CONTROL DE CARGA PARA MICROCENTRALES

GERMAN ORIEL DELGADO RINCÓN
Código 92908

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA DE FÍSICO-MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA 2005

CONTROL DE CARGA PARA MICROCENTRALES

GERMAN ORIEL DELGADO RINCÓN
Código 92908

Presentado a

JOSE GABRIEL PLATA CORDERO
I.E., M.Sc.

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al titulo de
MAESTRIA EN POTENCIA ELÈCTRICA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA DE FÍSICO-MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA 2005

Quiero dedicar esta tesis, a mi esposa **CLAUDIA PATRICIA CARREÑO O** y mi hijo **GERMAN EDUARDO DELGADO CARREÑO** quienes con su amor y constancia contribuyeron a la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCION 10
1. CLASES DE REGULADORES PARA MICROCENTRALES 11
1.1 REGULADOR DE FLUJO. 12
1.1.1 Regulador de Flujo Mecánico 13
1.1.2 Regulador de Flujo con Compensación Primaria 16
1.1.3 Regulador de Flujo con Compensación Secundaria 16
1.1.4 Regulador Mecánico de Carga 17
1.2 REGULADOR DE CARGA 17
1.2.1 Regulador Electrónico Básico de Carga 19
1.3 REGULADOR DE VOLTAJE. 20
1.3.1 Regulador de Placas de Carbón 20
1.3.2 Regulador Mecánico Rápido 22
1.3.3 Regulador de Sectores Rodantes 23
1.3.4 Regulador de Voltaje Electronico 24
2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE Y SOFTWARE 25
2.1 DISEÑO DE HARDWARE. 25
2.1.1 Transductores 25
2.1.2 Transformadores de Corriente 27
2.1.3 Tarjeta de SCR'S 28
2.1.4 Tarjeta de Control 29
2.1.5 Tarjetas de Circuito Impreso. 38
2.2 DISEÑO DEL SOFTWARE. 40
2.2.1 Algoritmo Principal 41
2.2.2 Subrutinas e Interrupciones 43
2.2.3 Subrutina ADCSETUP 44
2.2.4 código del programa 54
3. CONEXIONADO Y PUESTA EN MARCHA DEL REGULADOR 66
3.1 CARACTERISTICAS DEL GENERADOR Y PRIMOTOR. 66
3.2 CONEXIONADO DEL GENERADOR Y PRIMOTOR. 66
3.3 CONEXIONADO DEL REGULADOR DE CARGA 66
3.4 PUESTA EN MARCHA GENERADOR Y REGULADOR. 67
4. PRUEBAS DE LABORATORIO 68
5. CONCLUSIONES 79
BIBLIOGRAFIA 81

LISTA DE GRAFICAS

Pág.

Figura 1. Desempeño de un generador con gobernador y sin gobernador.....11
Figura 2. Comportamiento del regulador 13
Figura 3. Regulador de masas giratorias 13
Figura 4. Regulador de flujo.....15
Figura 5. Regulador de carga. 18
Figura 6. Regulador básico de carga. 19
Figura 7. Regulador de placas de carbón. 21
Figura 8. Regulador mecánico rápido. 22
Figura 9. Regulador de sectores rodantes 23
Figura 10. Regulador de voltaje electrónico. 24
Figura 11. Sistema de control general. 25
Figura 12. Conexión monofásica del transductor. 26
Figura 13 Conexión Trifásica del transductor.....27
Figura 14. Transformador de corriente modificado. 28
Figura 15. Circuito de Potencia de los SCRs. 29
Figura 16. Esquema de la tarjeta de control. 30
Figura 17. Circuito Detector de cruce por cero. 31
Figura 18. Señal de detección de cruce por cero.....31
Figura 19. Circuito de disparo de los SCRs. 32
Figura 20. Fuente de alimentación.....33
Figura 21. Mòdulo TIM. 34
Figura 22. Modulo ADC. 35
Figura 23. Modulo KBI. 36
Figura 24. Mapa de memoria. 37
Figura 25. Montaje del Microcontrolador. 38
Figura 26. Algoritmo Principal. 42
Figura 27. Subrutina ADCSetup.....44
Figura 28. Vector ADICLK. 44
Figura 29. Vector ADSCR. 45
Figura 30. Vector ADR. 47
Figura 31. Algoritmo de interrupciòn por fin de ADC. 47
Figura 32. Algoritmo Modulo KBI. 48
Figura 33. Vector KBSCR 48
Figura 34. Vector KBIER. 49
Figura 35. Algoritmo interrupción por detección de flanco descendente. 49
Figura 36. Algoritmo ajuste del Angulo. 50
Figura 37. Algoritmo Modulo TIM. 51
Figura 38. Vector TSC. 51
Figura 39. Vectores TMODH y TMODL 52

Figura 40. Vectores TCNTH y TCNTL. 53
Figura 41. Algoritmo interrupción por desbordamiento de TIM. 53
Figura 42. Conexionado del generador. 66
Figura 43. Conexionado del regulador. 67
Figura 44. Mediciones en el laboratorio. 68
Figura 45. Oscilograma tensión de balasto para Ib = 26.7Arms Ic = 0 Arms 69
Figura 46. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 26.7Arms Ic = 0Arms. 69
Figura 47. Oscilograma tensión de balasto para Ib= 25.3Arms Ic = 3.2Arms. 70
Figura 48. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 25.3Arms Ic = 3.2Arms. 70
Figura 49. Oscilograma tensión de balasto para Ib= 23.7Arms Ic = 5.9Arms. 71
Figura 50. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 23.7Arms Ic = 5.9Arms. 71
Figura 51. Oscilograma tensión de balasto para Ib = 20.3Arms Ic = 9.0Arms. 72
Figura 52. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 20.3Arms Ic = 9.0Arms. 72
Figura 53. Oscilograma tensión de balasto para Ib = 16.6Arms Ic = 12.1Arms. ...73
Figura 54. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 16.6Arms Ic = 12.1Arms. ...73
Figura 55. Oscilograma tensión de balasto para Ib= 12.9Arms Ic = 15.1Arms. 74
Figura 56. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 12.9Arms Ic = 15.1Arms. ...74
Figura 57. Oscilograma tensión de balasto para Ib= 8.4Arms Ic= 18.1Arms. 75
Figura 58. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 8.4Arms Ic= 18.1Arms. 75
Figura 59. Oscilograma tensión de balasto para Ib= 5.2Arms Ic= 21.2Arms. 76
Figura 60. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 5.2Arms Ic= 21.2Arms. 76
Figura 61. Oscilograma tensión de balasto para Ib = 3.8Arms Ic= 24.2Arms. 77
Figura 62. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 3.8Arms Ic= 24.2Arms. 77
Figura 63. Oscilograma tensión de balasto para Ib= 3.1Arms Ic= 26.3Arms. 78
Figura 64. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 3.1Arms Ic= 26.3Arms. 78

TÍTULO CONTROL DE CARGA PARA MICROCENTRALES[*]

AUTORES: Jose Gabriel Plata Cordero. Ing. Electricista Msc.
German Oriel Delgado Rincón Ing. Electricista Msc[**]

PALABRAS CLAVES: Control de carga, microcentrales, control por ángulo de fase, microcontrolador.

RESUMEN

La regulación de carga en una pequeña Central de Generación consiste en mantener constante la potencia de salida del generador, sin importar los cambios de la demanda de potencia del usuario. Este proceso se logra con un regulador de carga electrónico, motivo de la presente tesis de grado, el cual evalúa la diferencia de potencia existente entre el generador y el usuario y con este valor excedente de potencia se disipa en un balasto de resistencias, obteniéndose un equilibrio de potencia y como consecuencia la estabilidad en la frecuencia y el voltaje para el usuario final.
El control electrónico se diseño y construyó con el microcontrolador MOTOROLA 68HC908JL3, dadas las facilidades para el manejo de las entradas provenientes de los transductores de potencia y las salidas para el disparo de los SCRs, permiten que en la etapa de potencia se realice el control por ángulo de fase para el disparo de los SCRs y de esta manera se tenga el manejo de la tensión aplicada al balasto de resistencias.
Los resultados obtenidos en cuanto al manejo de la potencia excedente, desempeño del control y la estabilidad obtenida para el voltaje y la frecuencia, permiten utilizar este tipo de regulador en beneficio de las comunidades aisladas del territorio nacional en las que las condiciones económicas y geográficas hacen imposible el acceso a este servicio público.

---

[*] Trabajo de Grado.

[**] Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones/Maestría en Potencia Eléctrica. Director: José Gabriel Plata Cordero.

TITLE CONTROL OF LOAD FOR MICROCENTRALS[*]

AUTHORS: José Gabriel Plata Cordero. Engineer Electrical Msc.
German Oriel Delgado Rincón. Engineer Electrical Msc[**]

KEY WORDS: Load control, microcentrals, control for phase angle, microcontroller.

ABSTRACT

The of load regulation in a small Power Station of Generation consists of maintaining constant the power at the outset of the generator, without importing the changes of the demand of power of the user. This process is achieved with a regulator of electronic load, motive of the present thesis of degree, which evaluates the difference of existing power between the generator and the user and with this surplus value of power is dissipated in a ballast of resistances, being obtained an equilibrium of power and as consequence the stability in the frequency and the voltage for the end user.

The electronic control itself design and built with the microcontrolador MOTOROLA 68HC908JL3, given the facilities for the management of the inputs originating from the transducers of power and the outputs the shot of the SCR's, they permit that in the phase of power the control by angle of phase for the shot of the SCR's be carried out and in this manner have the management of the tension applied al ballast of resistances.

The results obtained as soon as al management of the surplus power, performance of the control and the stability obtained for the voltage and the frequency, they permit to utilize this type of regulator for the benefit of the isolated communities the national territory in which the geographical and economic conditions do impossible the access to this public service.

---

[*] Work of Degree

[**] Ability of Ingenierias Fisicomecanicas. School of Electronic, Electric and of Telecomunications/Master in electric power. Director: José Gabriel Plata Cordero.

INTRODUCCION

El servicio de energía eléctrica en Santander esta cubierto en un 90% en el sector rural, y en un 97% en el sector urbano. El porcentaje no cubierto presenta altos costos de inversión en redes de media tensión y problemas de infraestructura vial para su acceso. Estos inconvenientes son un reflejo de la problemática general del país.

La presente tesis de grado tiene como fin el diseño y construcción de un regulador de carga aplicable a una microcentral y que cumpla con los requerimientos mínimos para suplir de energía a comunidades aisladas.

El regulador de carga se implemento con el uso de un microcontrolador Motorola y con la obtención de datos a partir de transductores de potencia, logrando un buen desempeño de las entradas y salidas del sistema.

El programa de control se realizo teniendo en cuenta aspectos relacionados con el uso de rutinas de interrupción y aplicaciones especificas del microcontrolador.
El equipo construido es sencillo de conectar y ensamblado en una caja robusta que permite su revisión y medición de parámetros de entrada y salida.

El informe presenta inicialmente una visión general de los tipos de reguladores existentes para microcentrales, como también se hace la descripción de su funcionamiento. En el capítulo segundo se muestran el hardware y software diseñados para el funcionamiento del regulador de carga, incluyendo transductores de potencia, microcontrolador, circuito de disparo, puente de tiristores y el respectivo programa de control. El capitulo tercero se presenta el procedimiento de conexión de los equipos y el procedimiento de arranque. En el capitulo cuarto se dan las conclusiones del proyecto.

1. CLASES DE REGULADORES PARA MICROCENTRALES

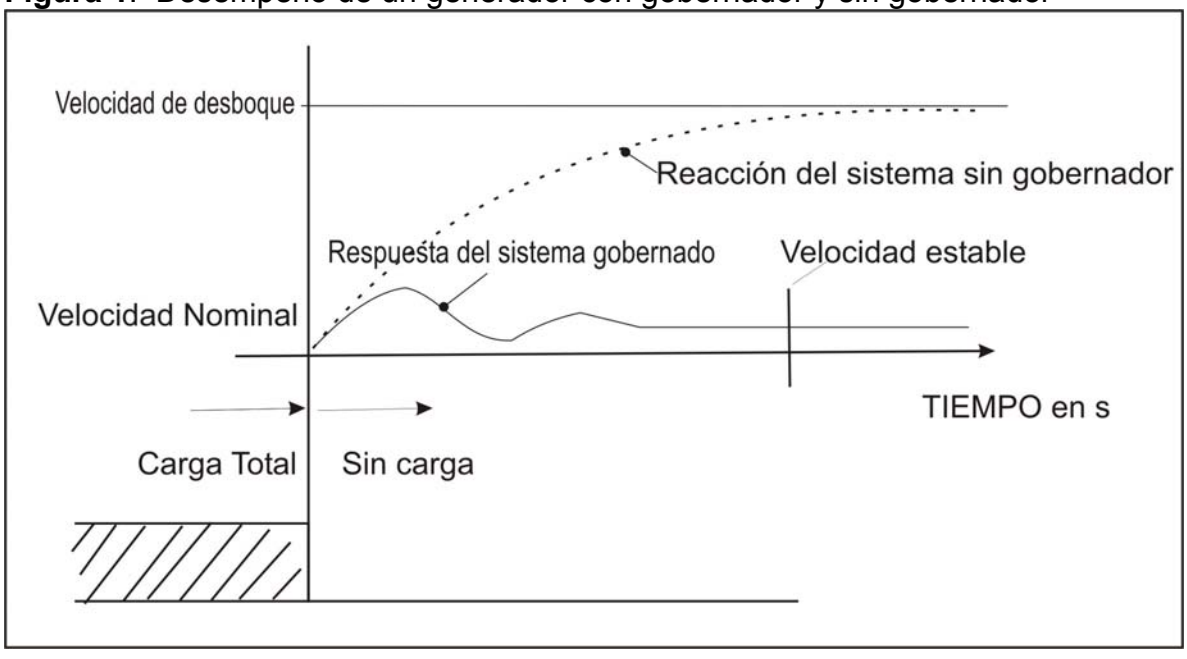
Regulación es la adaptación de un sistema a condiciones específicas de operación, si un esquema de microcentral se opera sin gobernador en conexión aislada, su velocidad es estable para carga nominal. Decrementar carga significa incrementar velocidad. Para cada carga constante, el sistema se estabilizaría por si solo para cada velocidad. Esta velocidad depende en el desempeño de la turbina, el generador asi como de los consumidores. La velocidad para cargas muy pequeñas, es cercana a la velocidad de desboque de la turbina. Las consecuencias de esto son:

La turbina y el generador así como los mecanismos no trabajan propiamente o pueden ser dañados debido a las excesivas fuerzas centrifugas o sobrevoltaje.

El voltaje y la frecuencia están relacionados a la velocidad de la turbina. Sin embargo la mayoría de los electrodomésticos y equipos instalados por los usuarios necesitan de velocidad y frecuencia constantes para su operación normal.

La figura 1 muestra el comportamiento carga-velocidad típico de un sistema de microcentral con gobernador y sin gobernador.

Figura 1. Desempeño de un generador con gobernador y sin gobernador



Una microcentral funciona en operación aislada si la planta entrega energía a usuarios independientes de la interconexión local. La potencia de salida de la planta debe por lo tanto ser mayor que la potencia demandada por todos los usuarios conectados simultaneamente , en orden a evitar condiciones de sobrecarga.

1.1 REGULADOR DE FLUJO.

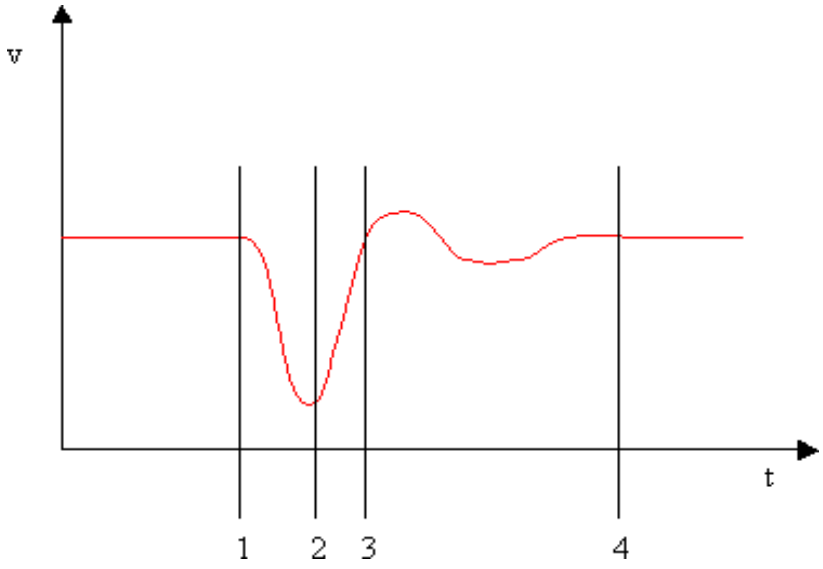
La ventaja del control de flujo es la economía en el agua que se usa. El agua salvada puede ser usada para cubrir picos de carga si se almacena en un tanque o represa. La salida diseñada del esquema debe ser mayor que la descarga permanente del río dependiendo de la curva de carga del consumidor.

Se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Una desventaja es una mayor demanda del diseño del esquema y en consecuencia mayores costos de inversión.
- La regulación de flujo es un proceso dinámico muy sensitivo.
- Muchos parámetros de la planta y los consumidores se deben considerar cuidadosamente.

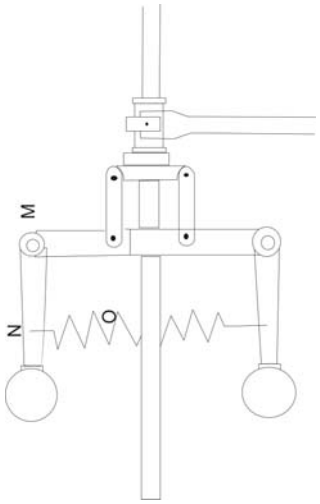
También, hoy día se han desarrollado reguladores que permiten regular velocidades mayores gracias a los nuevos mecanismos de conexión entre el regulador y el control de la máquina. El principio es el mismo: una vez que acontece un cambio de velocidad (punto 1 de la figura 2), el regulador intentará alcanzar el punto de diseño (punto 2), llamado set point. Lo normal es que existan unas oscilaciones en la búsqueda de este punto, es decir, si aumenta la carga, a velocidad decrece. El regulador aumenta la potencia del acelerador para alcanzar el set point. Una vez que llegue a este, el mecanismo no se detendrá de forma instantánea (punto 3), de forma que superara la velocidad deseada. Por el propio mecanismo, una vez superado este punto optimo reduciendo la apertura del acelerador. Así seguira oscilando hasta que se alcance el equilibrio (punto 4). Se puede apreciar una curva típica de este fenómeno.

Figura 2. Comportamiento del regulador



1.1.1 Regulador de Flujo Mecánico. El proceso de regulación en las microcentrales tiene varias formas de ajustar la velocidad. El dispositivo que inicialmente trabajo en función de regular la velocidad es el regulador de masas giratorias el cual se muestra en la figura 3.

Figura 3. Regulador de masas giratorias



La función del regulador de velocidad es mantener un control constante sobre la apertura o cierre de los alabes móviles de la turbina cuando se presentan variaciones de carga y por consiguiente cambios de velocidad.

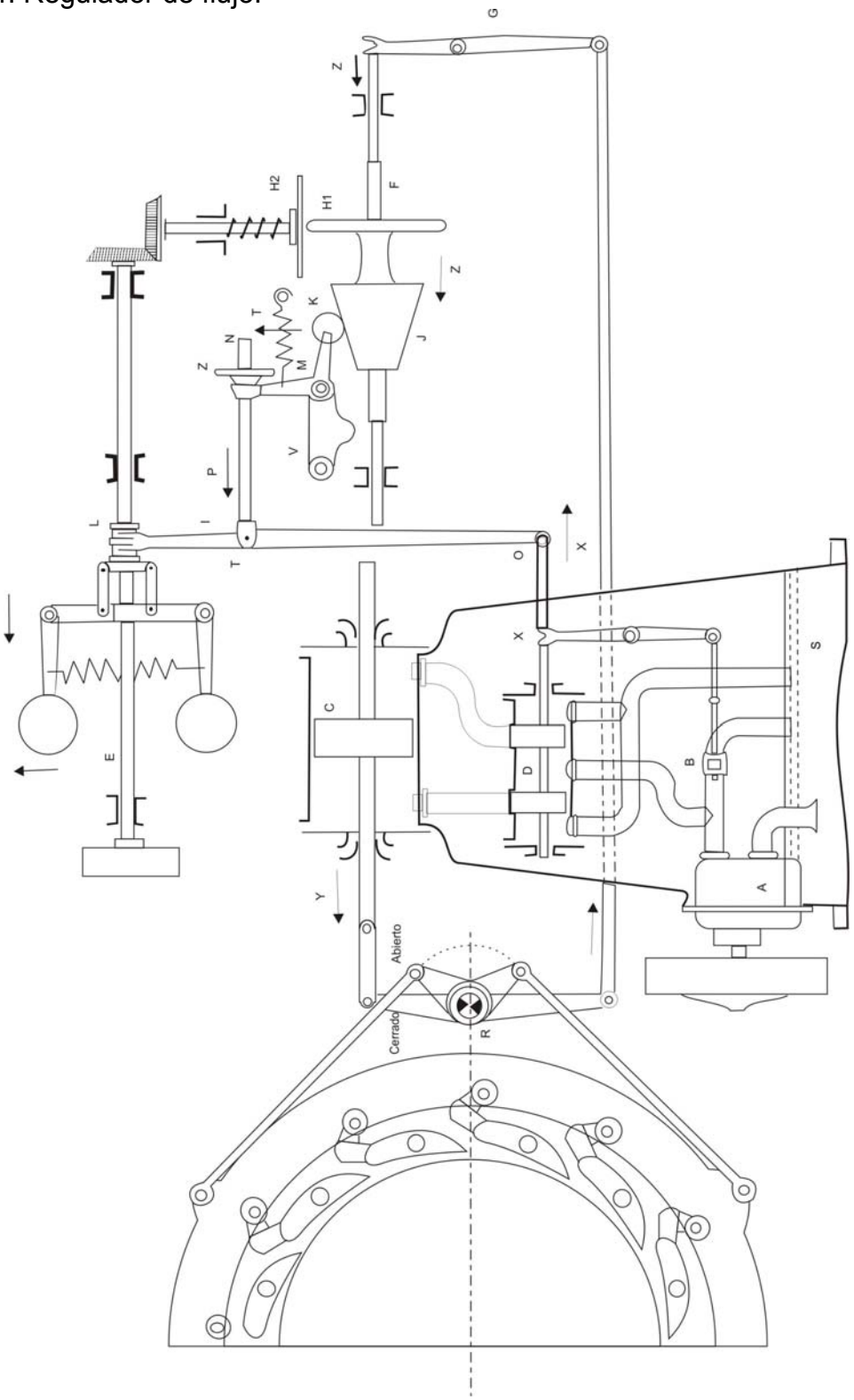
El principio de operación del regulador de velocidad es el de un sistema hidráulico que utiliza aceite bajo presión. A continuación se describe el funcionamiento del regulador.

