna 3
        tecla = 0xA9; //marque tecla A
    }
}

```

```
    if(PTGD_PTGD1==0 & columna==0x32){ //si detecto la fila 2 y la columna 1
        tecla=4; //marque tecla 4
    }

```

```
    if(PTGD_PTGD1==0 & columna==0x31){ //si detecto la fila 2 y la columna 2
        tecla=5; //marque tecla 5
    }

```

```
    if(PTGD_PTGD1==0 & columna==0x23){ //si detecto la fila 2 y la columna 3
        tecla=6; //marque tecla 6
    }
}

```

```
    if(PTGD_PTGD1==0 & columna==0x13){ //si detecto la fila 2 y la columna 3

```



```

    tecla = 0x7F; //marque tecla B
}

if(PTGD_PTGD2==0 & columna==0x32){ //si detecto la fila 3 y la columna 1
    tecla=7; //marque tecla 7
}
if(PTGD_PTGD2==0 & columna==0x31){ //si detecto la fila 3 y la columna 2
    tecla=8; //marque tecla 8
}
if(PTGD_PTGD2==0 & columna==0x23){ //si detecto la fila 3 y la columna 3
    tecla=9; //marque tecla 9
}
if(PTGD_PTGD2==0 & columna==0x13){ //si detecto la fila 3 y la columna 3
    tecla = 0x43; //marque tecla C
}

if(PTGD_PTGD3==0 & columna==0x32){ //si detecto la fila 4 y la columna 2
    tecla = 0x2E; //marque tecla punto
}
if(PTGD_PTGD3==0 & columna==0x31){ //si detecto la fila 4 y la columna 2
    tecla = 0; //marque tecla 0
}
if(PTGD_PTGD3==0 & columna==0x23){ //si detecto la fila 4 y la columna 2
    tecla = 0x23; //marque tecla #
}
if(PTGD_PTGD3==0 & columna==0x13){ //si detecto la fila 3 y la columna 3
    tecla = 0x44; //marque tecla D
    cont_set++;
    if(cont_set >=3){flag_set = 1;}
}
bandera=1; //pone bandera de tecla presionada
}

////////////////////////////////////
//////////////////// KBI_ deteccion de cruce por cero //////////////////////
////////////////////////////////////

/* Funcion de atencion a la interrupcion del KBI1 */
interrupt VectorNumber_Vkeyboard void ISR_KBI (void){
/* Write your interrupt code here ... */
if(PTBD_PTBD4 == 1 && PTGD_PTGD5 == 1){ flag_sec_pos = 1;flag_sec_neg = 0;} // pulso de FASE A y FASE
C solapados
if(PTBD_PTBD4 == 1 && PTGD_PTGD4 == 1){ flag_sec_neg = 1;flag_sec_pos = 0;} // pulso de FASE A y FASE
B solapados
cont_FA = 0;

```



```
if(cont_KBI >= 3){  
    RTCMOD = 130; // 0 = 220  
    RTCSC = 0xD9;  
    cont_KBI = 2;  
}  
cont_KBI++;  
KBISC_KBF = 0;  
KBISC_KBACK = 1; // Clear the KBI interrupt flag  
}
```

```
////////////////////////////////////////////////////////////////  
////////////////////////////////////////////////////////////////          ADC          //  
////////////////////////////////////////////////////////////////  
////////////////////////////////////////////////////////////////
```

```
/* Funcion de atencion a la interrupcion del ADC canal 0 */  
interrupt VectorNumber_Vadc void ISR_ADC (void){  
    //PTBD_PTBD2 ^= 1;  
    if(canal == 0x60){  
        puntero_V++;  
        dat_ADC=ADCR;  
        sum_V += dat_ADC;  
        ADCSC1 = 0x61;  
        canal = 0x61;  
        ADCSC1_COCCO = 0;  
        if(puntero_V>=BUF_SIZE){  
            //PTBD_PTBD2 ^= 1;  
            bandera_ADC_V=1;  
            puntero_V=0;  
            sum_VA = sum_V;  
            sum_V = 0;  
        }  
    }  
    }else{  
        if(canal == 0x61){  
            puntero_C++;  
            dat_ADC=ADCR;  
            sum_C += dat_ADC;  
            ADCSC1 = 0x60;  
            canal = 0x60;  
            ADCSC1_COCCO = 0;  
            if(puntero_C>=BUF_SIZE){  
                bandera_ADC_C=1;  
                puntero_C=0;  
                sum_CA = sum_C;  
                sum_C = 0;  
            }  
        }  
    }  
}  
}
```



