

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**INDUSTRIA NACIONAL DE CEMENTO S.A.**

**INCSA**

**Diseño de prototipo de fuente controlada de voltaje para motor trifásico, de rotor bobinado**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el Grado de Bachiller en Ingeniería Electrónica**

**Lizandro Salazar Hernández**

**Cartago, Junio del 2002**

## **Dedicatoria**

Este singular trabajo y logro es para mi madre, que siempre con su gran ayuda, apoyo, grande y objetiva visión de la vida me apoyo en todo momento y en todas las circunstancias que he vivido hasta el presente.

Muchas gracias mami.

## **Agradecimiento**

En primera instancia el muy profundo y sincero agradecimiento a mi mamá y mis hermanos, porque siempre conté con ellos y mi hicieron descubrir el valor de la superación, dedicación y esfuerzo, así como el de la unión, entendimiento y comprensión.

A muchas, pero muchas otras personas que con su pequeño aporte colaboraron en cierta forma en los alcances de mis metas; la formación tanto académica como integral de mi persona.

Por último al Ing. Federico Navarro C., a quien con su gran aporte profesional me guió de manera impresionante por un mundo de conocimientos y, también me inculcó grandes valores para mi vida personal.

## RESUMEN

En el proceso de distribución de energía eléctrica, las compañías que se encargan de generarla y distribuirla deben de velar por el mejor aprovechamiento de la misma, suministrando a cada usuario la misma calidad del producto y evitando al máximo el desperdicio y las pérdidas. Para lograrlo, las compañías de generación y de distribución aplican regulaciones y multas a las grandes empresas y fábricas que no cumplen con ciertos rangos en la utilización de la electricidad. Uno de los parámetros a respetar es el factor de potencia (fp), el cual es el desfase que se produce entre el fasor de voltaje y el fasor de corriente. En el caso de las fábricas, que en su mayoría cuenta con motores (elementos inductivos), se produce un atraso de la corriente con respecto al voltaje, produciendo pérdidas en las líneas de transmisión, por ello se debe de corregir este problema.

Con la utilización de semiconductores de potencia, se logra conseguir aumentar la eficiencia en la utilización de los recursos ya disponibles, tanto en la parte de control como en los propios elementos manejados por estos, como por ejemplo: la utilización de variadores de frecuencia para el arranque de motores, la utilización de relevadores de estado sólido. En este caso en particular en la creación de una fuente de voltaje de corriente continua, diseñada con tiristores para tener la característica que sea controlada. Con ella se excita el rotor de un motor trifásico, para tener control sobre el valor del fp.

En este proceso de rectificación para altas corriente se debe cuidar otro de los parámetros que son regulados, como lo es la generación de armónicos en la línea, las cuales degeneran la calidad de la forma de onda senoidal que suministra la compañía. Para evitar este problema se procede a realizar un diseño de dos rectificadores trifásicos, formado por seis tiristores (convertidor de 6 pulsos), que se conectan en paralelo para lograr mayor corriente de salida, formando el denominado convertidor de 12 pulsos, que reduce la cantidad de armónicas. Para poder interconectar los dos convertidores de 6 pulsos, se necesita hacer por medio de un transformador de acople y para poder implementar el convertidor de doce pulsos, el transformador que alimenta a los dos de 6, es de características muy especiales, con un devanado primario en conexión delta y, dos secundarios uno conectado en delta y el otro en estrella, para lograr el buen funcionamiento del conjunto. También la parte de control de disparo de los tiristores debe ser adecuada a este sistema de 12 pulsos.

**Palabras clave:** rectificador controlado, convertidor, 6 pulsos, 12 pulsos, SCR, tiristor, factor de potencia, armónicos, fuente cd, rotor bobinado.