Como se muestra en la figura 4, el eje del regulador "R" está conectado a los álabes móviles de la turbina; el péndulo "E" y la bomba "A", están respectivamente conectados por correas al eje de la turbina.

Cuando la salida de la turbina corresponde a la potencia para la cual el regulador ha sido graduado, el casquillo del péndulo "L", la válvula de distribución "D", el enlace "O", y el mecanismo del relé "FJKMT" están en su posición central (Posición de equilibrio).

Si se presenta un incremento de la velocidad de la turbina (Reducción de carga), las bolas del péndulo se separan y mueven el casquillo "L" hacia la izquierda, el enlace "O" se mueve en sentido contrario, hacia la derecha, dando paso al aceite a presión de la bomba al servomotor "C" a través de la válvula de distribución "D", el émbolo del servomotor "C" se desplaza hacia la izquierda cerrando parcialmente los álabes móviles de la turbina.

Figura 4. Regulador de flujo.



1.1.2 Regulador de Flujo con Compensación Primaria. La compensación es una operación del regulador mecánico que evita que éste cierre o abra el control del agua de la turbina más de lo necesario al restablecer el equilibrio entre la carga y la salida de la turbina.

La compensación primaria tiene la función de detener el movimiento del servomotor que fue accionado por el péndulo. Esta acción de retraso es necesaria debido a la inercia del agua y de las partes rotatorias; un tiempo para retardar o acelerar el flujo del agua permite a la turbina acomodarse a su nueva carga.

Tan pronto como el eje "R" del regulador actúa, empuja el relé "FJKMT", que esta conectado por medio de palancas y enlaces. Sobre el vástago "F" se encuentra un cono "J"; en la palanca "M", que está conectada al brazo del péndulo "OTL", actúa sobre el punto "T" que se mueve hacia la izquierda y regresa el punto "O" a su posición central, cerrándose la válvula de distribución "D" y el servomotor cesa de moverse, se obtiene nuevamente equilibrio entre la carga de la turbina y la nueva abertura de entrada, pero con un aumento en la velocidad de la unidad.

1.1.3 Regulador de Flujo con Compensación Secundaria. Cuando la turbina impulsa el generador eléctrico, es necesario que mantenga la velocidad constante para todas las cargas; para este propósito el regulador está provisto de un dispositivo de velocidad constante o compensación secundaria, cuyo objetivo es neutralizar el grado de irregularidad.

El cono "J" al no estar rígidamente conectado al eje "F", se mueve independientemente por rotación sobre éste eje. El cono a su vez se acopla a una rueda de fricción "H1"que esta siempre en contacto con un disco de fricción "H2" mediante un resorte "Q". El disco de fricción "H2" está en movimiento al estar conectado al eje del péndulo por medio de engranajes.

En su posición central la rueda de fricción "H1" no puede girar al estar en contacto con el centro del disco "H2", tan pronto como el vástago "F" se mueve, la rueda "H1" se desplaza y empieza a rotar por efecto del disco de fricción "H2" que está en movimiento; la función de rotación continua del disco "H2" es restaurar "H1" a posición central. Este movimiento produce un desplazamiento secundario del cono "J" y del punto de enlace "O", que hace que el regulador cierre un poco más las entradas de la turbina, y produce un grado de irregularidad necesario en la posición del punto "T", para mantener una velocidad constante. La turbina tiene ahora nueva carga pero con la misma velocidad inicial. Si la carga es incrementada la acción es la misma descrita anteriormente pero en dirección contraria.

1.1.4 Regulador Mecánico de Carga. La regulación de la carga aplicada a la red consiste en operar la turbina en forma continua y en el punto óptimo de funcionamiento. El caudal se considera como un parámetro fijo.

Al no existir regulación de caudal, la cantidad de potencia producida es constante y por funcionar en el punto óptimo, es la máxima. Si sucede una disminución de la carga de los usuarios, la turbina tiende a impulsarse. Para evitar este funcionamiento transitorio se debe aumentar la carga eléctrica conectando bancos de resistencias, calentadores de agua, bombas para elevación de agua, hornos de cremación en la planta de tratamiento residual, etc.

Para corregir este inconveniente se puede regular el sistema con base en un regulador de Watt, cuando aumente la velocidad, ascenderán las masas, desplazando verticalmente la corredera. Con este medio se puede activar de forma mecánica (por desplazamiento de una escobilla de conexión) las cargas necesarias para regular la turbina. Se presentara el instante en el que la carga será mayor que el par recibido en la turbina por el paso del agua, debido a esto comenzará el movimiento de retorno típico de las oscilaciones.

Con lo anterior puede realizarse una compensación primaria como la explicada anteriormente. Así la conexión del banco de resistencias u otros elementos no se realizará solamente por medio del avance de la corredera del regulador de Watt, sino que en cuanto existiera un movimiento, comenzaría a actuar directamente otro elemento.

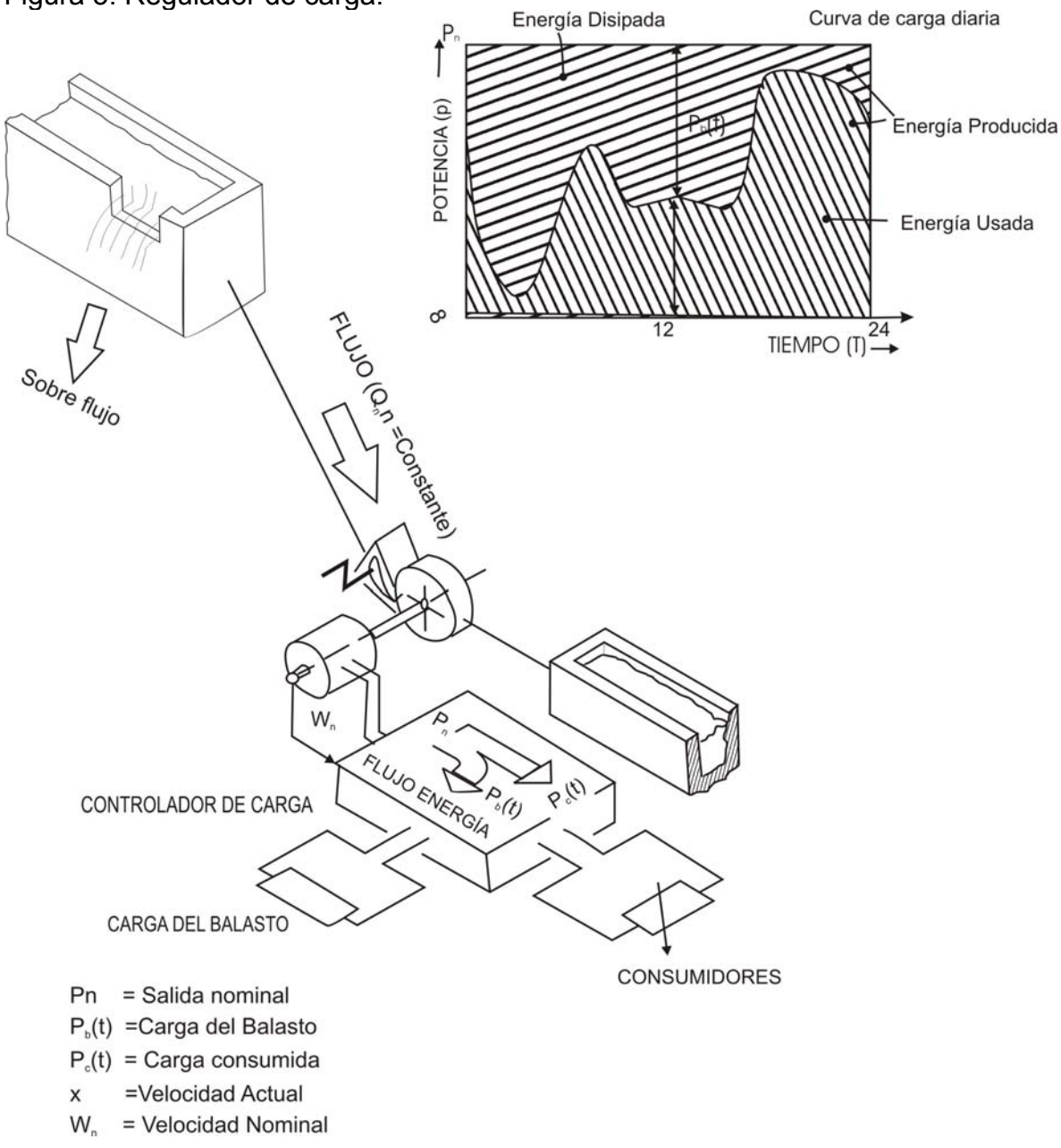
1.2 REGULADOR DE CARGA.

Otro método, motivo de la presente tesis de grado, es tomar la salida de la turbina constante e independiente de la potencia consumida. Un gobernador electrónico microprocesado mantiene la velocidad de la turbina constante desviando el exceso de potencia a un banco de resistores. Este regulador puede reaccionar muy rápido y exacto a los cambios de carga sin modificar las condiciones de operación de la planta en el lado de la turbina.

El diseño del esquema es simple, debido a la dinámica del sistema y del conjunto turbina/generador no tienen influencia en la estabilidad del proceso de regulación. En esquemas de bajo costo, el flujo es ajustado manualmente a menos que el río rápidamente se descargue. Debido a que se puede presentar sobre velocidad en el generador un dispositivo para desconexión de emergencia se requiere para evitar daño en la operación del sistema. La figura 5 muestra el esquema del controlador de carga que aunque reacciona muy rapado, debe tener una rueda libre para permitir el arranque de grandes motores eléctricos.

Otro problema que se presenta es la interferencia electromagnética inducida por el suicheo de tiristores que puede afectar la radio, televisión y computadores instalados en la red.

Figura 5. Regulador de carga.



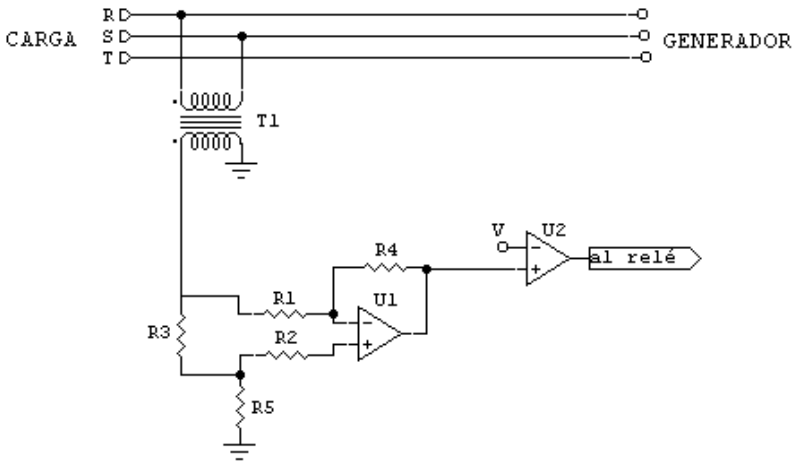
Pn = Salida nominal
$P_b(t)$ =Carga del Balasto
$P_c(t)$ = Carga consumida
x =Velocidad Actual
W_n = Velocidad Nominal

1.2.1 Regulador Electrónico Básico de Carga. El regulador básico de carga es similar al explicado en el numeral 1.1.5 se trata de agregar cargas cuando la demanda de energía de los usuarios disminuye. Se debe realizar de una forma sencilla detectando inicialmente los aumentos en la velocidad del generador que se traducen en sobretensiones. Se instalan transformadores de tensión a la salida del generador. Cuando existe un aumento de tensión, se refleja en el secundario un nivel de voltaje pequeño, y se compara en una etapa diferencial realizada con amplificadores operacionales. La salida de este se compara con un nivel establecido, por ejemplo 2 voltios. Según sigue aumentando el voltaje a la salida del generador, igualmente aumenta la tensión a la salida de la etapa diferencial, hasta superar el limite establecido. Una vez que esto ocurre, la salida del comparador cambia a alto o bajo según se haya implementado conectando un interruptor (o relé) que se conectará a la red el banco de resistencias asociado, el regulador se puede apreciar en la figura 6.

Con la misma señal del transformador se alimenta el resto de etapas comparadoras, que se han escalonado convenientemente. Así si la tensión continúa subiendo, se irán conectando sucesivamente más cargas hasta que se estabilice.

Puede ser conveniente dotar al sistema de un ciclo de histeresis con un tiempo de ciclo apropiado, con el fin de que si se produce una oscilación en torno a un punto de voltaje que hace conectar y desconectar continuamente el relé, se pueda evitar su deterioro, prolongando unos segundos el encendido y apagado.

Figura 6. Regulador básico de carga.



REGULADOR ELECTRONICO
BASICO DE CARGA.

1.3 REGULADOR DE VOLTAJE.

La principal exigencia que debe cumplir un generador sincrónico en una central, es la de mantener la frecuencia y la magnitud del voltaje generado constantes, sin importar las variaciones que presenten las cargas conectadas.

En sistemas interconectados se cumple esta condición, debido a que el comportamiento aproximado de éstos, en cualquier punto de alimentación, es el de “barraje infinito”.

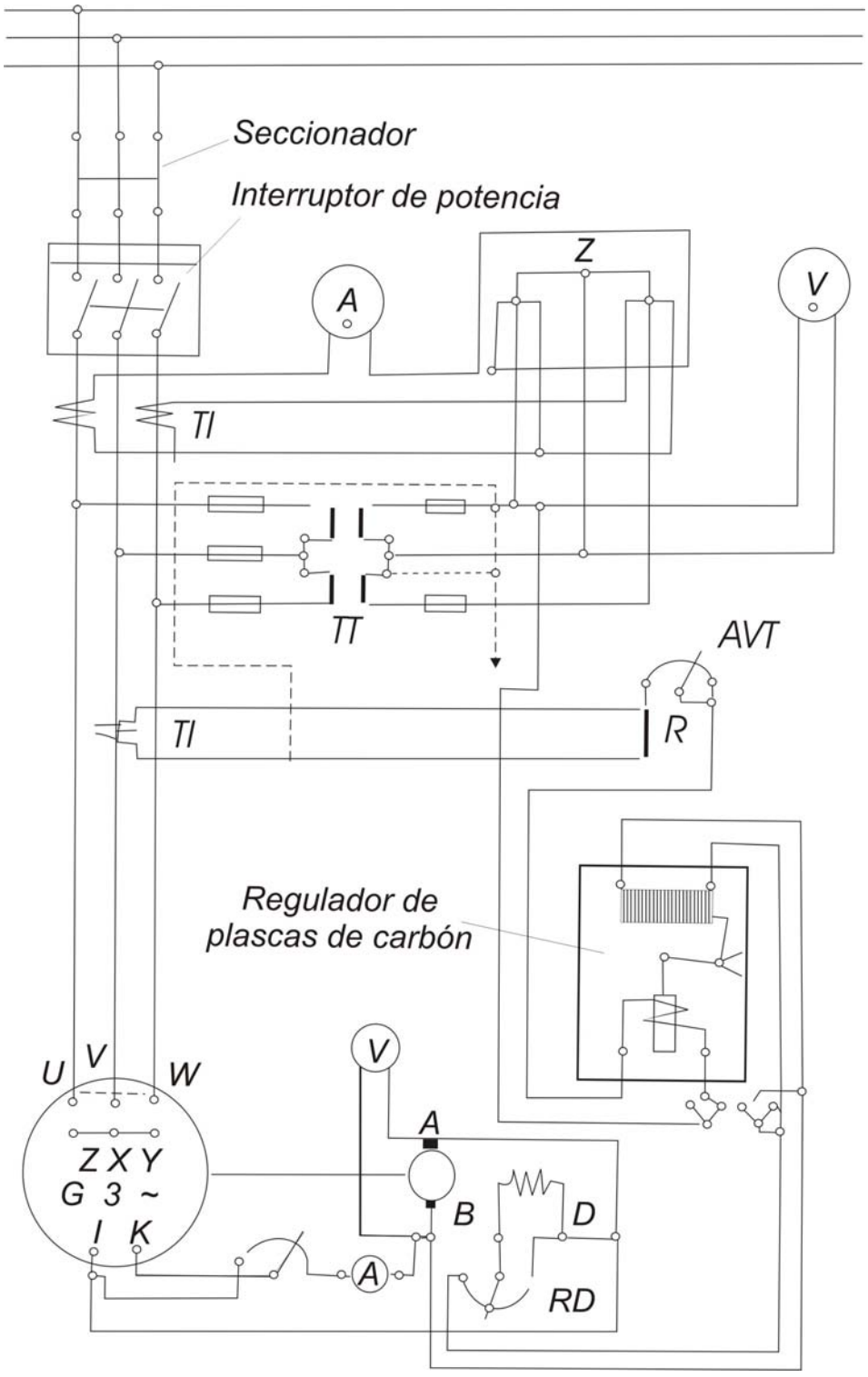
Caso muy diferente es el generador funcionando aisladamente, ya que es la máquina quien debe estar capacitada para compensar con éxito las variaciones que presenten los niveles de potencia entregada.

Para garantizar los valores de frecuencia y voltaje, es necesario dotar al generador con sistemas independientes de regulación, que se encarguen de detectar y corregir adecuadamente las desviaciones de dichas variables reguladas.

Se conocen gran numero de reguladores automáticos de tensión de desempeño confiable, de los cuales se tienen el regulador de placas de carbón, regulador mecánico rápido, el regulador de sectores rodantes y el regulador electrónico básico.

1.3.1 Regulador de Placas de Carbón. Este regulador se basa en el principio del micrófono de carbón empleado en telefonía. Cuando la tensión del generador es demasiado baja, el núcleo de hierro del regulador comprime el paquete de carbón al descender y por medio de una transmisión por palancas, disminuye de este modo la resistencia óhmica. La conexión en serie, que consta de los valores de resistencia del circuito de excitación de la excitatriz y del regulador de carbón, tiene un valor total más pequeño, produciéndose un aumento de la tensión de excitación, de la corriente de excitación principal y del flujo magnético en el rotor. La consecuencia de ello es un aumento de la tensión del generador al valor nominal.

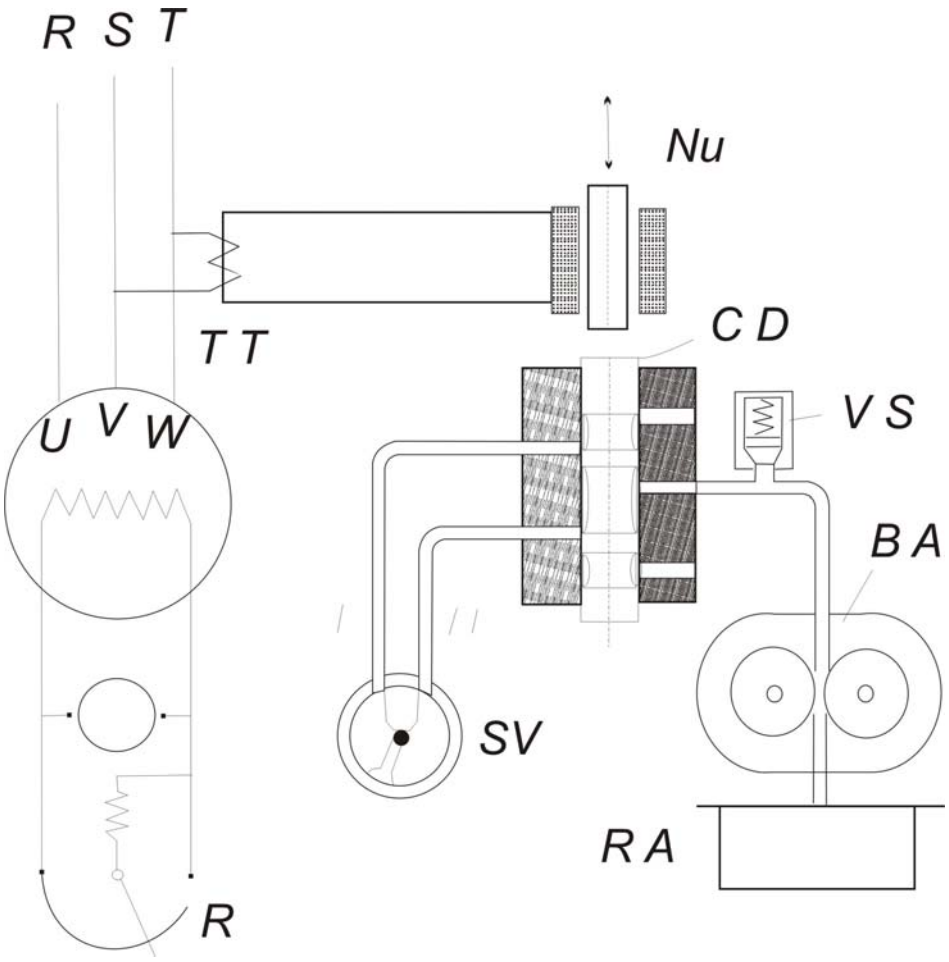
Figura 7. Regulador de placas de carbón.



Este proceso se realiza, naturalmente, con gran velocidad. De un modo análogo, un aumento de la tensión con carga reducida ocasiona un aumento de la resistencia del paquete de carbón y por consiguiente, un valor total mayor de la resistencia del circuito de excitación. Por tanto, la tensión de excitación se hace menor y la corriente principal de excitación, el flujo magnético y la f.e.m. trifásica toman valores menores. El reóstato AVT sirve para ajustar el valor que debe mantener constante el regulador de carbón. En la figura 7 está intercalada la regulación automática de la tensión en la posición dibujada a trazos del conmutador del regulador CR.

1.3.2 Regulador Mecánico Rápido. Es un regulador de tensión que actúa mecánicamente por medio de aceite a presión.

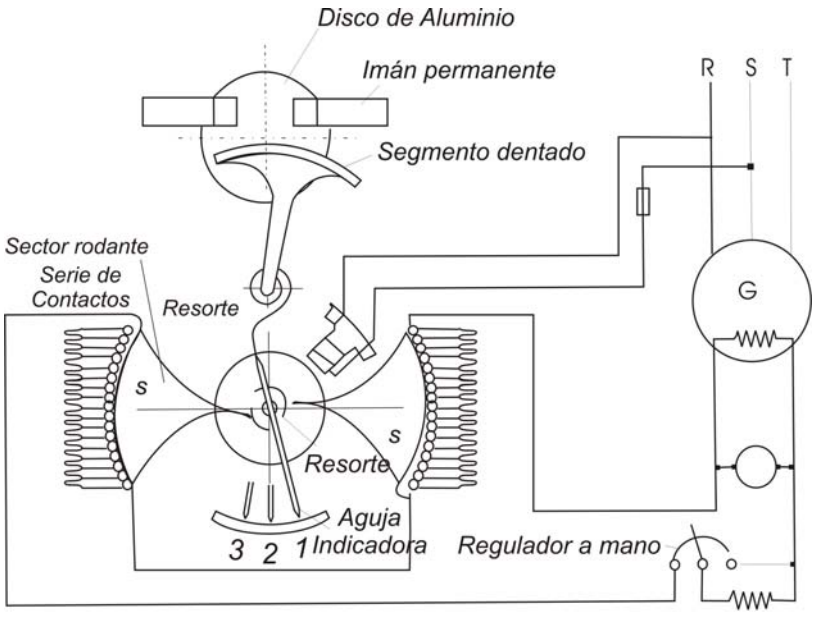
Figura 8. Regulador mecánico rápido.