```

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////          TPM1          //////////////////////////////////
////////////////////////////////////
    
```

```

void interrupt VectorNumber_Vtpm1ch5 TPM1_ISR(void) {
/* Write your interrupt code here ... */
TPM1C5SC_CH5F;    /* Clear TPWM flags */
TPM1C5SC_CH5F = 0; /* Two-step flag acknowledgement */
cont_FA++;
cont_FBFC++;
if(flag_sec_pos == 1 && cont_FA <= 12 && cont_FBFC <= 12 && flag_setcero ==0){

    cont ++;
    if(cont == 1){ PTDD_PTDD0 = 0; PTCD_PTCD2 = 1;} else{
    if(cont == 2){ PTCD_PTCD5 = 0; PTCD_PTCD3 = 1;}else{
    if(cont == 3){ PTCD_PTCD2 = 0; PTDD_PTDD1 = 1;}else{
    if(cont == 4){ PTCD_PTCD3 = 0; PTCD_PTCD4 = 1;}else{
    if(cont == 5){ PTDD_PTDD1 = 0; PTDD_PTDD0 = 1;}else{
    if(cont == 6){ PTCD_PTCD4 = 0; PTCD_PTCD5 = 1; cont = 0;}
    }
    }
    }
    }
    }
    flag_faul =0;
}
else{
    if(flag_sec_neg == 1 && cont_FA <= 12 && cont_FBFC <= 12 && flag_setcero ==0){

    cont ++;
    if(cont == 1){ PTDD_PTDD1 = 0; PTCD_PTCD2 = 1;} else{
    if(cont == 2){ PTCD_PTCD3 = 0; PTCD_PTCD5 = 1;}else{
    if(cont == 3){ PTCD_PTCD2 = 0; PTDD_PTDD0 = 1;}else{
    if(cont == 4){ PTCD_PTCD5 = 0; PTCD_PTCD4 = 1;}else{
    if(cont == 5){ PTDD_PTDD0 = 0; PTDD_PTDD1 = 1;}else{
    if(cont == 6){ PTCD_PTCD4 = 0; PTCD_PTCD3 = 1; cont = 0;}
    }
    }
    }
    }
    }
    flag_faul =0;
}
else{
    if(flag_setcero == 1){
        PTDD_PTDD0 = 0; PTDD_PTDD1 = 0;
    }
}
}
    
```



```

PTCD_PTCD2 = 0; PTCD_PTCD3 = 0;
PTCD_PTCD4 = 0; PTCD_PTCD5 = 0;
}else{
PTDD_PTDD0 = 0; PTDD_PTDD1 = 0;
PTCD_PTCD2 = 0; PTCD_PTCD3 = 0;
PTCD_PTCD4 = 0; PTCD_PTCD5 = 0;
flag_faul = 1;
}
}
}
}
////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// RTC retardo para activar PWM (disparo de Triac) ///////////////////////////////////
////////////////////////////////////

void interrupt VectorNumber_Vrtc RTC_ISR(void) {
/* Write your interrupt code here ... */
if(flag_RTC){
flag_RTC = 0;
TPM1SC = 0x0F;
TPM1CNT = 0;
cont = 0;
contp++;
RTCMOD = 0x00; // n*61.035u
RTCSC = 0x00;
RTCSC = RTCSC | 0x80; // Clear the RTC flag //
}else{
if(flag_RTC==0){
flag_RTC = 1;
RTCMOD = grados; // 0 = 220
RTCSC = 0xD8;
RTCSC = RTCSC | 0x80; // Clear the RTC flag //
}
}
}
}
}

```