## ABSTRACT

In the process of distribution of electric energy, the companies that take it upon to generate it and distribute it should watch over for the better utilization of the same, giving each user the same quality of the product and avoiding the maximum the waste and the losses. In order to achieve it, the companies of generation and they of distribution apply regulations and fines to the big companies and factories that they don't fulfill certain ranges in the utilization of the electricity. One of the parameters to respect is the power factor (pf), the phase difference that is produced between the voltage vector and the current vector. In the case of the factories, that in their majority relies on motors (inductive element), a backwardness of the current is produced with concerning the voltage, producing loss in the lines of transmission, for it should be corrected this problem.

With the utilization of semiconductors of capacity, it are succeeded in getting increase the efficiency in the utilization of the resources already available, so much in the part of control like in the own element managed by these. Like for example: the utilization of changer frequency for the starts of motors, the utilization of rele of state solid. In this case in particular in the creation of a source of voltage of direct current, designed with thyristors to have the characteristic that is controlled. It with her get excited the rotor of a motor triphase, in order to have control on the value of the fp.

In this process of rectification for tall current should look after another of the parameters that are regulated, like him is the generation of harmonics in the line, the which degenerate the quality of the form of wave sinusoidal that gives the company. In order to avoid this problem it are proceeded to carry out a design of two triphase rectifiers, formed by six thyristors (converter of 6 pulses), that is connected in parallel to achieve current output, forming the called converter of 12 pulses, that reduces the quantity of harmonics. In order to could interconnect the two converter of 6 pulses, it are needed to make by means of a transformer of it couple and to can make the converter of twelve pulses, the transformer that feeds at two of 6, it is of characteristic very special, with a winding primary in connection wye and, two windings secundaries, one connected in wye and the other in star, to achieve the good operation of the group. Also the part of control of shooting of the thyristors should be adequate to this system of 12 pulses.

Keywords: controlled rectifier, converter, 6 pulses], 12 pulses, SCR, thyristor, power factor, harmonics, cd source, winding rotor .

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>8</b>	
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
1.1	Descripción de la empresa	9
1.2	Definición del problema y su importancia	11
1.3	Objetivos	13
1.3.1	General	13
1.3.2	Específicos	13
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	<b>15</b>
2.1	Estudio del problema a resolver	15
2.2	Requerimientos de la empresa	19
2.3	Solución propuesta	21
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO</b>	<b>24</b>
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE UTILIZADO</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>36</b>
6.1	Explicación del diseño	36
6.2	Alcances y limitaciones	42
<b>CAPÍTULO 7</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>45</b>
7.1	Conclusiones	45
7.2	Recomendaciones	47
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>49</b>

<b>B1 Libros</b>	<b>49</b>
<b>B2 Sitios en Internet (páginas web)</b>	<b>49</b>
<b>APÉNDICES Y ANEXOS</b>	<b>52</b>
<b>Apéndice A.1: Simulación de un convertidor de 6 pulsos, con el programa Semisel y el tiristor SKT760 de Semikron.</b>	<b>52</b>
<b>APÉNDICE A.2: Cálculo del transformador de interfase</b>	<b>54</b>
<b>APÉNDICE A.3: Mediciones de corriente y voltaje en el momento de arranque y el régimen permanente del motor del molino 3</b>	<b>56</b>
<b>APÉNDICE A.4: Datos de la placa del motor y del generador excitador del molino 3</b>	<b>58</b>
<b>Apéndice A.5 Ecuaciones</b>	<b>59</b>
<b>Apéndice A.6 Glosario de términos y lista de abreviaturas</b>	<b>60</b>
<b>Anexo B.1: Hojas de datos del tiristor SKT760 de Semikron.</b>	<b>62</b>
<b>Anexo B.2: Hojas de datos del disipador de Semikron 4N/250</b>	<b>67</b>
<b>Anexo B.3: Tarjeta Enerpro, para el control de disparo de los tiristores y monitoreo.</b>	<b>69</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1 Sistema de arranque del motor síncrono (arrancador del molino)</b>	<b>13</b>
<b>Figura 2.1 Esquema del montaje actual del motor trifásico de rotor bobinado, su arrancador y fuente excitatriz de tipo mecánica.</b>	<b>17</b>
<b>Figura 2.2 Esquema de bloques de la fuente controlada de voltaje propuesta para la solución.</b>	<b>22</b>
<b>Figura 3.1 Diagrama general de la conexión entre la tarjeta de control Enerpro, controlador Honeywell y sistema de manejo Multilin del motor.</b>	<b>28</b>
<b>Figura 6.1 Configuración de un convertidor puente de 6 pulsos</b>	<b>37</b>
<b>Figura 6.2 Distintas formas de conexión de un convertidor de 12 pulsos.</b>	<b>38</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 Descripción de la empresa