Su funcionamiento se ve en la figura 8. Al aumentar la tensión del generador se abre el conducto de aceite I, después que el núcleo A, ha estirado la corredera distribuidora hacia arriba. El aceite que entra en el servomotor de presión de aceite SV mueve su corredera giratoria en el sentido contrario de las agujas del reloj. Este movimiento se transmite con una rueda y cadena a la palanca del reóstato de campo de la excitariz, aumentando la resistencia del circuito de excitación, con lo que finalmente se baja la tensión. Cuando la tensión baja, el núcleo y la corredera distribuidora se corren hacia abajo. El conducto de aceite II queda libre, y el aceite mueve la corredera del servomotor en sentido horario. De este modo la resistencia del regulador se disminuye y en consecuencia la tensión de excitación aumenta, así como el flujo magnético y la f.e.m. inducida. El regulador descrito trabaja directamente sobre el reóstato de campo de la excitatriz y su desempeño es bueno en la práctica.

1.3.3 Regulador de Sectores Rodantes. Este regulador rápido, que se puede ver en la figura 9, consta esencialmente de un cilindro de aluminio, sobre el cual ejerce un momento de giro un inductor excitado por la tensión del generador. Un resorte en espiral fijado al cilindro y a la armazón actúa en sentido contrario a este momento. Además se disponen dos sectores de tal modo que, accionados por el cilindro, se mueven por rodamiento sobre dos series de contactos. Al girar el cilindro en sentido horario, se intercala resistencia en el circuito de excitación de la excitatriz. Una aguja indicadora que informa de la posición del regulador, está unida con un disco de aluminio mediante otro resorte y un segmento dentado. La amortiguación del disco de aluminio se produce mediante imanes permanentes.

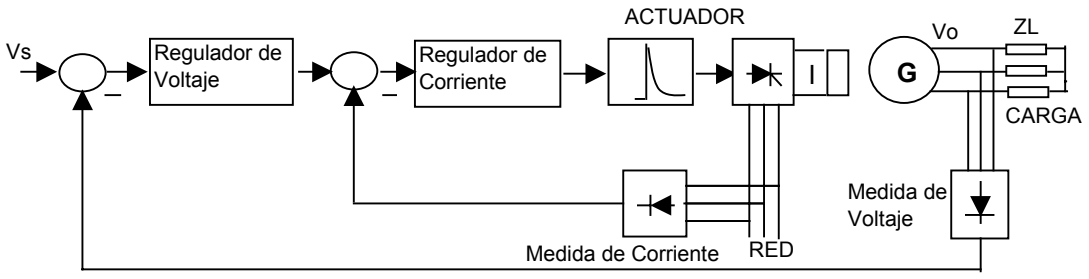
Figura 9. Regulador de sectores rodantes



Si la tensión del generador aumenta por descargarse, el motor Ferraris produce un momento de giro mayor sobre el cilindro, y actúa en el sentido de la derecha, que corresponde a un movimiento de la aguja de 1 a 3, se conecta resistencia en el circuito de excitación. Los dos resortes limitan el movimiento del cilindro apoyado por la amortiguación debida a los imanes permanentes. La posición de los sectores, inmediatamente después de la descarga, corresponde aproximadamente a la posición 3 de la aguja indicadora. En el generador se induce una f.e.m. menor debido a la menor excitación, y el momento de giro ejercido sobre el cilindro se hace menor, el cilindro se mueve en el sentido antihorario y los dos resortes se destensan de nuevo. Se llega finalmente a una posición de equilibrio, en los alrededores de la posición media 2 de la aguja. Es importante en este regulador, que por la sobreregulación se alcanza una variación rápida del campo y de la f.e.m.

1.3.4 Regulador de Voltaje Electronico. De la teoría de la máquina sincrónica se deduce que sobre la tensión en bornes tienen influencia las variables frecuencia y voltaje de campo.

Figura 10. Regulador de voltaje electrónico.



Para mantener la magnitud del voltaje en bornes constante, se debe influir de alguna manera sobre una de estas dos magnitudes. Sin embargo la frecuencia no puede ser modificada, por lo que queda solo como variable reguladora la tensión de excitación. Se tiene entonces la relación dinámica existente entre la tensión en bornes y el voltaje de excitación.

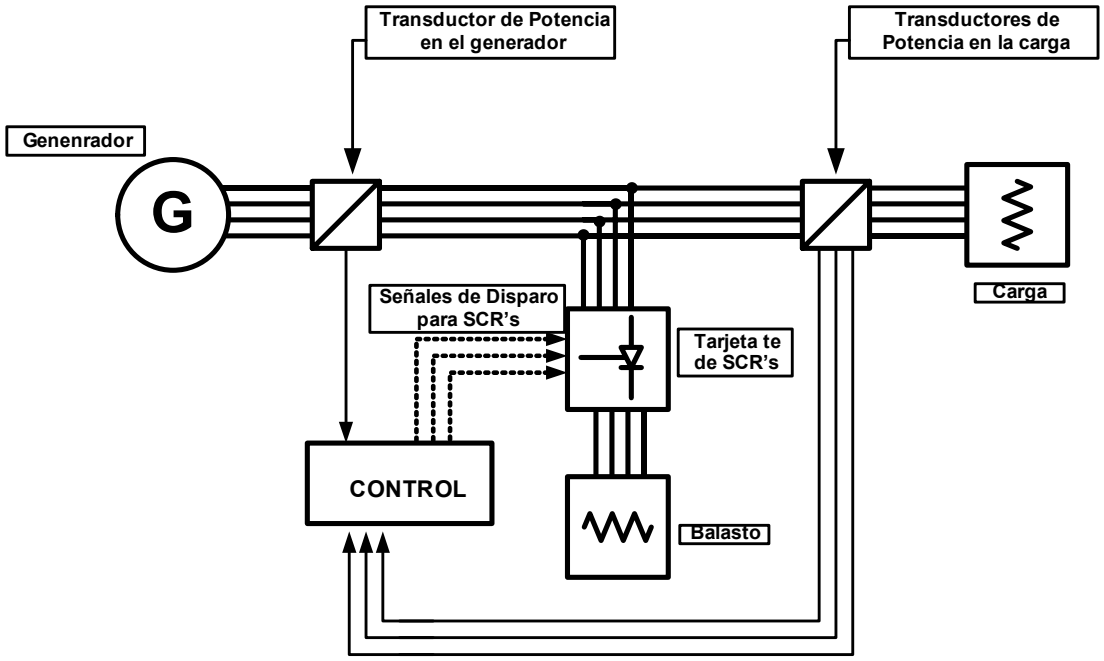
En la figura 10 se ve el diagrama eléctrico esquemático del sistema en el que se debe tener en cuenta la necesidad de incorporar una limitación de corriente de campo, para proteger el generador contra sobrecargas.

2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE Y SOFTWARE

2.1 DISEÑO DE HARDWARE.

Para el diseño del hardware se utilizó componentes resistentes y confiables que puedan soportar las condiciones del proceso y que generen respuestas exactas y precisas para mantener la estabilidad de todo el sistema, sin importar las variaciones a las que éste sea sometido. El esquema general del sistema se muestra en la figura 11.

Figura 11. Sistema de control general.



2.1.1 Transductores. El transductor utilizado en el diseño es el *CAW-1032* de *SHLUMBERGER* que es un transductor de potencia utilizado en conexión trifásica ye o delta y monofásica. Con entradas de tensión 115V y corriente 5A, genera una salida en corriente proporcional a la potencia de entrada, su comportamiento es lineal y por medio de una resistencia se puede convertir la corriente de salida en una tensión DC que pueda ser entregada a un microcontrolador.

El transductor se utiliza en esta aplicación para leer la potencia trifásica suministrada por el generador y la potencia que consume la carga en cada una de sus fases y de acuerdo a esta información efectuar el control correspondiente sobre los SCR's.

Los diagramas de conexiones monofásico y trifásico de 4 hilos se muestran en la figura 12 y 13.

Figura 12. Conexión monofásica del transductor.

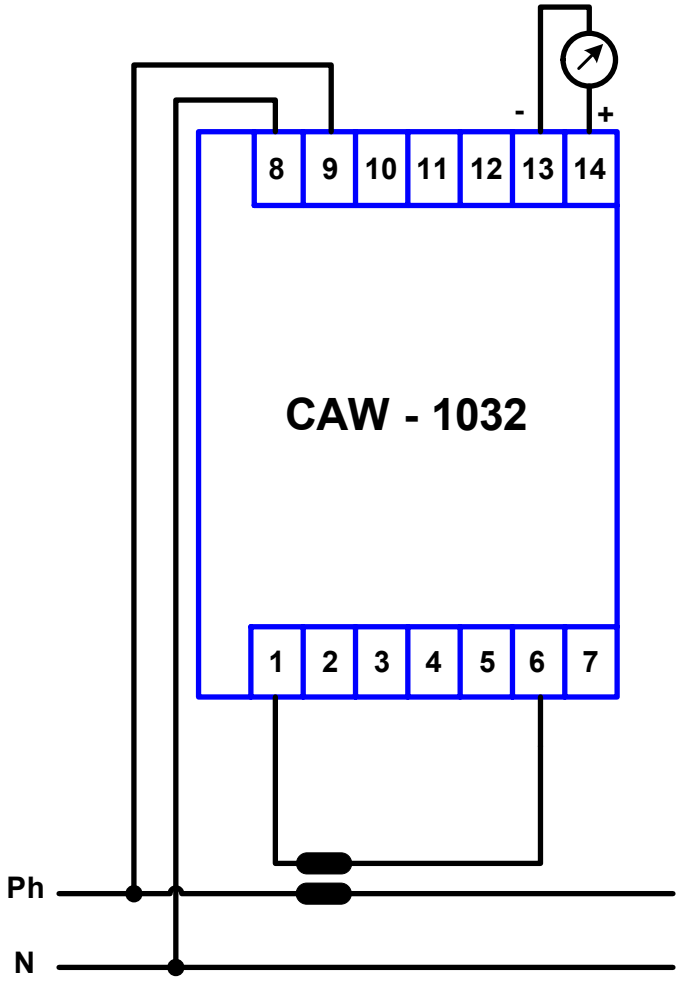
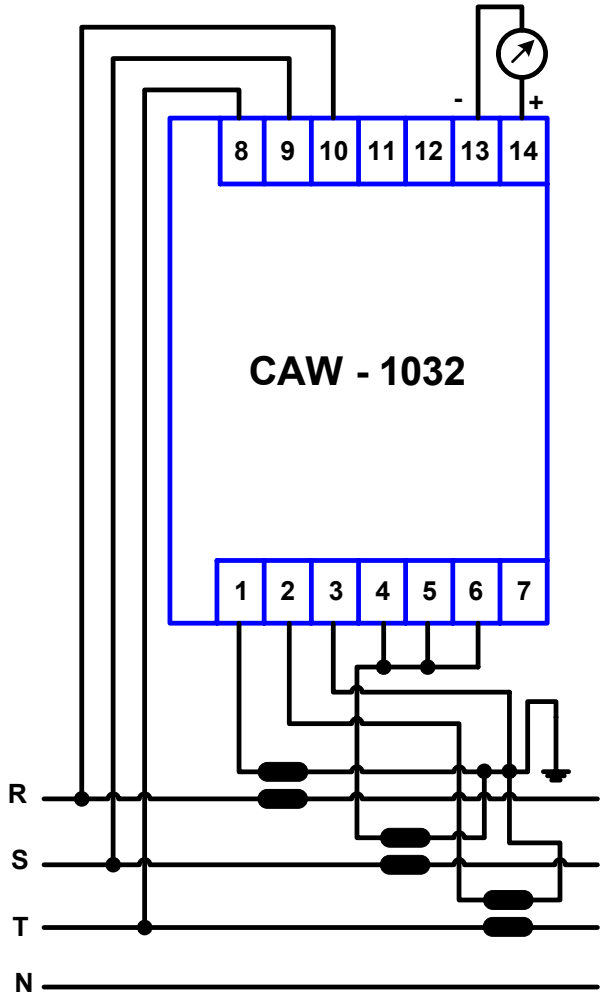


Figura 13 Conexión Trifásica del transductor.



2.1.2 Transformadores de Corriente. Dado que la entrada máxima en corriente de los transductores de potencia es de 5A y la corriente en cada línea de la carga para una potencia de 10 kW está dada por:

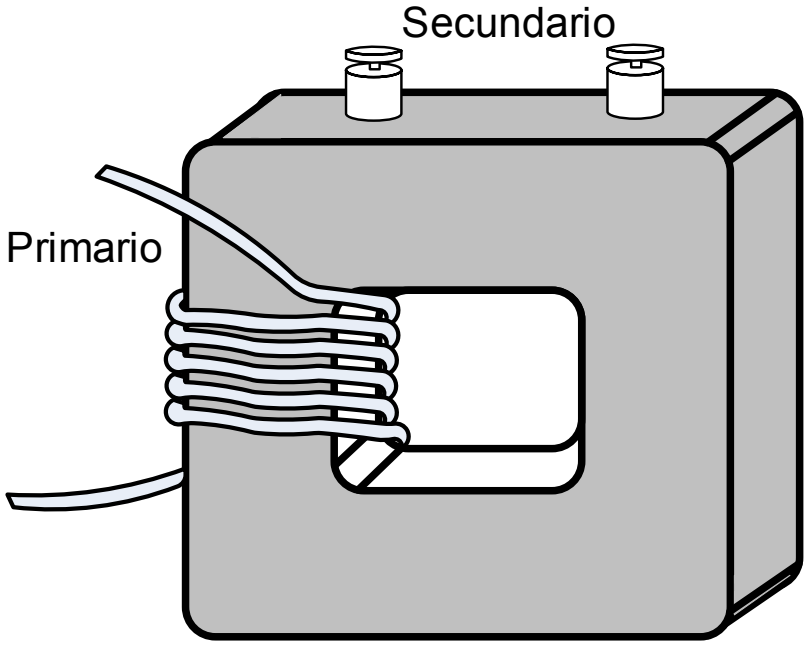
$$S = V_L * I_L * \sqrt{3} \qquad \begin{cases} para: \\ S = 10KVA \\ V_l = 208V \end{cases}$$

$$I_L = \frac{S}{V_L * \sqrt{3}}$$

$$I_L = \frac{10.000}{208 * \sqrt{3}} = 27.757A$$

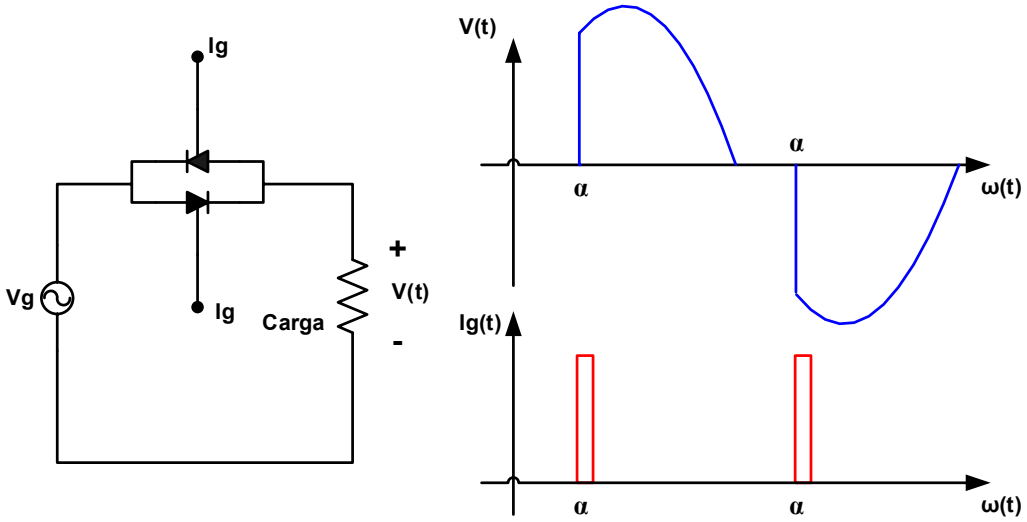
Se utiliza transformadores de corriente tipo ventana para reducir la corriente de entrada a los transductores. La relación inicial de los transformadores es 200/5, debido a esto se hace necesario devanarles externamente espiras en el núcleo para reducir la relación de transformación y dejarla en 30/5A, de esta manera cuando se tenga la potencia nominal por los transductores circulara una corriente de 5A y produciendose tensiones de salida de máximo 5V DC, que van directo al microcontrolador. El transformador se ve en la figura 14.

Figura 14. Transformador de corriente modificado.



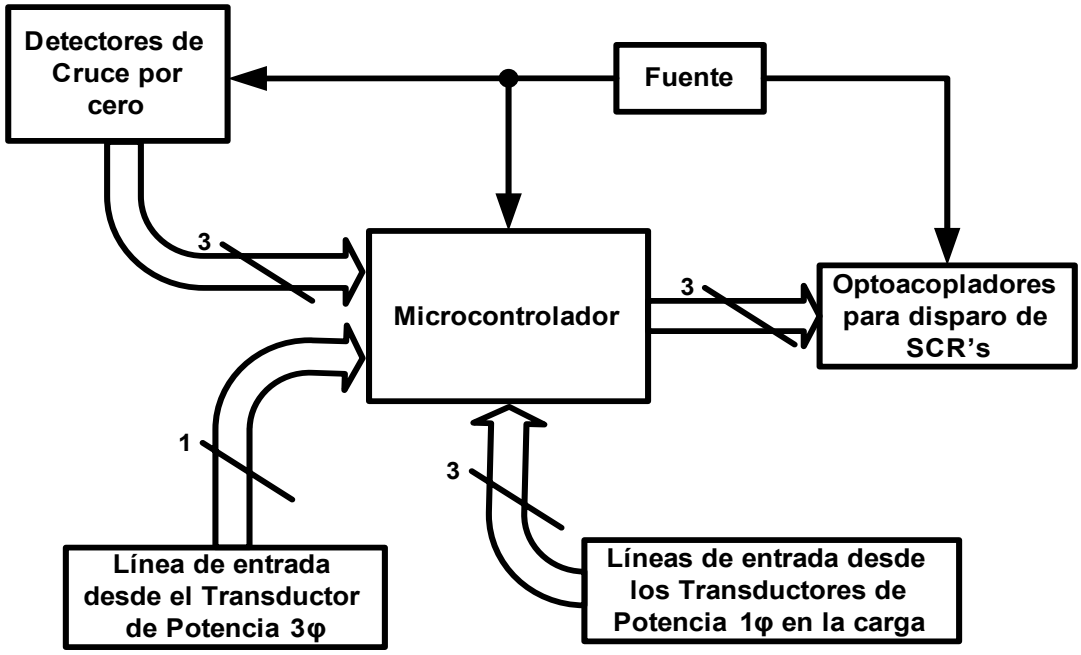
2.1.3 Tarjeta de SCR'S. El control, por medio del disparo de los SCR's permite hacer un manejo sobre la tensión que en este caso se entrega a una carga resistiva regulando la potencia que ésta consume. Se utilizan SCR's 2N3899 de 35A conectados en antiparalelo, con la misma señal de disparo para cada una de las fases. Se puede apreciar en la figura 15.

Figura 15. Circuito de Potencia de los SCRs.



2.1.4 Tarjeta de Control. El Control se encarga de tomar las señales provenientes de los transductores de potencia en el generador y la carga y con base en las lecturas obtenidas se calcula el ángulo para el cual se debe generar el disparo para los SCR's, esto se hace de manera independiente en cada fase, de manera que aun cuando la carga se encuentra desbalanceada, el control pueda hacer el balanceo y permitir que el generador entregue siempre la potencia nominal. El esquema de la tarjeta de control se ve en la figura 16.

Figura 16. Esquema de la tarjeta de control.



- Detector de cruce por cero: La detección de cruce por cero de cada una de las fases se encarga de la sincronización de todo el sistema. Como es necesario balancear cada fase de forma independiente, se debe hacer detección de cruce por cero para cada fase. El cruce por cero es la referencia que tiene el microcontrolador del control para medir el ángulo de disparo de cada uno de los SCR's. El diseño del detector del cruce por cero aparece en la figura 17. Se utiliza el circuito integrado LM-393 comparador de voltaje con salida de colector abierto y de alta precisión que puede operar con una fuente unipolar y cuya señal de salida digital es llevada a un MCT6 (optoacoplador) con salida de transistor NPN también de colector abierto, la cual mantiene una salida de 5V DC y entrega 0V cuando en la entrada del comparador se detecta el cruce por cero. Estos pulsos se entregan a tres entradas Schmitt-Trigger del microcontrolador.

Figura 17. Circuito Detector de cruce por cero.

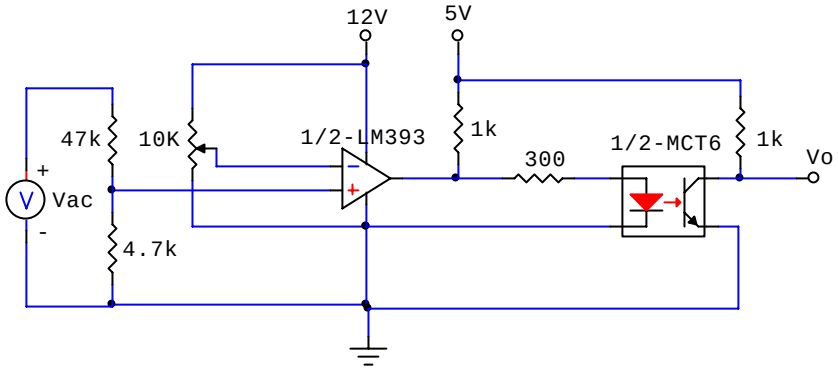
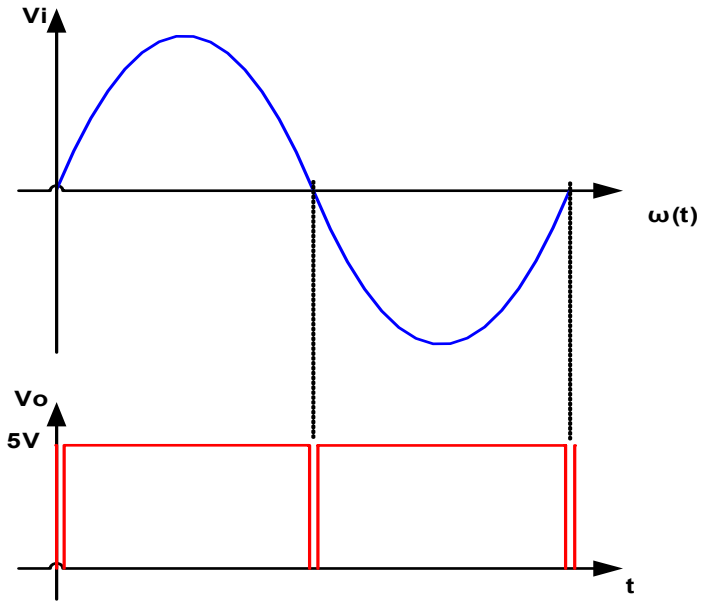


Figura 18. Señal de detección de cruce por cero.

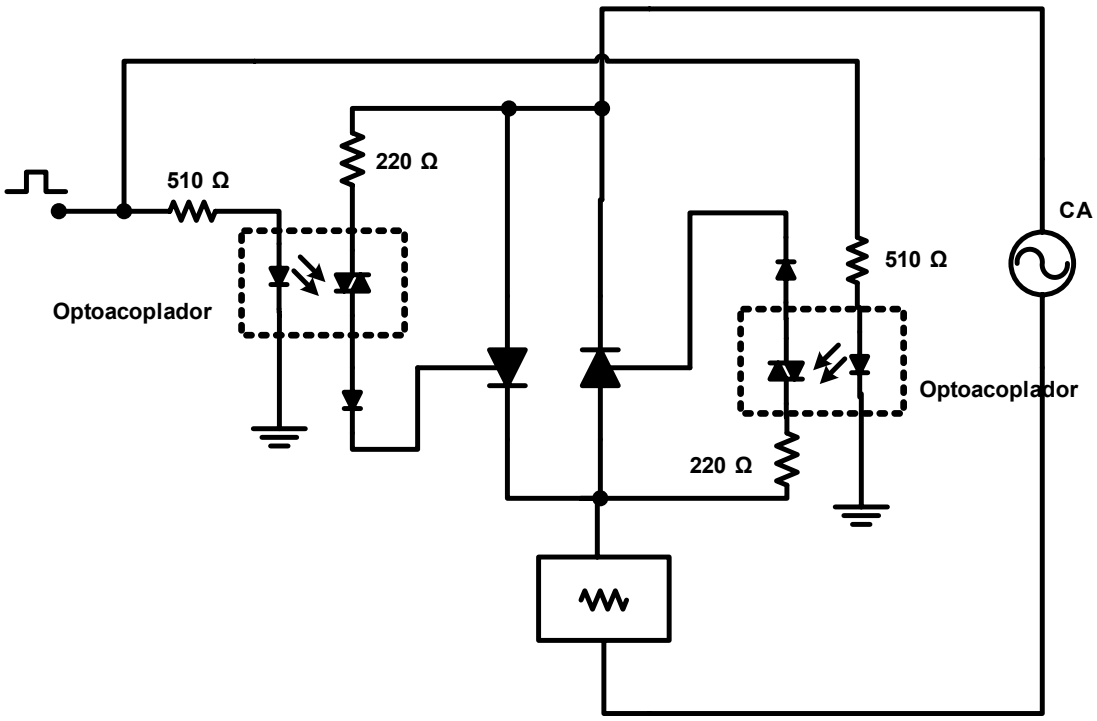


Línea de entrada desde el transductor de potencia trifásico: Esta es una entrada análoga que llega directo al microcontrolador, varía de 0 a 5 VDC y corresponde a la lectura de la potencia (desde 0 a 10 KW) en la salida del generador.

Líneas de entrada desde los transductores de potencia monofásicos en la carga: Estas corresponden a 3 líneas análogas (una por cada fase) de entrada al microcontrolador. Varían de 0 a 5 VDC y corresponden a las lecturas de la potencia (desde 0 a 3.33 KW) que consume la carga en cada una de las fases. Con la diferencia entre la lectura de potencia del generador y la lectura de potencia en cada fase de la carga se obtiene el valor correspondiente al ángulo de disparo en cada SCR.

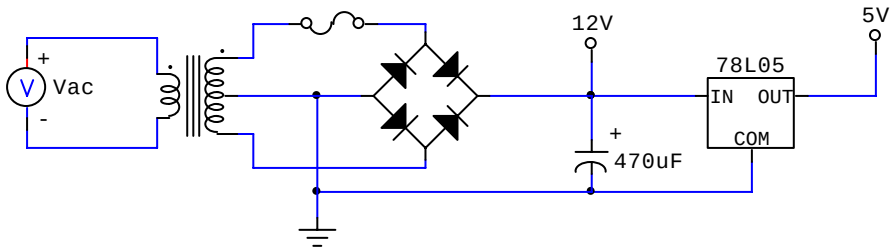
- Optoacopladores para disparo de SCR's: Para generar el disparo sobre el SCR en cada fase y en el ángulo adecuado, se lleva el pulso de disparo desde el microcontrolador hasta un MOC-3021 que es un optotriac con características especiales que facilitan el disparo de los SCR's. De esta manera se le proporciona al tiristor la corriente de compuerta necesaria para el disparo y se aísla el microcontrolador de las líneas de potencia. El esquema del circuito de disparo se observa en la figura19.

Figura 19. Circuito de disparo de los SCRs.



- Fuente: La fuente encargada de alimentar todos los dispositivos electrónicos del control, es unipolar y suministra 5 y 12 VDC según la figura 20.

Figura 20. Fuente de alimentación.



- Microcontrolador: Este dispositivo es el encargado de sincronizar y controlar todo el proceso realizando las siguientes actividades: Detectar los cruces por cero de cada una de las fases para sincronizar el disparo de los SCR's, tomar las lecturas de la potencia en el generador y en la carga desde las salidas de los transductores para calcular el ángulo en el que se debe generar el disparo para los tiristores, generar el disparo para cada SCR según la fase y el ángulo calculado, determinar la frecuencia de la línea de potencia para hacer corrección del ángulo de disparo y por tanto de la entrega de potencia al balasto.

El microcontrolador utilizado es el 68HC908JL3 de Freescale (Motorola) con características de funcionamiento como:
4096 bytes de memoria Flash
Operación a 5V y 3V DC
Velocidad de bus Interno hasta 8 MHz.
128 bytes de RAM
2 Canales temporizadores de 16 bits, uno de los cuales se utiliza para determinar el tiempo de disparo de los tiristores según el ángulo, y además para conocer la frecuencia de la línea de potencia.

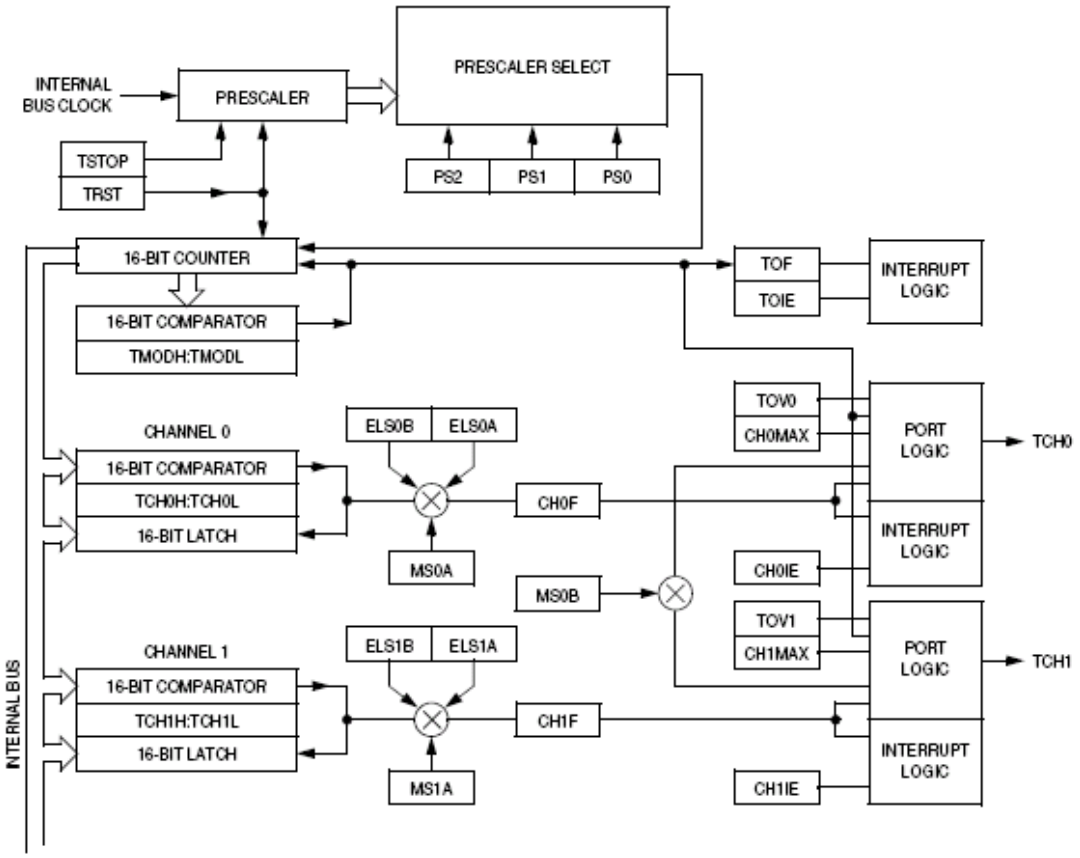
12 canales A/D, de los que se usan 4 para tomar las lecturas de potencia que generan los transductores. 7 entradas *KeyBoard* con pullup interno que generan interrupción, 3 de las cuales se utilizan para la detección de los cruces por cero. 10 salidas *led driver* de los cuales 3 son usados para generar los disparos de los tiristores. 16 modos de direccionamiento Transferencia de datos memoria a memoria. Multiplicación rápida de 8 x 8 bits. División rápida de 16/8 bits. De los diferentes módulos para procesamiento de información que posee el microcontrolador en esta aplicación se utilizan básicamente tres:

- Módulo TIM: Este es el modulo de interfase temporizadora. El módulo TIM posee dos canales temporizadores que pueden ser utilizados como referencia de tiempo, captura de entrada, salida de comparación, y módulo PWM.

Características: ver figura 21.

- ❖ Dos canales Captura de entrada/Salida de comparación.
- ❖ Generador de PWM.
- ❖ Reloj TIM programmable con 7 posibilidades de preescalamiento partiendo de la frecuencia interna del microcontrolador.
- ❖ Módulo libre de conteo ascendente.
- ❖ Bits de reset y stop para el contador TIM.

Figura 21. Mòdulo TIM.

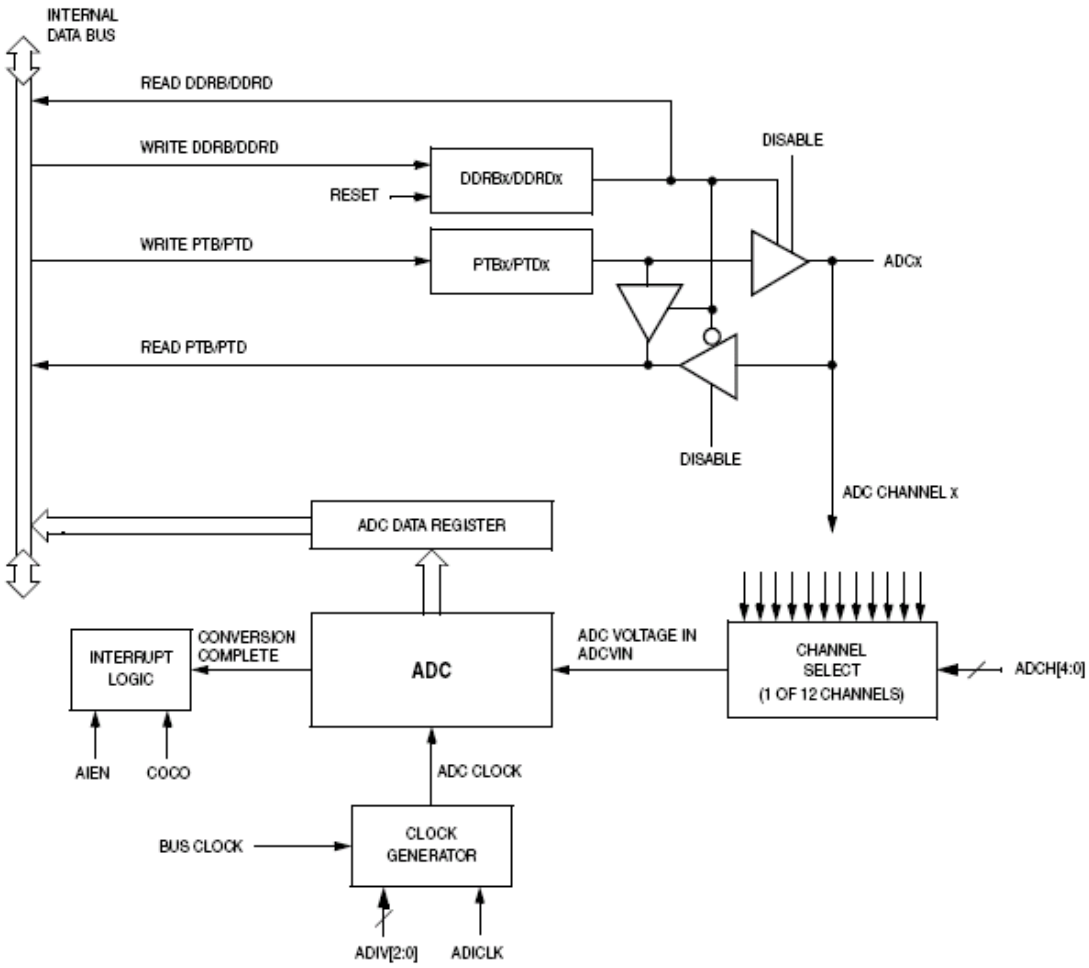


- Módulo ADC: Este modulo posee 12 canales de 8 bits para conversión análoga a digital con conversor lineal de aproximaciones sucesivas.

Características: ver figura 22.

- ❖ Doce canales con entrada multiplexada.
- ❖ Lineal de aproximaciones sucesivas con monoticidad.
- ❖ Resolución de 8 bits.
- ❖ Conversión única o continua.
- ❖ Bandera de fin de conversión o interrupción de fin de conversión
- ❖ Velocidad de reloj seleccionable.

Figura 22. Modulo ADC.

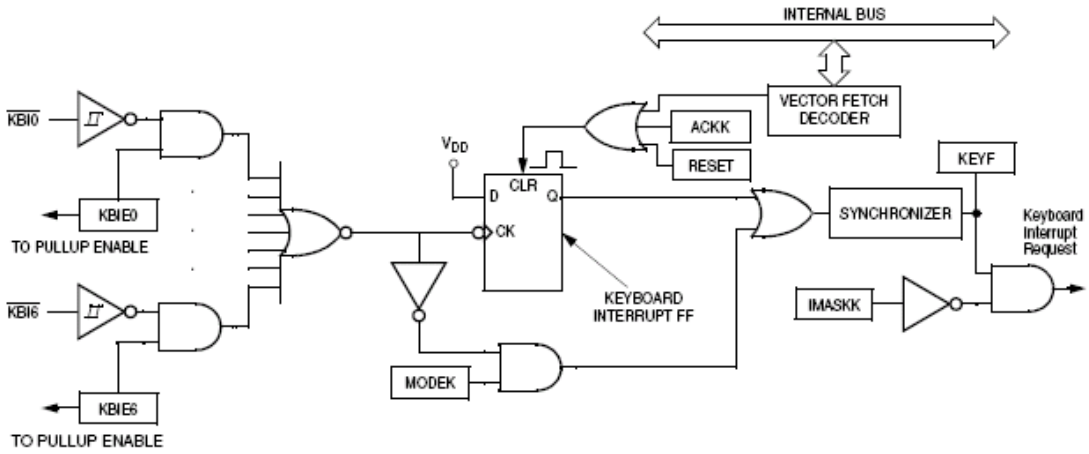


- Módulo KBI: Este modulo posee siete entradas enmascarables como fuente de interrupción externa a las cuales se puede tener acceso por los pines PTA0 – PTA6

Características: ver figura 23.

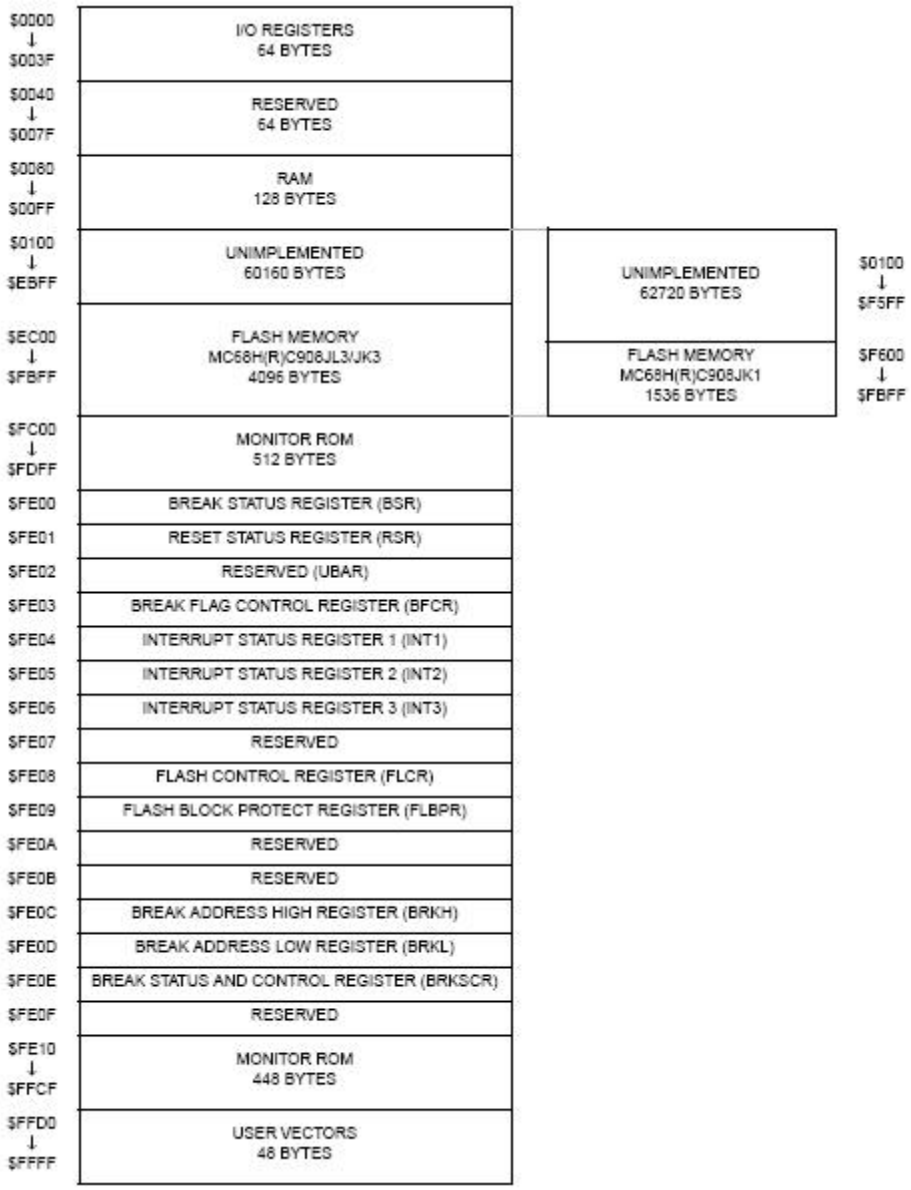
- ❖ Siete pines para entrada de interrupción con posibilidad de ser habilitados o deshabilitados de manera independiente.
- ❖ Habilitador general del módulo.
- ❖ Resistores Pull-up configurables por software para cada una de las entradas.
- ❖ Entradas programables para detectar flancos descendentes o niveles lógicos bajos.
- ❖ Salida desde modos de bajo consumo de energía.

Figura 23. Modulo KBI.



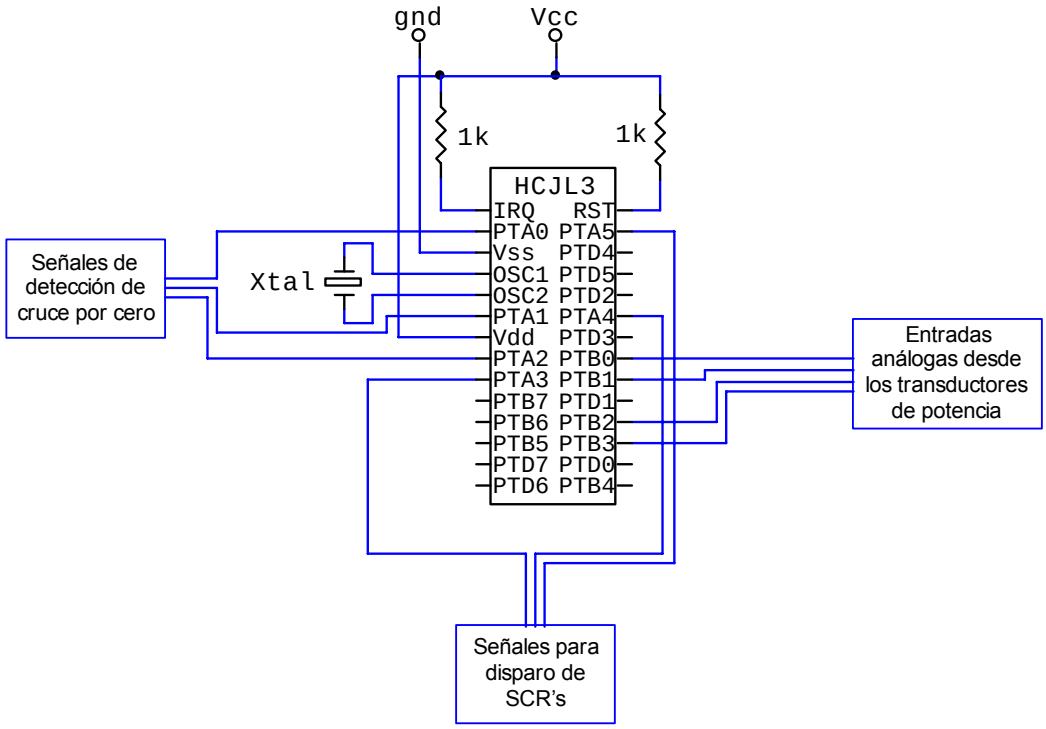
La Figura 24 muestra el mapa de memoria del microcontrolador:

Figura 24. Mapa de memoria.