#### a. Descripción general

*Visión:* “Somos una empresa líder en productos de concreto de alto valor percibido con fuerte presencia nacional. Somos una organización integrada, competitiva, motivada y comprometida con el uso responsable del medio ambiente. Somos la empresa preferida por nuestros clientes, colaboradores, accionistas y la comunidad. Crecemos rentablemente y en forma sostenida.”<sup>1</sup>

*Misión:* “Mantener el liderazgo en el mercado de los materiales de construcción, satisfaciendo las necesidades de nuestros clientes con concreto, productos y servicios relacionados de un valor percibido superior, promoviendo así la construcción con concreto.

Lograr una rentabilidad adecuada para nuestros accionistas.

Disponer de un equipo de trabajo motivado, calificado, de gran iniciativa y creatividad, consciente de la necesidad de un aprovechamiento óptimo de los recursos disponibles.

Reconocer nuestra responsabilidad en el mantenimiento y mejoramiento de nuestro medio ambiente natural, social y económico.”<sup>1</sup>

Los inicios de lo que es hoy la Industria Nacional de Cemento, S.A. se remontan a 1960, año donde concursan seis grupos en una nueva licitación. Después de varios intentos fallidos de algunas empresas, un grupo de emprendedores costarricenses se unió para presentar al Gobierno un proyecto, el cual pondría en marcha una gigantesca industria que brindaría enormes beneficios a Costa Rica.

Por ello el 17 de abril de 1961 se resolvió por unanimidad de la Comisión Estatal respectiva, declarar que la oferta presentada por la firma Industria Nacional de Cemento, S.A. era, en todos los aspectos, la más conveniente a los intereses del país.

De ésta forma, el 29 de agosto de 1961 se firmó el contrato entre el Gobierno de la República y la Industria Nacional de Cemento, S.A. La Asamblea Legislativa lo ratificó el 14 de noviembre de 1961.

Así, en 1962 se inició la obra constructiva de la planta de producción de Cementos INCSA, en Lourdes de Agua Caliente de Cartago, formada en sociedad con la participación mayoritaria de 2300 accionistas costarricenses a quienes, poco después, se les unió el grupo suizo Holderbank, que aportaría parte del capital necesario para la puesta en marcha de tan grande y beneficioso proyecto.

Después de muchos años de esfuerzos en la construcción de una fábrica de cemento en Costa Rica, el 10 de agosto de 1964 Cementos INCSA comenzó a producir “clinker”.

b. Descripción del departamento donde se realiza el anteproyecto

---

<sup>1</sup> Gerencia de Recursos Humanos

Como nota aclaratoria se debe mencionar que la Industria Nacional de Cemento trabaja por el método de procesos o células de trabajo. La célula en la cual se realiza el proyecto se llama molienda. El jefe de dicho departamento es el Ingeniero Edwin Barley. Este departamento cuenta con un total de 20 personas, de las cuales 4 son ingenieros. La principal actividad es la molienda de diferentes materiales, teniendo como base el denominado clinker. Dependiendo de los materiales involucrados en la molienda, así como de sus cantidades, se obtiene un producto específico de la variedad de cementos que elabora la Industria Nacional de Cemento.