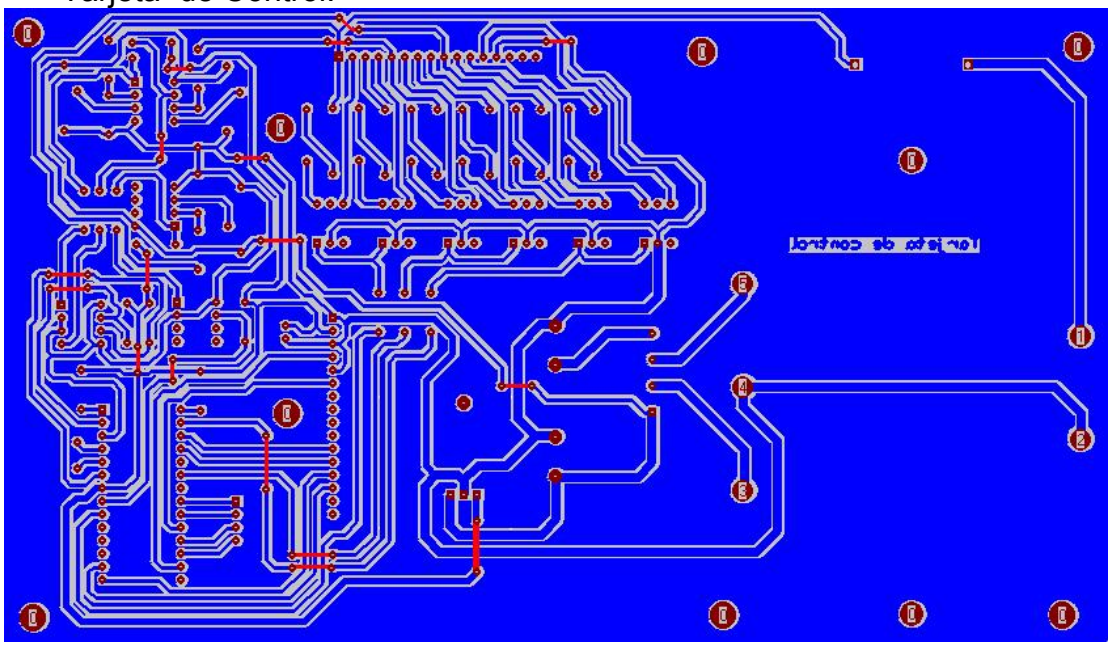
El montaje del microcontrolador se puede observar en la figura 25.

Figura 25. Montaje del Microcontrolador.

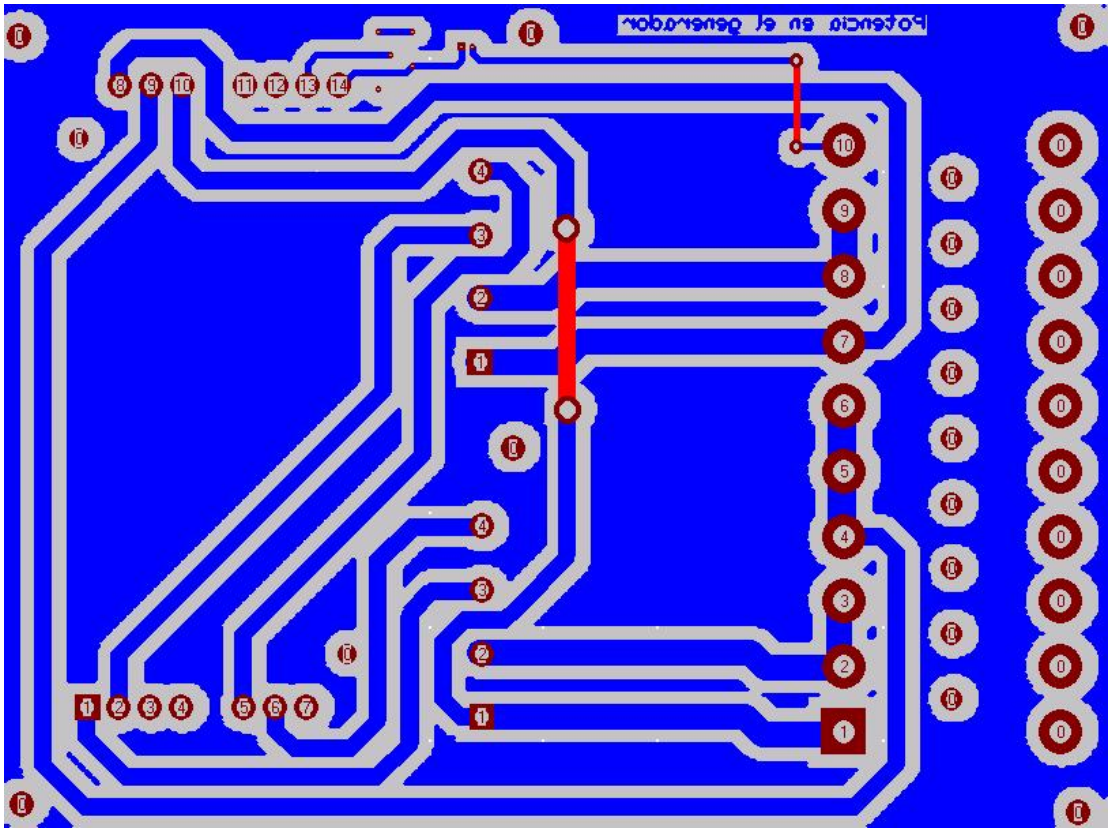


2.1.5 **Tarjetas de Circuito Impreso.**

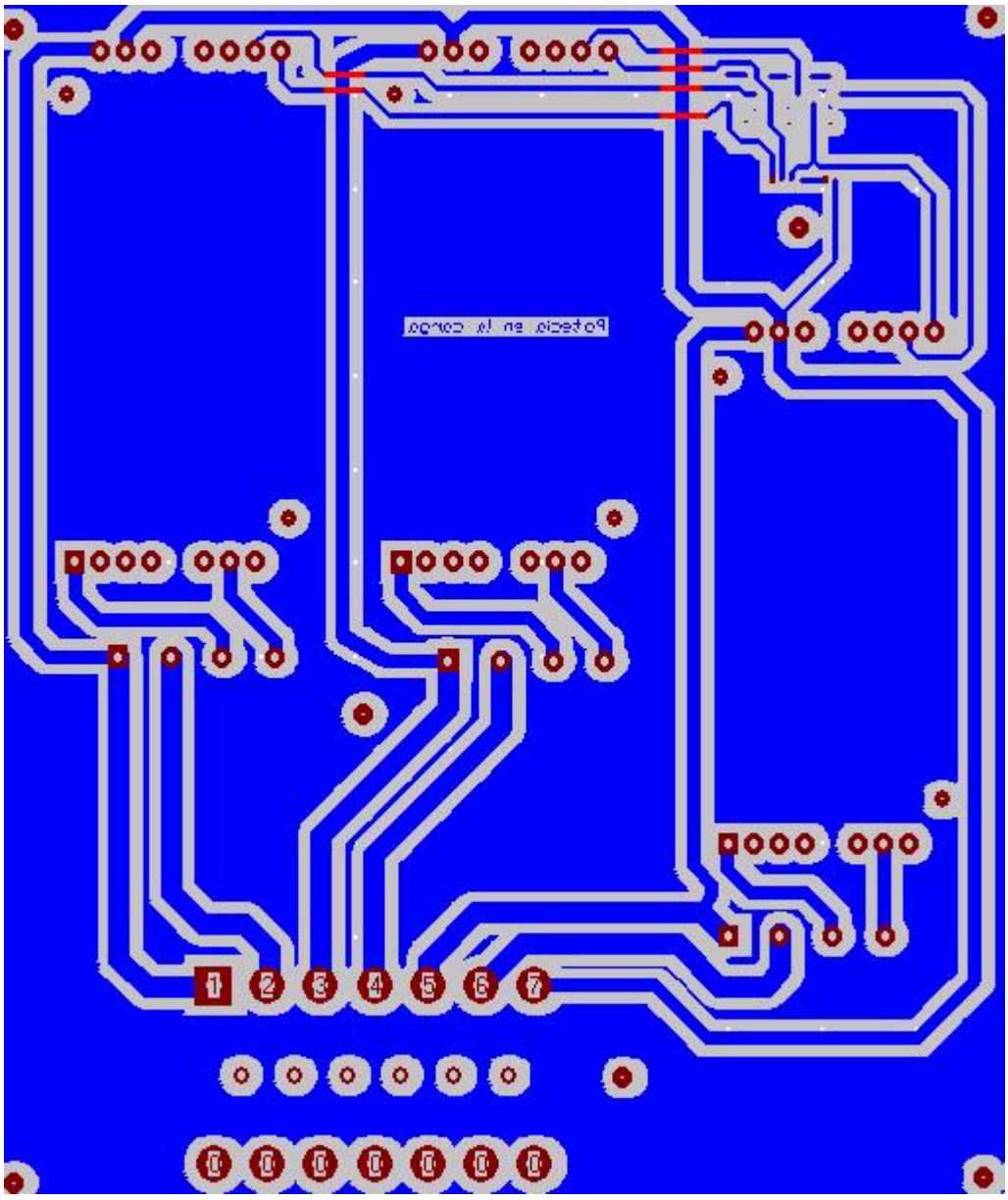
- Tarjeta de Control:



- Tarjeta para Transductor trifásico en el generador:



- Tarjeta para transductores monofásicos en la carga:



2.2 DISEÑO DEL SOFTWARE.

El software diseñado para el microcontrolador se encarga de verificar todas las condiciones y variables del sistema para el análisis y con base en este tomar las acciones de control necesarias. De manera general el software toma los valores de potencia del generador, potencia de la carga y frecuencia para calcular el ángulo de disparo para los SCR's. Ver figura 24.

El programa se encuentra desarrollado por subrutinas cortas y sencillas que le dan mayor velocidad de ejecución, se utiliza lenguaje ensamblador de motorola y se trabaja con la plataforma *Code Warrior V3.0* que tiene las herramientas para ensamble y programación directamente al microcotrolador.

2.2.1 Algoritmo Principal. El algoritmo del programa principal de control realiza los siguientes pasos:

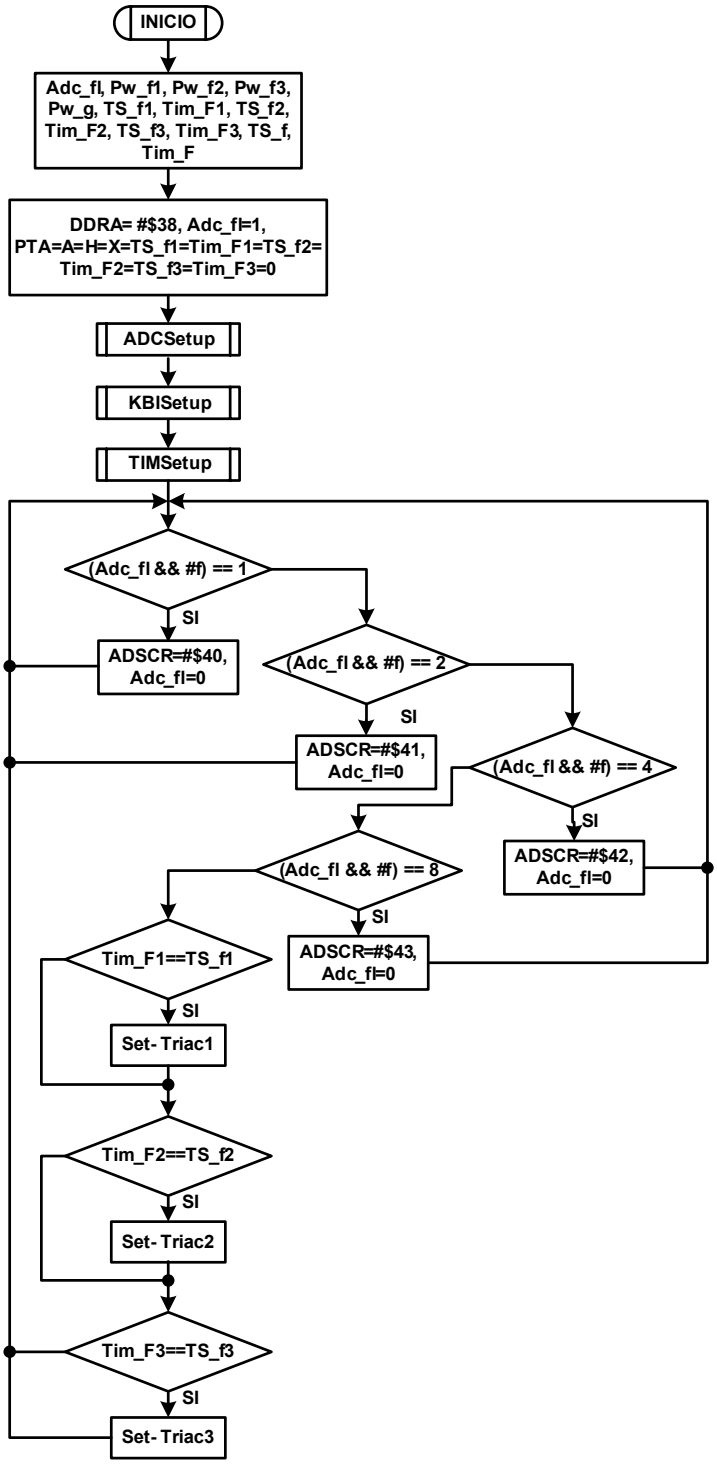
1.Declaración de constantes.
2.Declaración del segmento de datos.
3.Definición del segmento de código.
4.Inicialización del segmento de datos.
5.Configuración del Módulo ADC.
6.Configuración del Módulo KBI (Entradas de interrupción para detección de cruce por cero.
7.Configuración del Módulo TIM (Temporizador para medida frecuencia y ángulos de disparo).
8.Establecer el canal de conversión para tomar datos de potencia desde los transductores.
9.Verificar el ángulo para generar el disparo de los SCR's en cada una de las fases.
10.Se repiten los pasos 8 y 9.

Para una frecuencia de bus de 5 MHz en el momento de encender el control el algoritmo principal tarda 28.2 µs en reestablecerse y luego cada 11.6 µs se completa un ciclo de revisión de ángulo para generación de disparo.

Durante el proceso de ejecución del programa principal se generan interrupciones que ayudan a complementar el proceso; la explicación de éstas y las subrutinas secundarias se hace más adelante.

El diagrama de flujo correspondiente al algoritmo principal se muestra en la figura 26.

Figura 26. Algoritmo Principal.



2.2.2 Subrutinas e Interrupciones. De las 8 fuentes de interrupción que posee el microcontrolador se utilizan tres en todo el proceso, una es interrupción externa en el módulo KBI que se usa para detectar el cruce por cero de cada una de las fases, otra es la interrupción por fin de conversión en el módulo ADC que se usa para efectúar la lectura desde los transductores del potencia. La tercera fuente de interrupción es el desbordamiento en uno de los temporizadores del módulo TIM que se encarga de incrementar cada 0.7º (para 60 Hz) para determinar el ángulo de disparo de los SCR's, además de indicar cual es la frecuencia de la señal según sea el valor de este temporizador cada vez que termina un semiciclo en la señal de potencia.

Los vectores para direccionamiento de las diferentes interrupciones se pueden ver en la tabla 1.

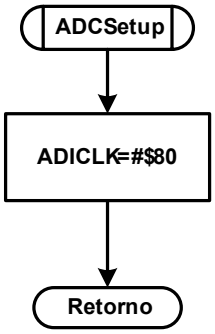
Tabla 1. Vectores de Interrupción.

Vector Priority	Vector	Address	Vector
Lowest	IF15	$FFDE	ADC Conversion Complete Vector (High)
		$FFDF	ADC Conversion Complete Vector (Low)
	IF14	$FFE0	Keyboard Vector (High)
		$FFE1	Keyboard Vector (Low)
	IF13 to IF6	—	Not Used
	IF5	$FFF2	TIM Overflow Vector (High)
		$FFF3	TIM Overflow Vector (Low)
	IF4	$FFF4	TIM Channel 1 Vector (High)
		$FFF5	TIM Channel 1 Vector (Low)
	IF3	$FFF6	TIM Channel 0 Vector (High)
		$FFF7	TIM Channel 0 Vector (Low)
	IF2	—	Not Used
	IF1	$FFFA	$\overline{IRQ}$ Vector (High)
		$FFFB	$\overline{IRQ}$ Vector (Low)
	—	$FFFC	SWI Vector (High)
		$FFFD	SWI Vector (Low)
	—	$FFFE	Reset Vector (High)
Highest		$FFFF	Reset Vector (Low)

Las subrutinas e interrupciones utilizadas son las siguientes:

2.2.3 Subrutina ADCSETUP. Se ve en la figura 27.

Figura 27. Subrutina ADCSetup.



Esta subrutina se encarga de configurar el reloj para conversión A/D de la siguiente manera:

Figura 28. Vector ADICLK.

Address: $003F

	Bit 7	6	5	4	3	2	1	Bit 0
Read:	ADIV2	ADIV1	ADIV0	0	0	0	0	0
Write:								
Reset:	0	0	0	0	0	0	0	0

= Unimplemented

Figure 11-5. ADC Input Clock Register (ADICLK)

ADIV2	ADIV1	ADIV0	ADC Clock Rate
0	0	0	Bus clock ÷ 1
0	0	1	Bus clock ÷ 2
0	1	0	Bus clock ÷ 4
0	1	1	Bus clock ÷ 8
1	X	X	Bus clock ÷ 16

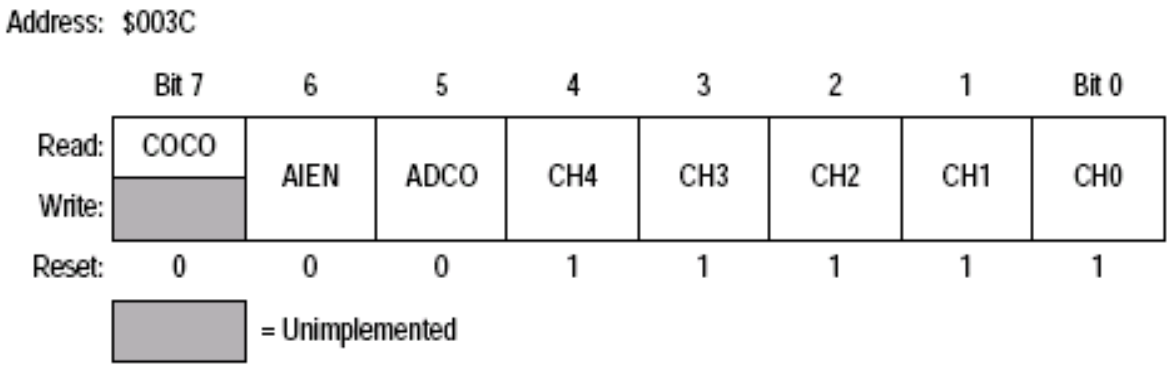
X = don't care

Se escribe el valor en hexadecimal 80 que configura el reloj del conversor para operar a una frecuencia de 312.5 KHz. Ver figura 28.

La interrupción correspondiente a este módulo se configura en el transcurso de la ejecución del algoritmo principal debido a que se debe seleccionar uno a uno los canales en entrada para conversión y de esta manera poder tener la información de cada uno de los transductores de potencia.

Además del registro para configuración del reloj se utiliza otros para la configuración de la interrupción:

Figura 29. Vector ADSCR.



Registro ADSCR se encarga de configurar el ADC para conversión continua o única conversión por canal, habilitar la interrupción por fin de conversión y seleccionar el canal de entrada para el conversor, ver figura 29. La configuración de los canales se ve en la tabla 2.

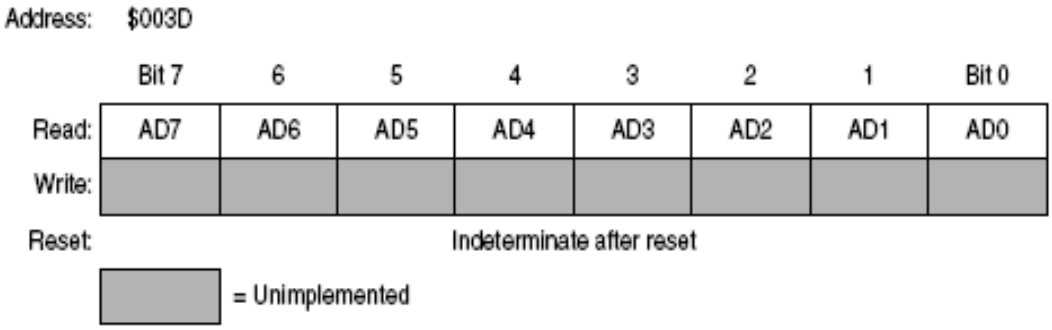
Tabla 2. Canales de conversión.

CH4	CH3	CH2	CH1	CH0	ADC Channel	Input Select
0	0	0	0	0	ADC0	PTB0
0	0	0	0	1	ADC1	PTB1
0	0	0	1	0	ADC2	PTB2
0	0	0	1	1	ADC3	PTB3
0	0	1	0	0	ADC4	PTB4
0	0	1	0	1	ADC5	PTB5
0	0	1	1	0	ADC6	PTB6
0	0	1	1	1	ADC7	PTB7
0	1	0	0	0	ADC8	PTD3
0	1	0	0	1	ADC9	PTD2
0	1	0	1	0	ADC10	PTD1
0	1	0	1	1	ADC11	PTD0
0 : 1	1 : 1	1 : 0	0 : 1	0 : 0	—	Unused (see Note 1)
1	1	0	1	1	—	Reserved
1	1	1	0	0	—	Unused
1	1	1	0	1		V_{DDA} (see Note 2)
1	1	1	1	0		V_{SSA} (see Note 2)
1	1	1	1	1		ADC power off

NOTES:
1. If any unused channels are selected, the resulting ADC conversion will be unknown.
2. The voltage levels supplied from internal reference nodes as specified in the table are used to verify the operation of the ADC converter both in production test and for user applications.

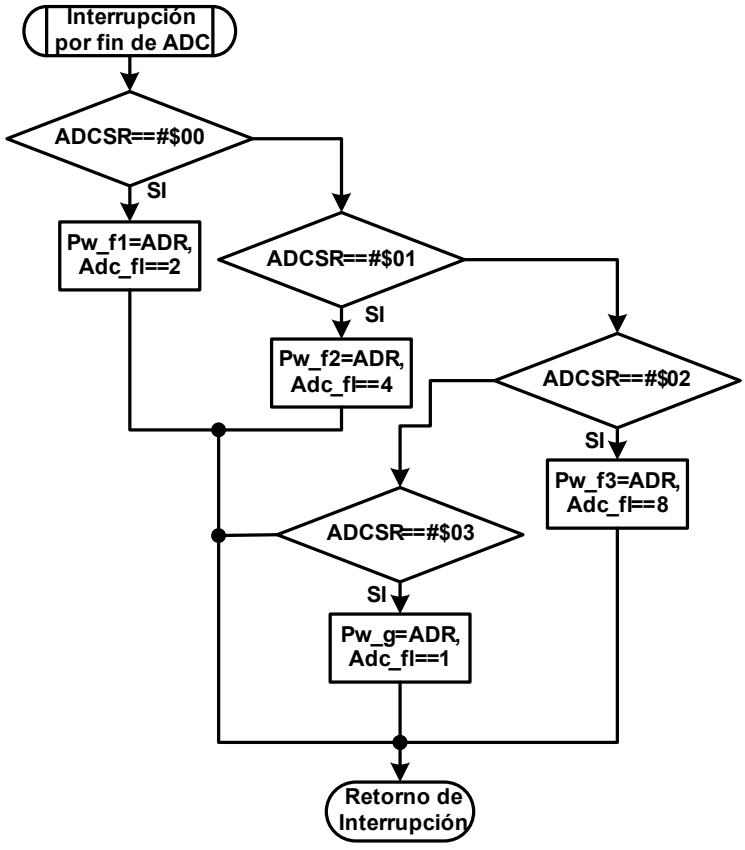
Cuando se ha efectuado fin de la conversión A/D el resultado queda ubicado en el registro ADR y desde allí puede ser llevado para realizar los cálculos y las operaciones correspondientes. El registro ADR se muestra en la figura 30.

Figura 30. Vector ADR.



El algoritmo de la interrupción por fin de conversión en el ADC se ve en la figura 31.

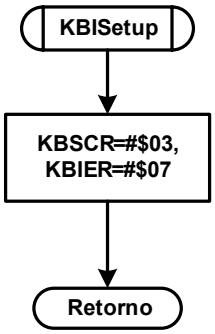
Figura 31. Algoritmo de interrupciòn por fin de ADC.



Lo único que se hace en este paso es verificar cual es el canal por el que se efectúa la conversión A/D y almacenar el resultado en la localidad de RAM correspondiente. Esta rutina tarda 7.6 µs en ejecutarse.

Subrutina KBISetup ver figura 32.

Figura 32. Algoritmo Modulo KBI.



Esta subrutina se encarga de configurar modulo KBI para que detecte los flancos de cruce por cero en cada fase, a través de una interrupción, para su configuración se utilizan dos registros mostrados en las figuras 33 y 34.

Figura 33. Vector KBSCR

Address: $001A

	Bit 7	6	5	4	3	2	1	Bit 0
Read:	0	0	0	0	KEYF	0	IMASKK	MODEK
Write:						ACKK		
Reset:	0	0	0	0	0	0	0	0

= Unimplemented

El KBSCR que es el encargado de habilitar o deshabilitar todo el módulo, además de configurar si la interrupción se genera a partir de flancos descendentes o de estados lógicos bajos.

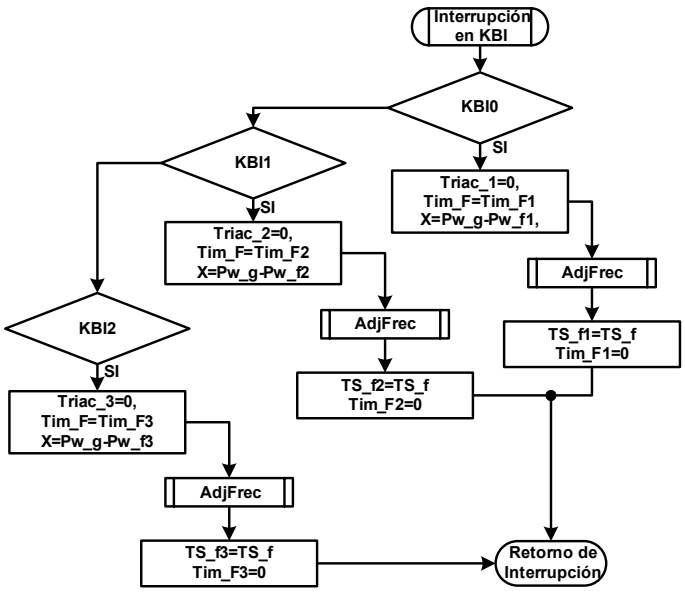
Figura 34. Vector KBIER.

Address: $001B

	Bit 7	6	5	4	3	2	1	Bit 0
Read:	0	KBIE6	KBIE5	KBIE4	KBIE3	KBIE2	KBIE1	KBIE0
Write:								
Reset:	0	0	0	0	0	0	0	0

El KBIER que es el encargado de seleccionar (colocando los bits en 1) cuales de las entradas del puerto A se utilizarán como fuentes de interrupción. En este caso se escribe un 07 debido a que se utilizaran las entradas PTA0, PTA1, PTA2. El algoritmo de la interrupción por detección de flanco descendente en una de estas entradas se ve en la figura 35.

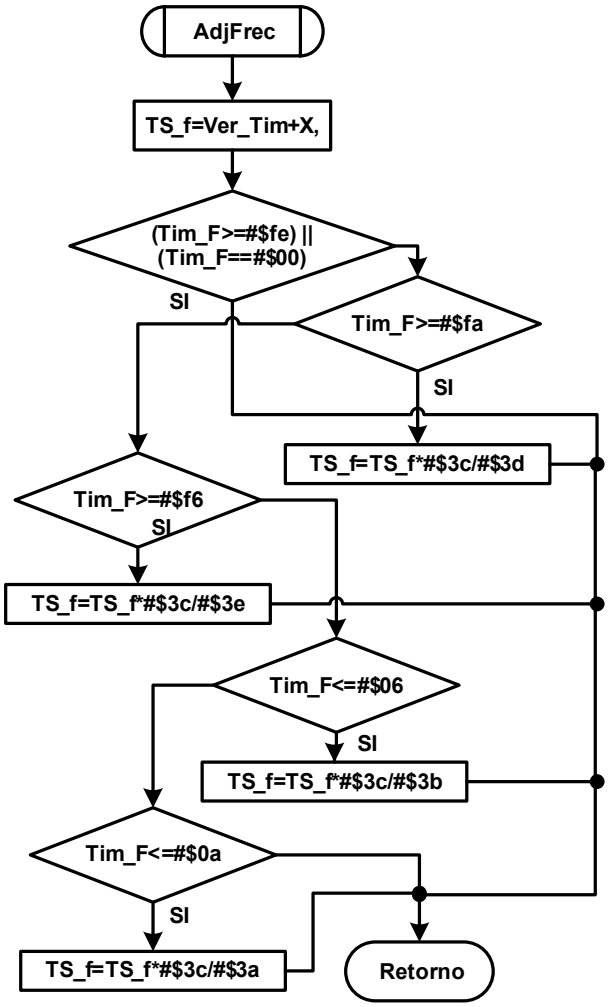
Figura 35. Algoritmo interrupción por detección de flanco descendente.



En la entrada a la interrupción se verifica cual de las tres entradas fue la fuente de interrupción que corresponde a la detección de cruce por cero en una de las fases de potencia y de esta manera llevar a cero el contador de ángulo y hacer el cálculo de la frecuencia del sistema y el ajuste correspondiente del ángulo si es necesario, este ajuste se hace en una subrutina adicional llamada AdjFrec y el tiempo máximo de ejecución de esta interrupción es de 29.6 µs incluido el tiempo

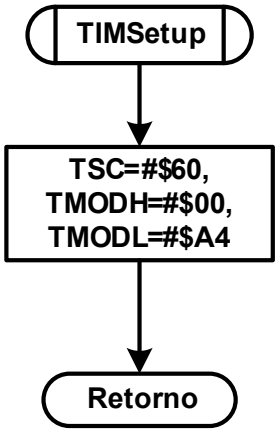
que gastaría en realizar el ajuste del ángulo. El algoritmo para la subrutina de ajuste del ángulo se ve en la figura 36.

Figura 36. Algoritmo ajuste del Angulo.



Subrutina TIMSetup ver figura 37.

Figura 37. Algoritmo Modulo TIM.



Esta subrutina se encarga de configurar el modulo TIM para que genere interrupción cada 32.54 µs (0.7º) y realice el conteo de los ángulos para generar el disparo de los SCR's así como de verificar cual es la frecuencia del la línea de potencia. Los registros utilizados para la configuración de este módulo se ven en la figura 38,39 y 40.

Figura 38. Vector TSC.

Address: $0020

	Bit 7	6	5	4	3	2	1	Bit 0
Read:	TOF	TOIE	TSTOP	0	0	PS2	PS1	PS0
Write:	0			TRST				
Reset:	0	0	1	0	0	0	0	0

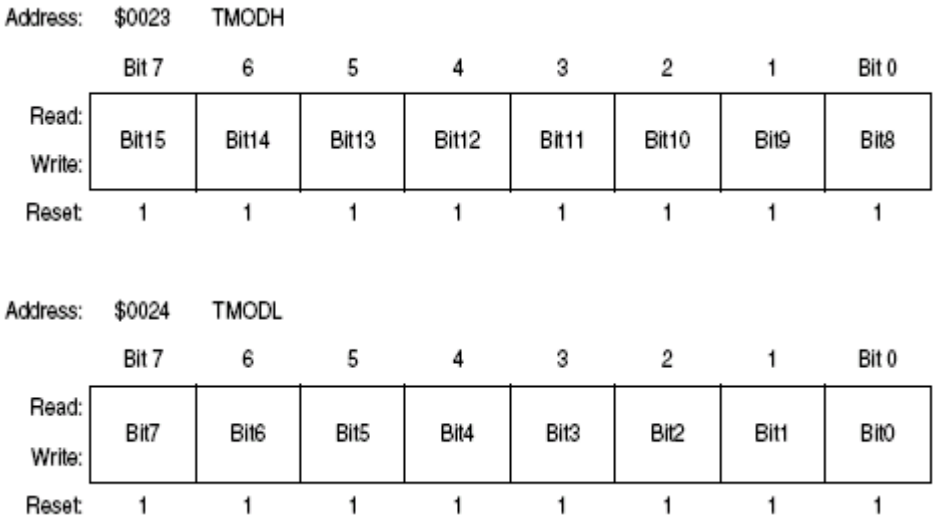
= Unimplemented

El TSC que es el encargado de configurar la interrupción por desbordamiento del temporizador, tiene bits de control para detener el conteo o resetear el contador además de bits de preescalamiento del reloj de conteo como lo muestra la tabla 3.

Tabla 3. Bits de preescalamiento del reloj.

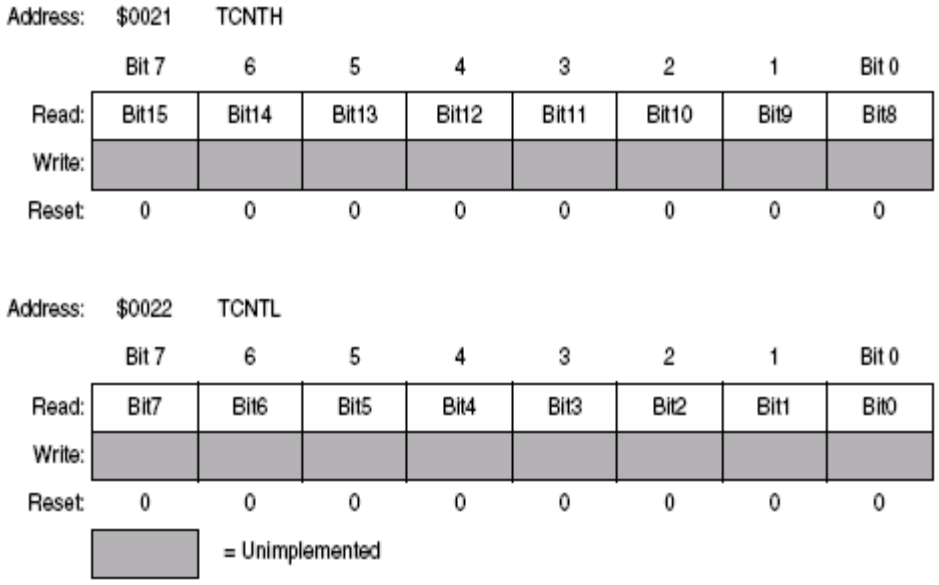
PS2	PS1	PS0	TIM Clock Source
0	0	0	Internal Bus Clock ÷ 1
0	0	1	Internal Bus Clock ÷ 2
0	1	0	Internal Bus Clock ÷ 4
0	1	1	Internal Bus Clock ÷ 8
1	0	0	Internal Bus Clock ÷ 16
1	0	1	Internal Bus Clock ÷ 32
1	1	0	Internal Bus Clock ÷ 64
1	1	1	Not available

Figura 39. Vectores TMODH y TMODL



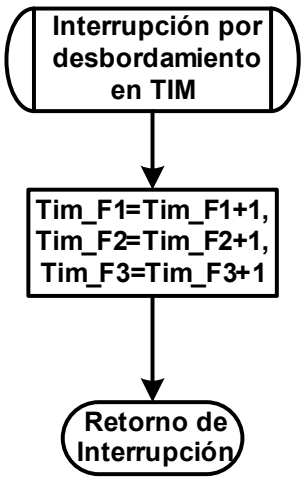
El TMODH y TMODL encargados de almacenar el valor tope del temporizador, es decir en el cual se debe generar el desbordamiento y a sí mismo la interrupción. El valor almacenado en estos registros ($A4_{16}$) por el periodo del bus equivale a los 0.7º.

Figura 40. Vectores TCNTH y TCNTL.



El TCNTH y TCNTL encargados de incrementar su valor de acuerdo a la frecuencia del bus en el microcontrolador y al preescalamiento que se halla realizado en el TSC, cuando el valor en estos dos registro es igual al valor contenido en el TMODH y TMODL se genera interrupción y estos vuelven a cero para reiniciar un nuevo conteo. La rutina de interrupción por desbordamiento del TIM se ve en la figura 41.

Figura 41. Algoritmo interrupción por desbordamiento de TIM.



En la entrada a la interrupción se incrementan los contadores correspondientes a los ángulos de cada fase para saber en que momento se debe realizar el disparo de los SCR's y tener el valor de medida para determinar la frecuencia de la de la línea de potencia el tiempo de ejecución de esta interrupción es de 7.2 µs.

2.2.4 código del programa. El código total del programa depurado y probado se muestra a continuación:

```
;*****************************************************************************
;* PROGRAMA DE CONTROL
;* SOFTWARE DISEÑADO PARA MICROCONTROLADOR MOTOROLA
;* 68HC908JL3
;* XTAL externo de 20MHz
;*****************************************************************************
;
XDEF  Entry,Inicio
INCLUDE 'jl3_registers.inc'
INCLUDE 'equs_Control_3f.inc'

_DATA_ZEROPAGE: SECTION
Adc_fl      RMB      1
Pw_f1       RMB      1
Pw_f2       RMB      1
Pw_f3       RMB      1
Pw_g        RMB      1
Tim_F       RMB      1
TS_f        RMB      1
TS_f1       RMB      1
Tim_F1      RMB      1
TS_f2       RMB      1
Tim_F2      RMB      1
TS_f3       RMB      1
Tim_F3      RMB      1

ROM:  SECTION
Inicio:
Entry:
bset        COPD,CONFIG1
mov         #$02,INTSCR
mov         #$38,DDRA
clr         PTA
clra
clrh
clrx
clr         Adc_fl
```

```
clr         TS_f1
clr         Tim_F1
clr         TS_f2
clr         Tim_F2
clr         TS_f3
clr         Tim_F3
jsr         ADCSetup
jsr         KBISetup
jsr         TIMSetup
bclr        IMASKK,KBSCR
cli
bset        Cf1_fl,Adc_fl
bclr        Cf2_fl,Adc_fl
bclr        Cf3_fl,Adc_fl
bclr        Cg_fl,Adc_fl
        bclr        TSTOP,TSC
Loop:
lda         #$0f
and         Adc_fl
cbeqa       #$01,Rd_f1
cbeqa       #$02,Rd_f2
cbeqa       #$04,Rd_f3
cbeqa       #$08,Rd_G
lda         Tim_F1
cmp         TS_f1
beq         Shot1
Ver_T2:
lda         Tim_F2
cmp         TS_f2
beq         Shot2
Ver_T3
lda         Tim_F3
cmp         TS_f3
beq         Shot3
jmp         Loop
Rd_f1:
mov         #$40,ADSCR
bclr        Cf1_fl,Adc_fl
jmp         Loop
Rd_f2:
mov         #$41,ADSCR
bclr        Cf2_fl,Adc_fl
jmp         Loop
Rd_f3:
mov         #$42,ADSCR
```

```
bclr        Cf3_fl,Adc_fl
jmp         Loop
Rd_G:
mov         #$43,ADSCR
bclr        Cg_fl,Adc_fl
jmp         Loop
Shot1:
bset        Triac_1,PTA
jmp         Ver_T2
Shot2:
bset        Triac_2,PTA
jmp         Ver_T3
Shot3:
bset        Triac_3,PTA
jmp         Loop
AdjFrec:
Lda         Ver_Tim,x
        sta         TS_f
        lda         Tim_F
        cmp         #$fe
        bhs         CntLdShot
        cmp         #$00
        beq         CntLdShot
        cmp         #$fa
        bhs         Adj61
        cmp         #$f6
        bhs         Adj62
        cmp         #$06
        bls         Adj59
        cmp         #$0a
        bls         Adj58
        jmp         CntLdShot
Adj61:
        Ldx         #$3c
        mul
        pshx
        pulh
        ldx         #$3d
        div
        sta         TS_f
        jmp         CntLdShot
Adj62:
        ldx         #$3c
        mul
        pshx
```

```
        pulh
        ldx     #$3e
        div
        sta     TS_f
        jmp     CntLdShot
Adj59:
        Ldx     #$3c
        mul
        pshx
        pulh
        ldx     #$3b
        div
        sta     TS_f
        jmp     CntLdShot
Adj58:
        ldx     #$3c
        mul
        pshx
        pulh
        ldx     #$3a
        div
        sta     TS_f
CntLdShot:
        rts
ADCSetup:
mov     #$80,ADICLK
rts
KBISetup:
bset    IMASKK,KBSCR
mov     #$07,KBIER
bset    ACKK,KBSCR
rts
TIMSetup:
mov     #$60,TSC
mov     #$00,TMODH
mov     #$A4,TMODL
rts
Ld_shot1:
bclr    Triac_1,PTA
        mov     Tim_F1,Tim_F
        lda     Pw_g
        sub     Pw_f1
        tax
        jsr     AdjFrec
        mov     TS_f,TS_f1
```

```
        clr     Tim_F1
        pulh
        rti
Ld_shot2:
        bclr    Triac_2,PTA
        mov     Tim_F2,Tim_F
        lda     Pw_g
        sub     Pw_f2
        tax
        jsr     AdjFrec
        mov     TS_f,TS_f2
        clr     Tim_F2
        pulh
        rti
Ld_shot3:
        bclr    Triac_3,PTA
        mov     Tim_F1,Tim_F
        lda     Pw_g
        sub     Pw_f3
        tax
        jsr     AdjFrec
        mov     TS_f,TS_f3
        clr     Tim_F3
        pulh
        rti
Cero_det:
pshh
clrh
brclr   Shot_f1,PTA,Ld_shot1
brclr   Shot_f2,PTA,Ld_shot2
brclr   Shot_f3,PTA,Ld_shot3
bset    ACKK,KBSCR
pulh
rti
Load_Power:
lda     ADSCR
and     #$0F
cbeqa   #$00,Ld_P1
cbeqa   #$01,Ld_P2
cbeqa   #$02,Ld_P3
cbeqa   #$03,Ld_Pg
rti
Ld_P1:
mov     ADR,Pw_f1
bset    Cf2_fl,Adc_fl
```

```
rti
Ld_P2:
mov         ADR,Pw_f2
bset        Cf3_fl,Adc_fl
rti
Ld_P3:
mov         ADR,Pw_f3
bset        Cg_fl,Adc_fl
bset        Cf1_fl,Adc_fl
rti
Ld_Pg:
mov         ADR,Pw_g
bset        Cf1_fl,Adc_fl
rti
Inc_Timers:
Inc         Tim_F1
Tim_2:
Inc         Tim_F2
Tim_3:
Inc         Tim_F3
Fin_Tim:
bclr        TOF,TSC
rti
Ver_Tim:
fcb         01
fcb         01
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
        fcb         02
```

```
fcb     02
fcb     02
fcb     03
fcb     03
fcb     03
fcb     03
fcb     03
fcb     03
fcb     04
fcb     04
fcb     04
fcb     04
fcb     04
fcb     05
fcb     05
fcb     05
fcb     05
fcb     05
fcb     06
fcb     06
fcb     07
fcb     07
fcb     08
fcb     08
fcb     09
fcb     09
fcb     10
fcb     10
fcb     11
fcb     12
fcb     12
fcb     13
fcb     14
fcb     14
fcb     15
fcb     16
fcb     17
fcb     17
fcb     18
fcb     19
fcb     20
fcb     21
fcb     22
fcb     23
fcb     24
```

```
fcb     25
fcb     26
fcb     27
fcb     28
fcb     29
fcb     30
fcb     32
fcb     33
fcb     34
fcb     35
fcb     36
fcb     38
fcb     39
fcb     40
fcb     42
fcb     43
fcb     45
fcb     46
fcb     47
fcb     49
fcb     50
fcb     52
fcb     53
fcb     55
fcb     57
fcb     58
fcb     60
fcb     61
fcb     63
fcb     65
fcb     66
fcb     68
fcb     70
fcb     72
fcb     73
fcb     75
fcb     77
fcb     79
fcb     80
fcb     82
fcb     84
fcb     86
fcb     88
fcb     90
fcb     92
```

```
fcb     94
fcb     96
fcb     98
fcb     99
fcb     101
fcb     103
fcb     105
fcb     107
fcb     109
fcb     111
fcb     113
fcb     115
fcb     117
fcb     119
fcb     121
fcb     123
fcb     125
fcb     127
fcb     129
fcb     131
fcb     133
fcb     135
fcb     137
fcb     139
fcb     141
fcb     143
fcb     145
fcb     147
fcb     149
fcb     151
fcb     153
fcb     155
fcb     157
fcb     159
fcb     161
fcb     162
fcb     164
fcb     166
fcb     168
fcb     170
fcb     172
fcb     174
fcb     176
fcb     177
fcb     179
```

```
fcb     181
fcb     183
fcb     184
fcb     186
fcb     188
fcb     190
fcb     191
fcb     193
fcb     195
fcb     196
fcb     198
fcb     199
fcb     201
fcb     203
fcb     204
fcb     206
fcb     207
fcb     209
fcb     210
fcb     210
fcb     212
fcb     214
fcb     216
fcb     217
fcb     218
fcb     220
fcb     221
fcb     222
fcb     223
fcb     224
fcb     226
fcb     227
fcb     228
fcb     229
fcb     230
fcb     231
fcb     232
fcb     233
fcb     234
fcb     235
fcb     236
fcb     237
fcb     238
fcb     239
fcb     239
```

```
fcb     240
fcb     241
fcb     242
fcb     242
fcb     243
fcb     244
fcb     244
fcb     245
fcb     246
fcb     246
fcb     247
fcb     247
fcb     248
fcb     248
fcb     249
fcb     249
fcb     250
fcb     250
fcb     251
fcb     251
fcb     251
fcb     252
fcb     252
fcb     252
fcb     253
fcb     253
fcb     253
fcb     253
fcb     254
fcb     254
fcb     254
fcb     254
fcb     254
fcb     254
fcb     255
fcb     255
fcb     255
fcb     255
fcb     255
fcb     255
fcb     255
fcb     255
fcb     255
```

```
        fcb         255
        fcb         255
        fcb         255
        fcb         255
        fcb         255
        fcb         255
        fcb         255
        fcb         255
        fcb         255
        fcb         255
org     FLBPR
        FCB         $00
org     EndADCInt
        FDB         Load_Power
org     IntKeyB
        FDB         Cero_det
org     OvTimInt
        FDB         Inc_Timers
```

3. CONEXIONADO Y PUESTA EN MARCHA DEL REGULADOR

3.1 CARACTERISTICAS DEL GENERADOR Y PRIMOTOR.

Se utilizó un generador síncrono de 10kVA, cuatro polos, 1800 rpm, 60Hz, tensión de salida 220/127V, tensión de excitación 120VDC, corriente de excitación de 2,5A.