## **1.2 Definición del problema y su importancia**

Para el proceso de molienda del cemento se utilizan potentes motores sincrónicos, con el fin de variar su comportamiento frente a la línea de alimentación, o sea, llevarlos a comportamiento de carga inductiva (motor) o de una carga capacitiva, este último con el fin de mejorar el factor de potencia de la línea de alimentación. Para lograrlo se procede a alimentar el rotor con corriente directa para que alcance la velocidad de sincronismo. La alimentación se realiza por un conjunto de tres máquinas rotativas de la siguiente manera: un motor impulsor (primotor), que se encarga de suministrar el movimiento angular al generador. El generador que es el encargado de proporcionar el voltaje y corriente necesarios para alimentar el rotor del motor del molino. Por último, un generador piloto que se encarga de la variación de los parámetros de salida del generador según las especificaciones o requerimientos necesarios.

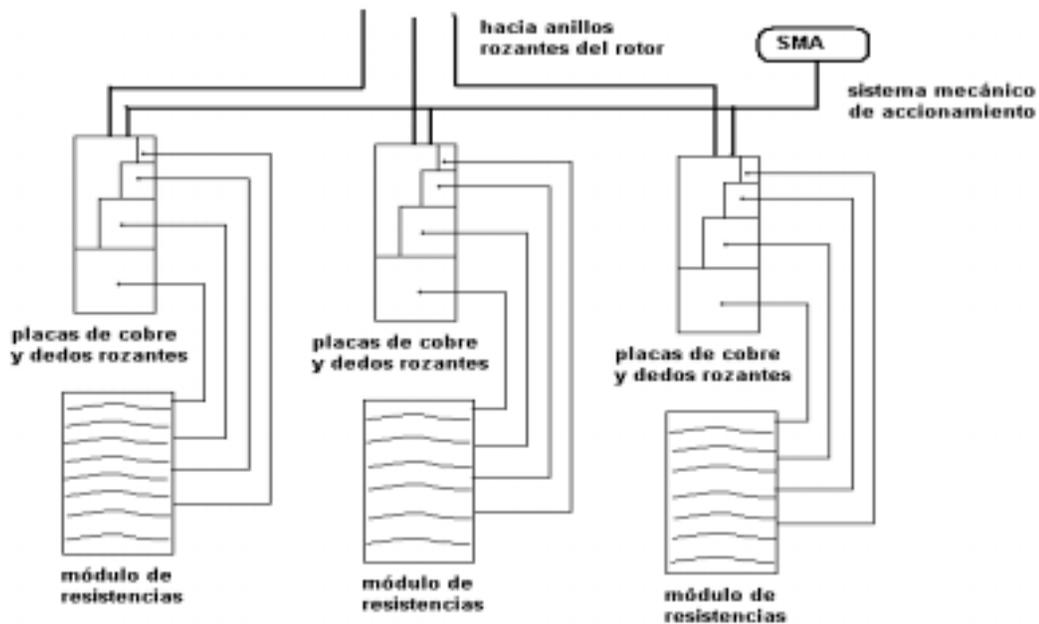
Tres máquinas para este conjunto, conllevan una alta inversión de mantenimiento, tanto en la parte económica como de tiempo. El índice de posibilidades de fallas eléctricas y mecánicas es alto. La cantidad de elementos necesarios para su mantenimiento es alto, como lo son los repuestos en sí

(rodamientos, carbones) y los materiales, equipo y personal para llevar a cabo el mantenimiento (tela, dieléctrico, lija, herramientas, etc).

El foco del problema es el alto costo de inversión en la parte de mantenimiento y el no tener la posibilidad de variar el factor de potencia del motor sincrónico del molino.