El primotor que mueve el generador es un motor de corriente continua de 15kW, voltaje nominal 220VDC, 1800 rpm, tensión de excitación 220VDC, corriente de excitación 0.7Amp, Corriente Nominal 79Amp.

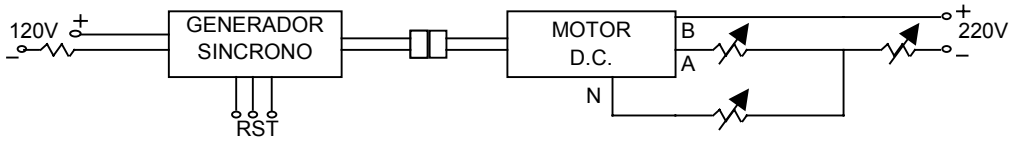
Los anteriores equipos existentes en el laboratorio de máquinas de la Universidad Industrial de Santander.

3.2 CONEXIONADO DEL GENERADOR Y PRIMOTOR.

El generador es movido por un primotor, compuesto por un motor de corriente continua en conexión shunt, con una potencia nominal de 8kVA, corriente de excitación de 70A, tensión nominal 125VDC.

El conexionado del generador se puede apreciar en la figura 40.

Figura 42. Conexionado del generador.

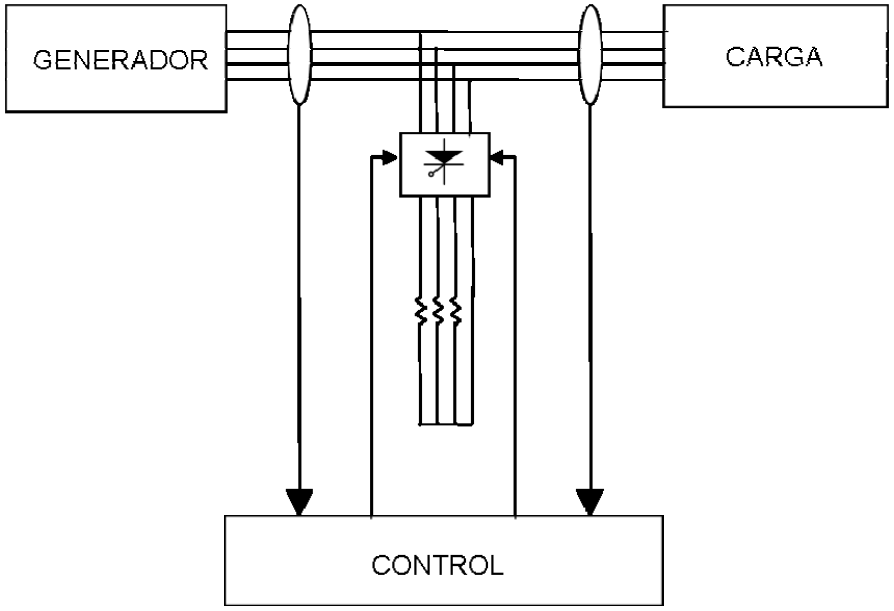


3.3 CONEXIONADO DEL REGULADOR DE CARGA.

El regulador se encarga de manejar la carga a través del balasto como una diferencia entre la potencia a la salida del generador y la potencia a la entrada de la carga, de acuerdo con esto el regulador, en su etapa de potencia, se instala en una conexión en T en la que en sus extremos cortos se conecta el generador y la carga y en extremo restante se conecta el balasto. Igualmente el control censa la potencia del generador y la potencia de la carga con los transformadores de corriente instalados en su extremos cortos para de esta manera se controle la potencia disipada por el balasto por el método llamado control por ángulo de fase. La conexión de la carga y el balasto se realiza en estrella con centro a neutro, para lograr entregar a los usuarios un voltaje de 127V entre fase y neutro.

Lo anteriormente expuesto se resume en la figura 41.

Figura 43. Conexionado del regulador.



3.4 PUESTA EN MARCHA GENERADOR Y REGULADOR.

El primer paso para la puesta en marcha del generador es realizar las conexiones del generador y del regulador como se puede ver en los numerales 3.2 y 3.3.

Una vez se realicen y revisen las conexiones se procede a desconectar la carga y seguidamente se arranca el primotor hasta lograr el voltaje nominal del generador teniendo en cuenta que el balasto esta conectado y que se realiza un arranque del generador con carga.

Una vez se tenga el generador bajo condiciones nominales, 220V voltaje línea a línea y 60Hz, se procede a tomar carga verificando que el voltaje del balasto se reduzca a medida que se tome carga.

En estas condiciones el control esta en capacidad de regular el sistema con los cambios de carga.

4. PRUEBAS DE LABORATORIO

Se realizo el montaje del regulador conforme la conexión indicada en al figura 42 y se continuo con el procedimiento de arranque como se indico en el capitulo anterior numeral 3.4.

Se tomaron datos de tensión de fase y corriente de línea a través del shunt, comenzando con una corriente en el balasto de 26.6Amp RMS y una corriente de 0Amp RMS en la carga, realizando medidas con Incrementos de 3Amp RMS.

Igualmente para las medidas de corriente se utilizo un Shunt 100Amp y 60mv. La figura 44 ilustra el proceso de medición obteniéndose el siguiente resultado:

Figura 44. Mediciones en el laboratorio.

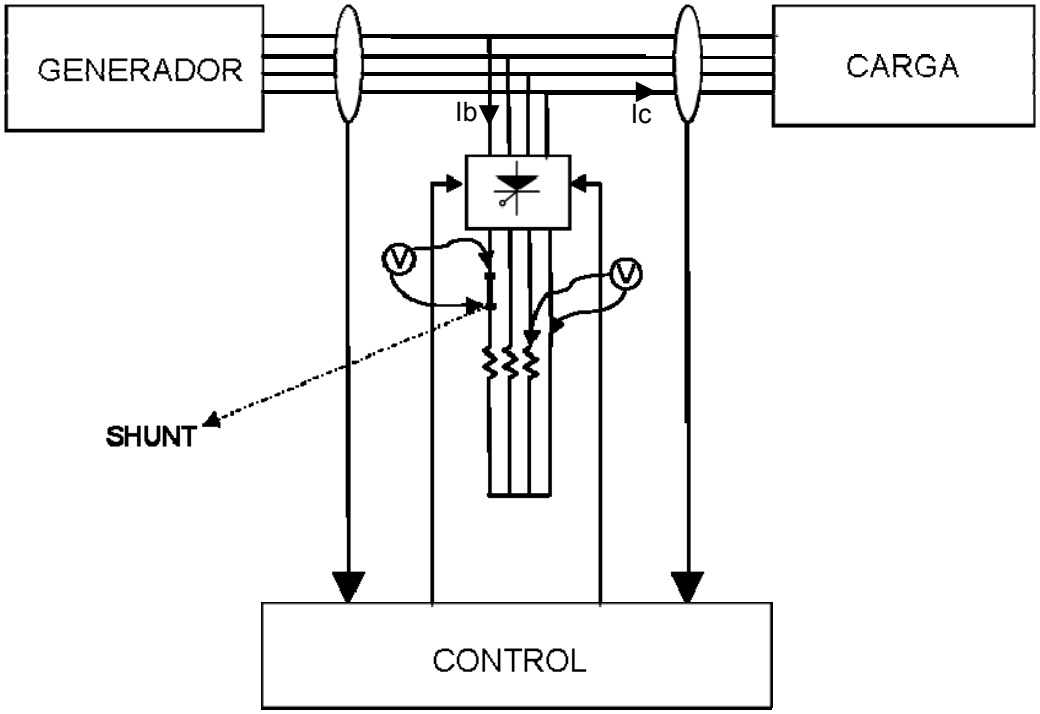


Figura 45. Oscilograma tensión de balasto para Ib = 26.7Arms Ic = 0 Arms

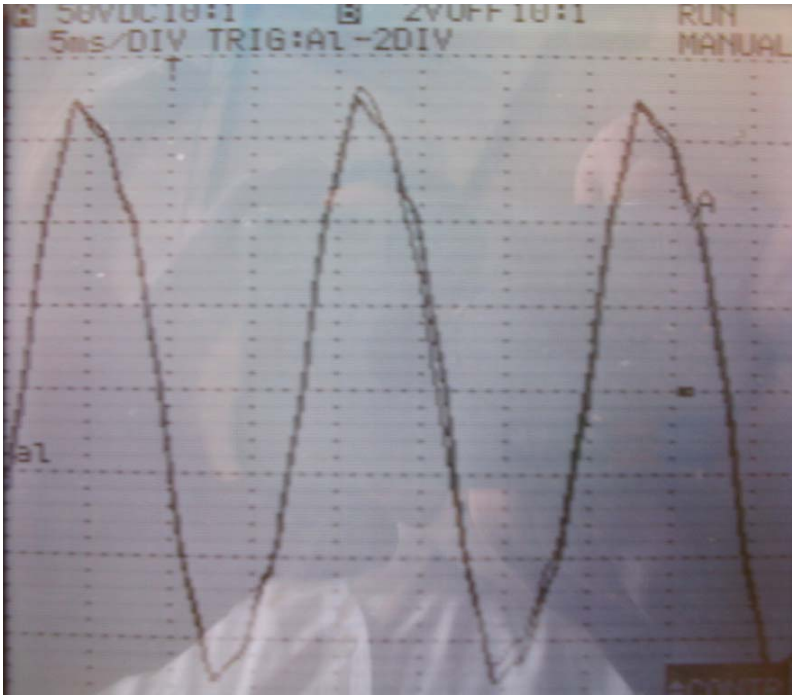


Figura 46. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 26.7Arms Ic = 0Arms.

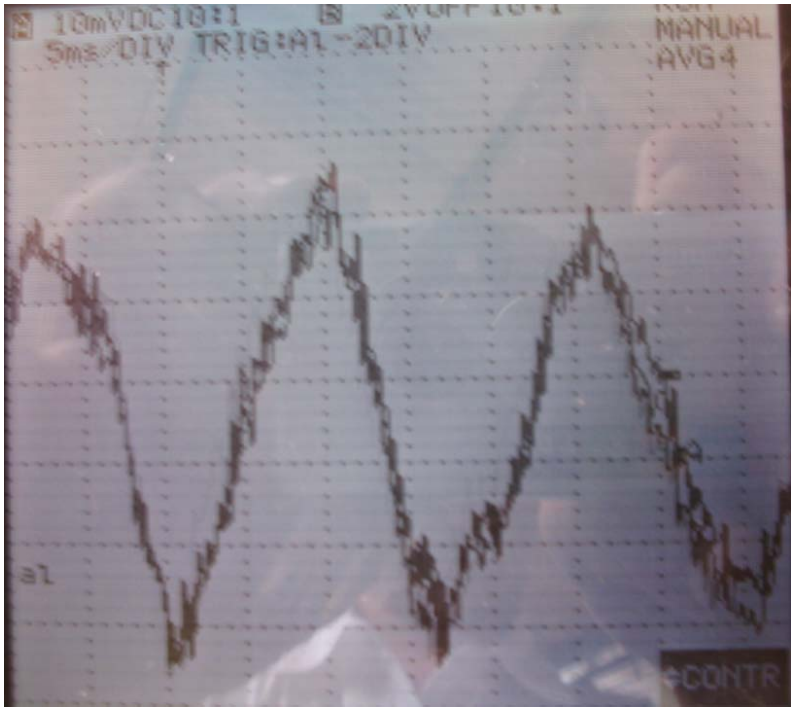


Figura 47. Oscilograma tensión de balasto para Ib= 25.3Arms Ic = 3.2Arms.

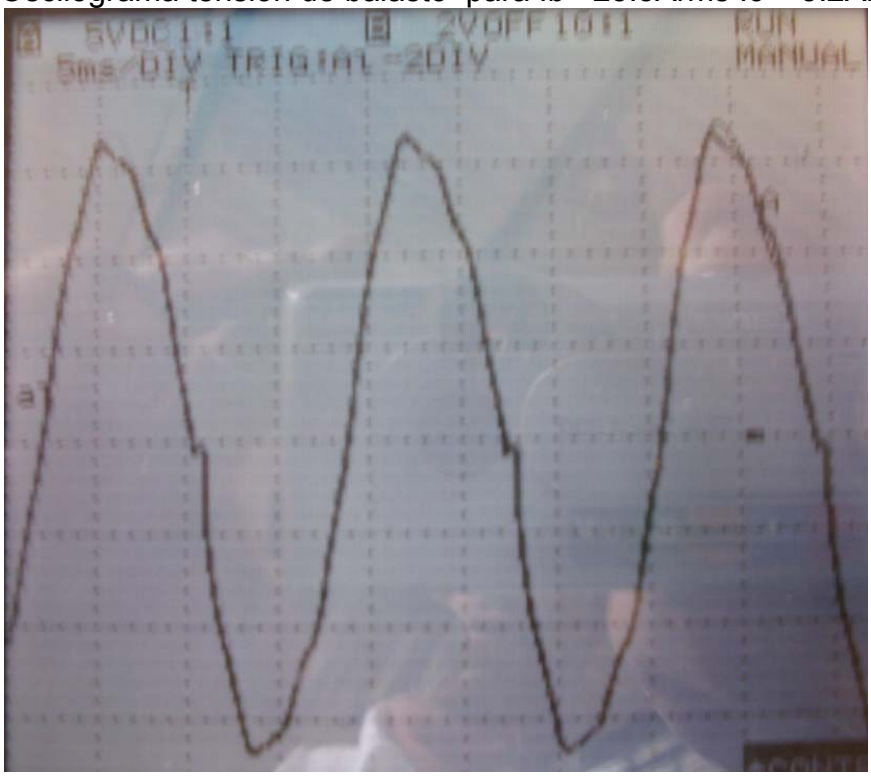


Figura 48. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 25.3Arms Ic = 3.2Arms.

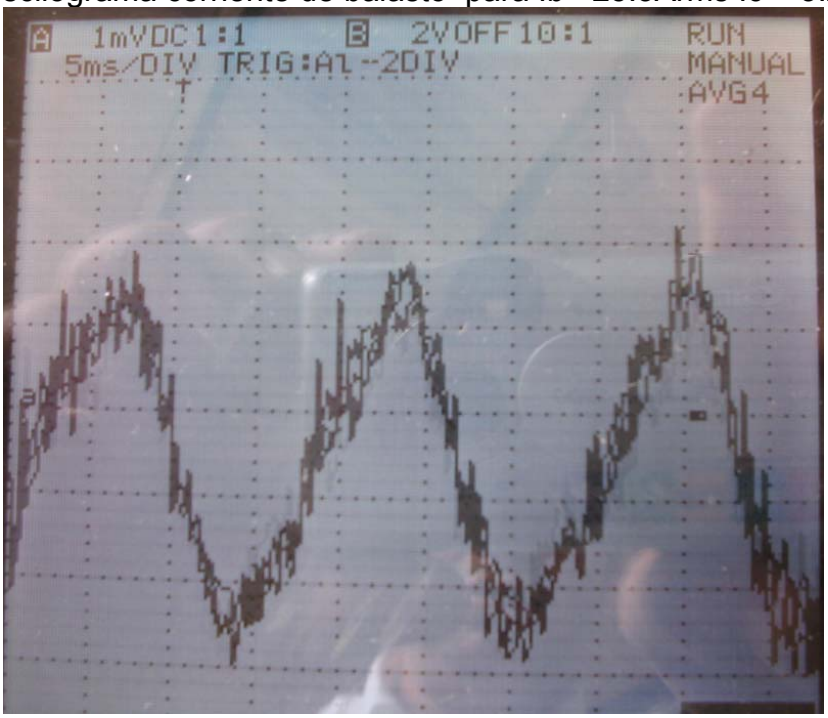


Figura 49. Oscilograma tensión de balasto para Ib= 23.7Arms Ic = 5.9Arms.

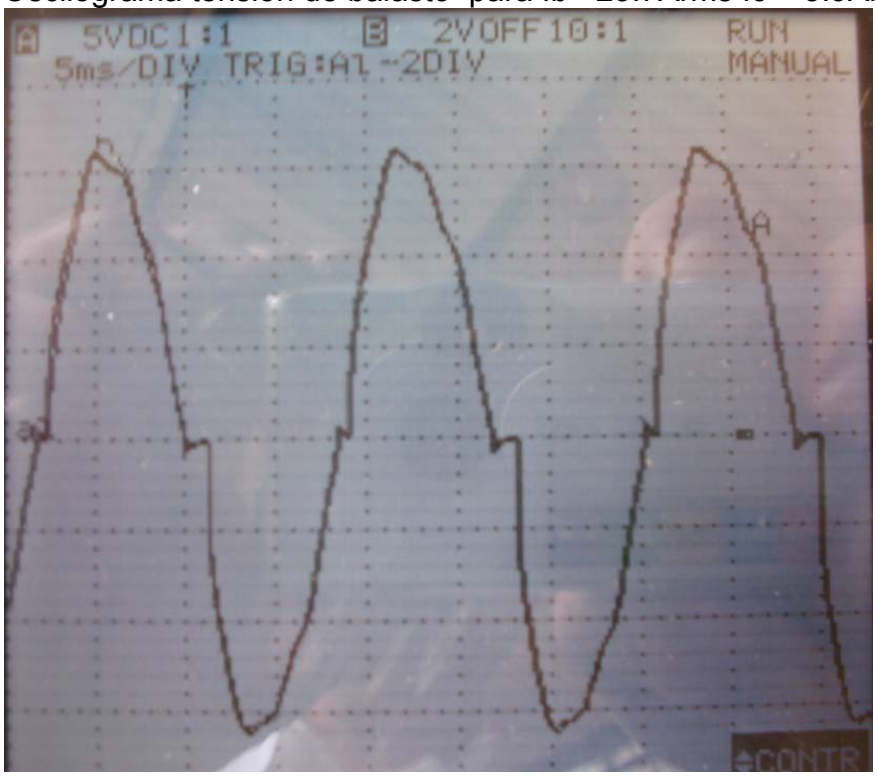


Figura 50. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 23.7Arms Ic = 5.9Arms.

Figura 51. Oscilograma tensión de balasto para Ib = 20.3Arms Ic = 9.0Arms.

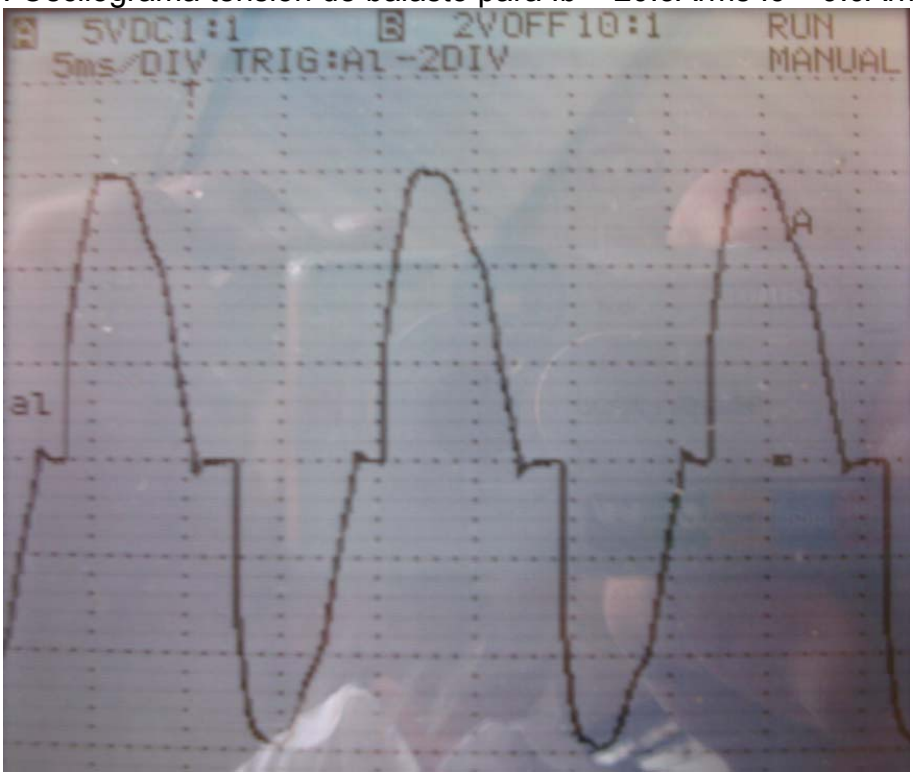


Figura 52. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 20.3Arms Ic = 9.0Arms.

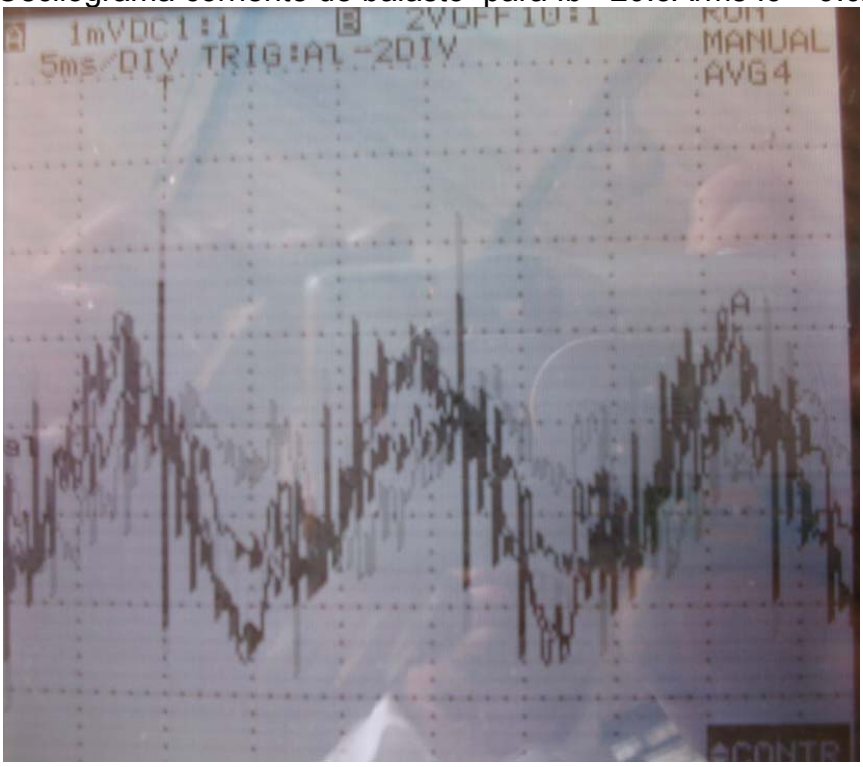


Figura 53. Oscilograma tensión de balasto para Ib = 16.6Arms Ic = 12.1Arms.

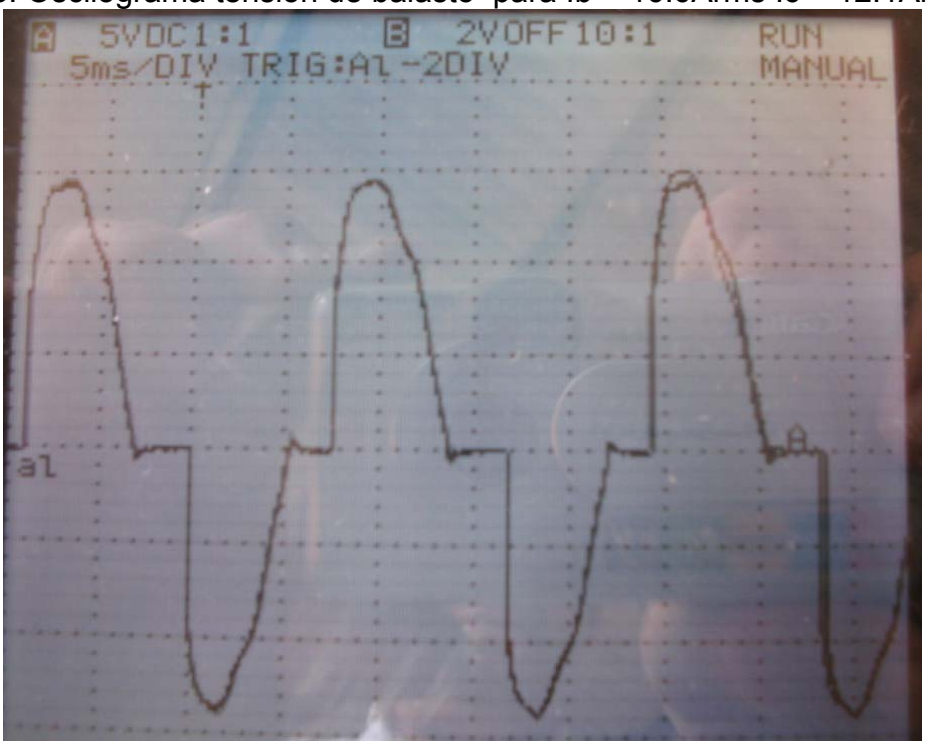


Figura 54. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 16.6Arms Ic = 12.1Arms.

Figura 55. Oscilograma tensión de balasto para Ib= 12.9Arms Ic = 15.1Arms.

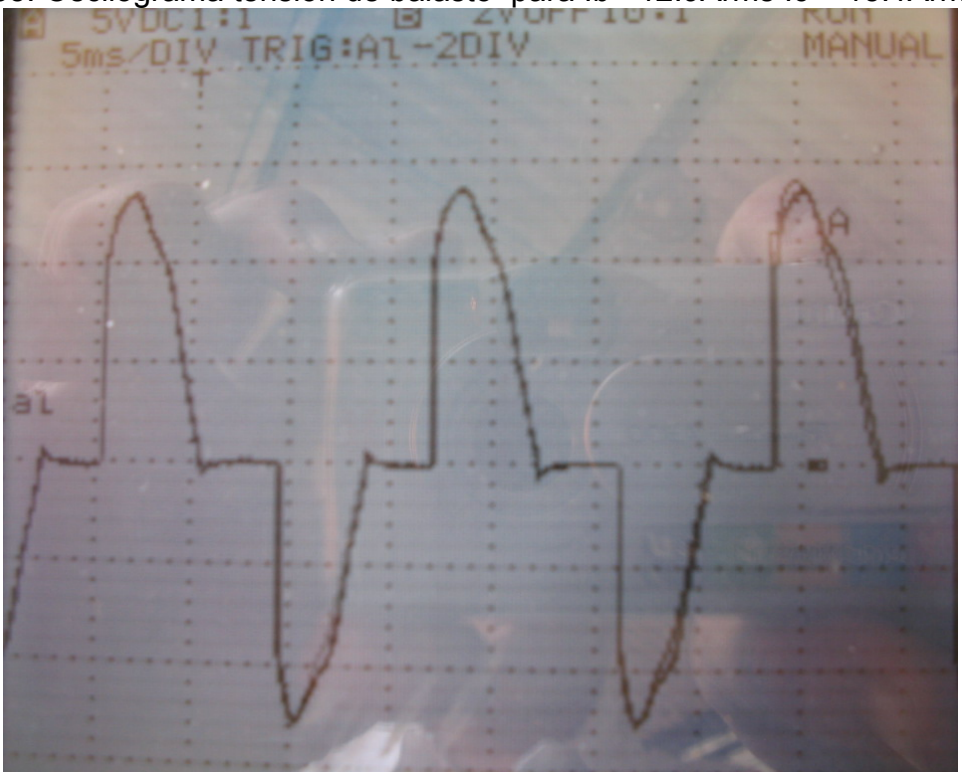


Figura 56. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 12.9Arms Ic = 15.1Arms.

Figura 57. Oscilograma tensión de balasto para Ib= 8.4Arms Ic= 18.1Arms.

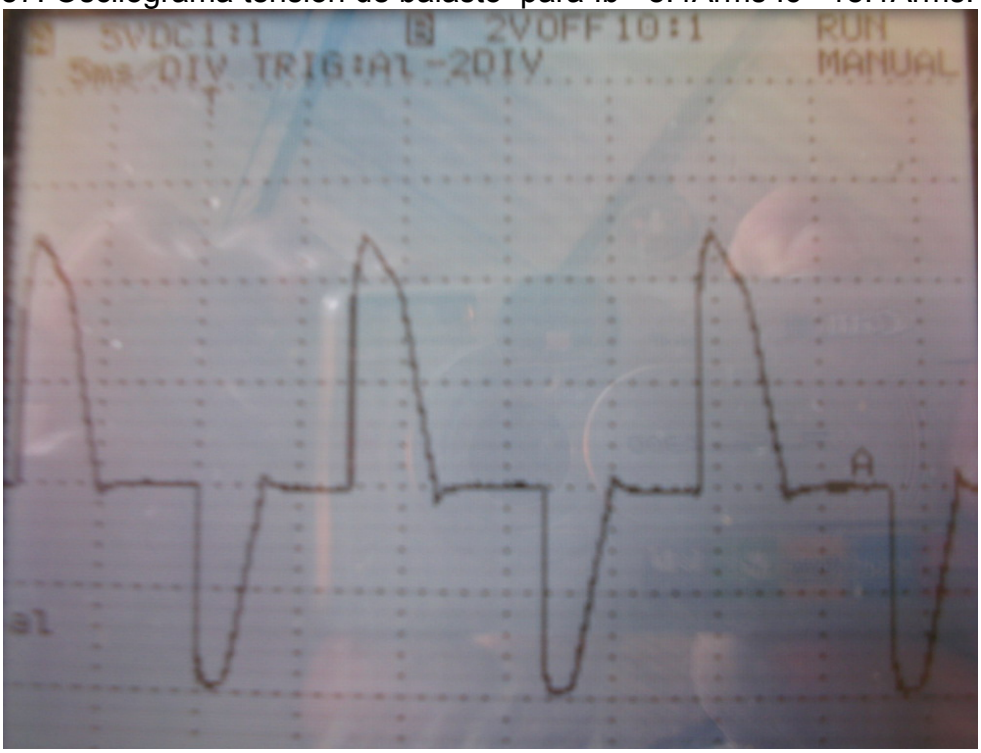


Figura 58. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 8.4Arms Ic= 18.1Arms.

Figura 59. Oscilograma tensión de balasto para Ib= 5.2Arms Ic= 21.2Arms.

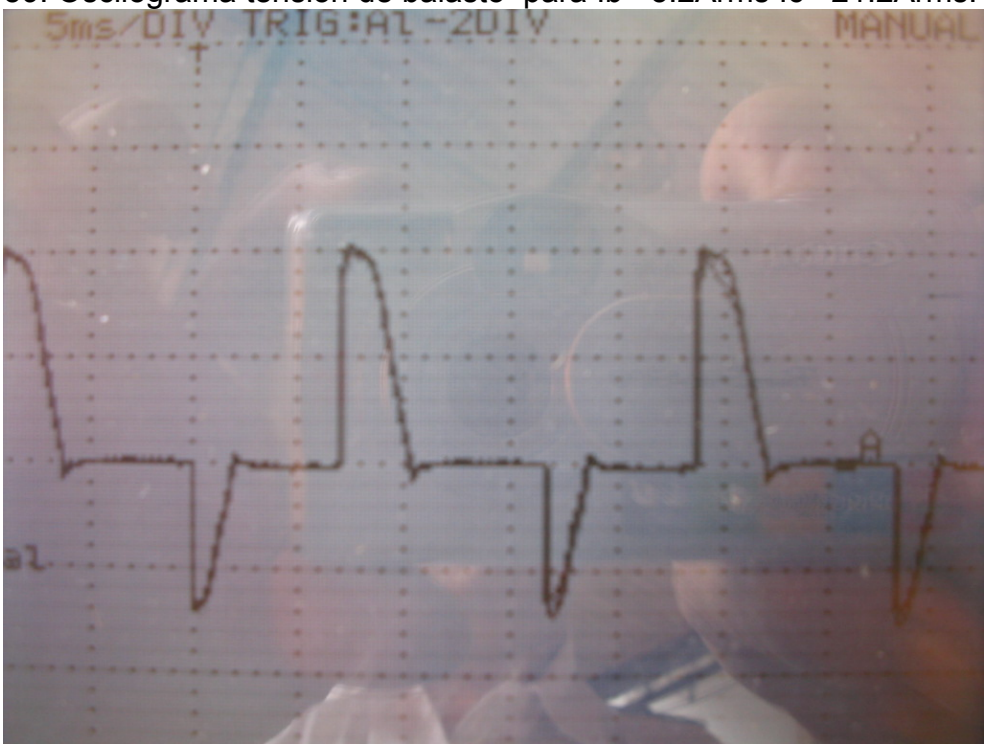


Figura 60. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 5.2Arms Ic= 21.2Arms.

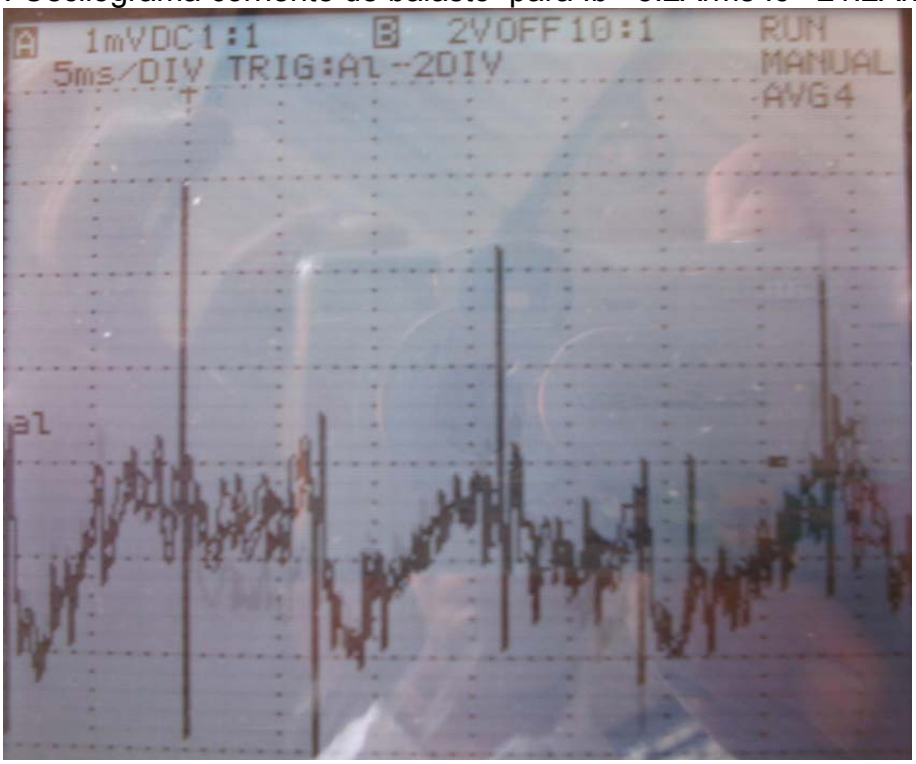


Figura 61. Oscilograma tensión de balasto para Ib = 3.8Arms Ic= 24.2Arms.

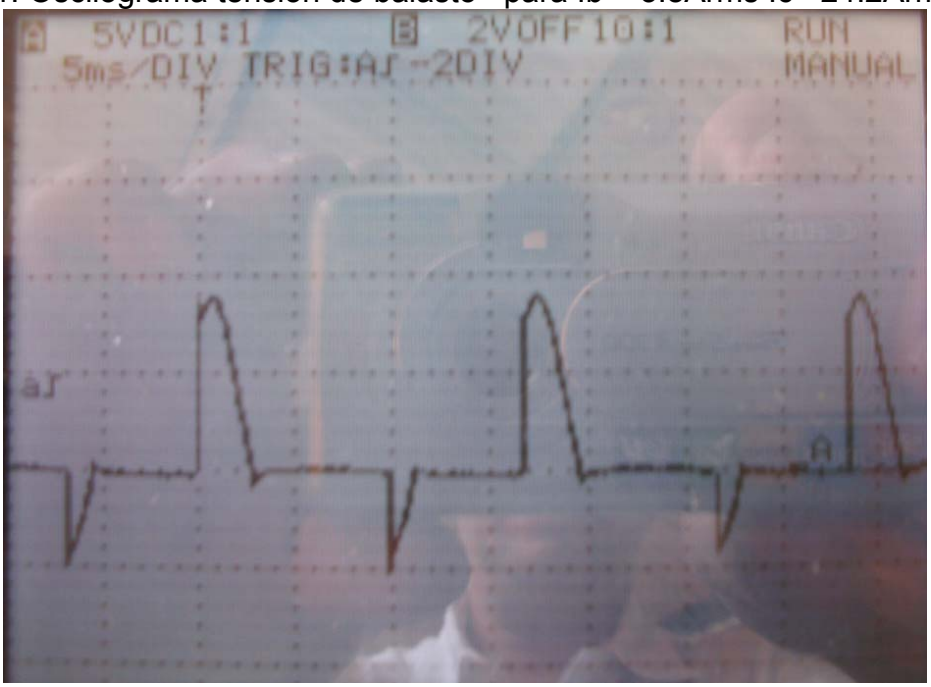


Figura 62. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 3.8Arms Ic= 24.2Arms.

Figura 63. Oscilograma tensión de balasto para Ib= 3.1Arms Ic= 26.3Arms.

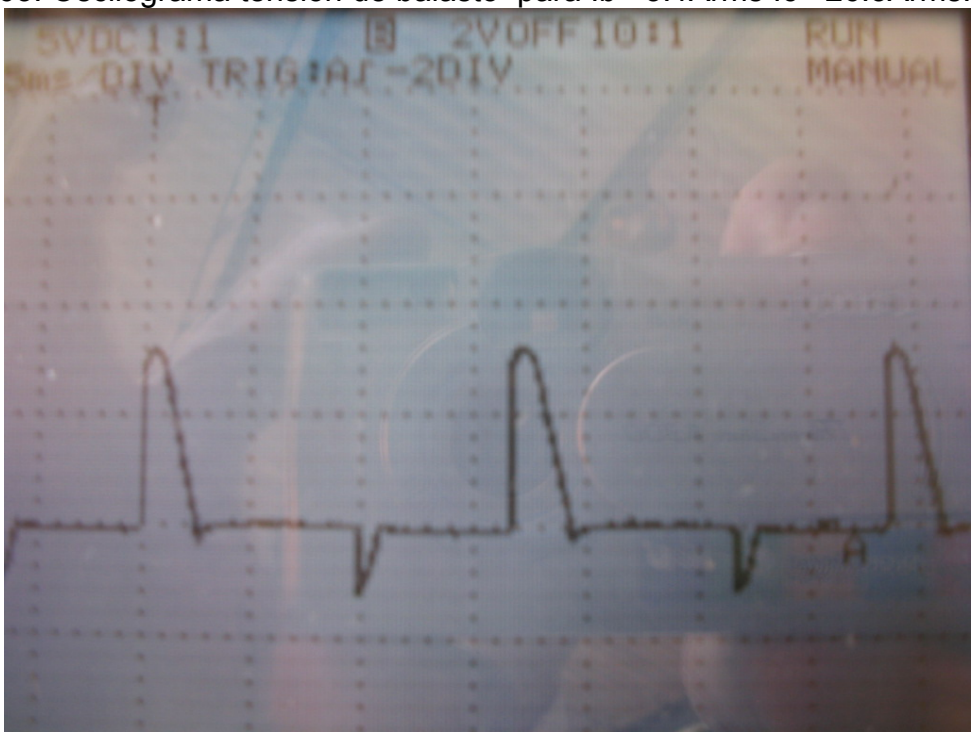
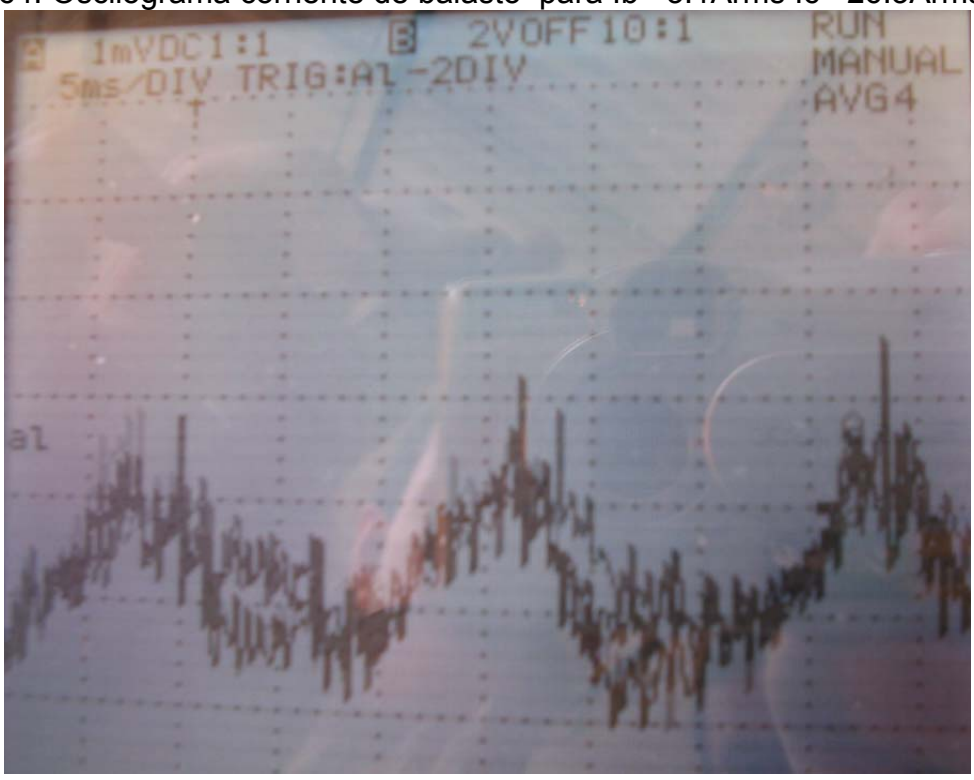


Figura 64. Oscilograma corriente de balasto para Ib= 3.1Arms Ic= 26.3Arms.



5. CONCLUSIONES

La medida de la potencia tanto en la carga como en el generador, realizada con transductores de potencia, es más eficiente y ventajosa con respecto a las medidas de voltaje, corriente y cosenofi realizadas al inicio de la tesis, debido a que de esta manera se minimizan los errores involucrados en la medición de cada parámetro e igualmente se obtiene una reducción en el código del programa.

Para los cálculos del ángulo de disparo de los SCR's, el control evalúa la potencia disipada en el balasto, obteniéndose el tiempo de retardo para el disparo, que sincronizado con la señal de voltaje se ajusta por programa a las fluctuaciones en la frecuencia, obteniéndose un control mas exacto que permite más sensibilidad de este a los cambios de la frecuencia.

La alimentación de la fuente de poder del control a partir del voltaje generado, en conclusión es muy conveniente para el funcionamiento del regulador, debido a que en sitios aislados en los que no se cuenta con energía externa no seria posible operar el sistema en forma óptima e independiente.

El regulador de carga diseñado y construido, requiere para su funcionamiento de una fuente de agua suficiente, para obtener una potencia nominal generada constante, en los periodos de baja carga del usuario esta potencia se transfiere al balastro, razón por la cual se requiere darle un uso adecuado a esta potencia en beneficio de la comunidad como es el uso de esta energía para quemar residuos de basura en la planta de campos del caserío o el aprovechamiento en un circulo de agua caliente para distribuir a todos los usuarios.

El regulador de carga logrado en esta tesis es un experiencia en la que se incursiono en los campos de la ingeniería, como son la electrónica industrial, el

control con microprocesadores y la implementación de la captura de datos con transductores de potencia y circuitos con amplificadores operacionales, haciendo posible el desarrollo de soluciones para el suministro de energía a comunidades aisladas.

De la observación del oscilograma 19 obtenido en el laboratorio, se concluye que no se logra una transferencia total de la corriente del balasto a la carga, debido a que la tensión aplicada al balasto no fue exactamente cero, presentándose igualmente asimetría en la onda razón por la cual se disipa una corriente de 3 Amp. RMS en el balasto, cuando la potencia disipada por la carga llega a su valor máximo de 26.3 Amp. RMS.

De la observación de los oscilogramas de tensión del balasto numero 17 y 19 obtenidos en el laboratorio, se concluye que la asimetría en la señal de voltaje, hace que se presente una componente de continua en la señal, además de un alto contenido de armónicos en la corriente del balasto, incidiendo finalmente en la señal de voltaje que recibe el usuario.

En conclusión se observa que el hecho de manejar un balasto con un regulador electrónico, introduce armónicos en su señal, razón por la cual, es conveniente realizar un estudio en un trabajo de tesis de grado posterior, que analice y reduzca el contenido de armónicos en la red del usuario.

BIBLIOGRAFIA

GURU, Bhag S. y HIZIROGLU, Huseyin R. Máquinas eléctricas y transformadores, OXFORD UNIVERSITY PRESS , 2003.

BERGS, Paul. Controlling the word with your PC, HIGHTEXT PUBLICATIONS INC,1994.

CATHEY, Jimmie J. Máquinas Eléctricas, McGRAW HILL, 2002.

ORTIZ FLÓREZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas, McGRAW HILL, 2001.

OGATA, Katsuhiko. Sistemas de control en tiempo Discreto, PRENTICE HALL,1996.

NTE ELECTRONICS INC. Technical guide and cross reference, 2003.

TECNICAL DATA. HCMOS microcotroller unit, MOTOROLA, 1999.