Debido a que la carga (molino) se mantiene mecánicamente acoplada al motor, es necesario que el arranque se realice en forma lenta y que se incremente la velocidad del motor hasta alcanzar aproximadamente un 90% de la velocidad sincrónica, para lograrlo se usa un arranque denominado de “voltaje reducido”. Este arranque se lleva a cabo por medio de cortocircuito del rotor. La variación del valor de la resistencia se realiza por medio de contactos rozantes sobre placas de cobre que tiene un intrincado sistema de conexiones hacia bloques de resistencias con diferentes derivaciones. Este sistema mecánico esta sometido a altos desgastes producidos por las altas corrientes de arranque del motor, en donde las placas de cobre y los puntos rozantes (denominados dedos), se funden, provocando falsos contactos y chispas y estos a su vez las paradas de maquinaria de producción. También que la variación del valor de las resistencias la realiza un motor que mueve un eje central donde se encuentran todo el sistema de dedos rozantes para los contactos, por medio de una rueda con muescas denominada cruz de malta. Como se hizo mención anteriormente todo sistema mecánico tiene más alta posibilidad de fallo que una unidad estática.

Con respecto a esta parte del problema, las placas y los dedos se tienen que mandar a rellenar y rectificar cuando sufren daños, porque no se consiguen, debido a que el equipo se encuentra obsoleto. También que al ser un sistema eléctrico-mecánico tiene un alto índice de falla. En la figura 1.1 se muestra una especificación general del arrancador.



**Figura 1.1** Sistema de arranque del motor síncrono (arrancador del molino)

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 General

Realizar la propuesta de un diseño prototipo de una fuente controlada de voltaje, para la excitación de un rotor bobinado de un motor trifásico, para la reducción del mantenimiento y mejorar el factor de potencia.

#### 1.3.2 Específicos

- Realizar las mediciones de los parámetros eléctricos necesarios.
- Realizar los cálculos con los datos anteriormente recolectados, para conocer las características técnicas, mecánicas, eléctricas de los tiristores, transformador, filtro inductivo y protecciones para ca y cd.

- Investigar y seleccionar el transformador adecuado.
- Investigar y seleccionar los tiristores y conjunto de disipadores.
- Investigar y seleccionar las protecciones para corriente y voltaje, fallo de fase, térmicos, fusibles y demás para ca y cd existentes en el mercado.
- Investigar y seleccionar el filtro inductivo para este tipo de fuente.
- Investigar y seleccionar tipo de control de disparo de tiristores (módulo).
- Estudiar y comprender el funcionamiento del control de disparo (módulo).
- Investigar y seleccionar el equipo para la medición del fp (medidores individuales o módulo).
- Investigar y seleccionar el compartimento o gabinete para el montaje de la fuente (parte de control y parte de potencia).
- Confección de la documentación final del proyecto.
- Realizar la transferencia de tecnología a la empresa INCSA.

## **CAPÍTULO 2**

### **ANTECEDENTES**

---

#### **2.1 Estudio del problema a resolver**

La energía eléctrica es una de las fuentes principales que mueven la fuerza industrial de cualquier país. La generación lleva consigo una gran inversión de por medio, así que las compañías generadoras deben de cuidar y regular el suministro de ésta para toda la población en cualquier momento. Por eso se toman restricciones para el máximo consumo de la misma en las denominadas horas pico (horas de mayor demanda).

A las industrias, por tener en su mayoría motores, se les vigila el denominado factor de potencia - que es el ángulo de desfase que se produce en las cargas inductivas entre la corriente y el voltaje -, porque debe mantenerse en un rango estipulado por la compañía que brinda el servicio de energía eléctrica, para no verse multada fuertemente, debido al mayor consumo, aumentado el costo.

La empresa INCSA, en el área de molienda cuenta con cuatro motores trifásicos de rotor bobinado que sirven para el proceso de la molienda del cemento. Éstos motores se arrancan por el método de voltaje reducido, conmutando módulos de resistencias para controlar el voltaje de alimentación del rotor bobinado. Ésta característica de rotor bobinado permite variar su velocidad, su factor de potencia y

su comportamiento, siendo este como motor o como carga capacitiva ante la línea de alimentación.

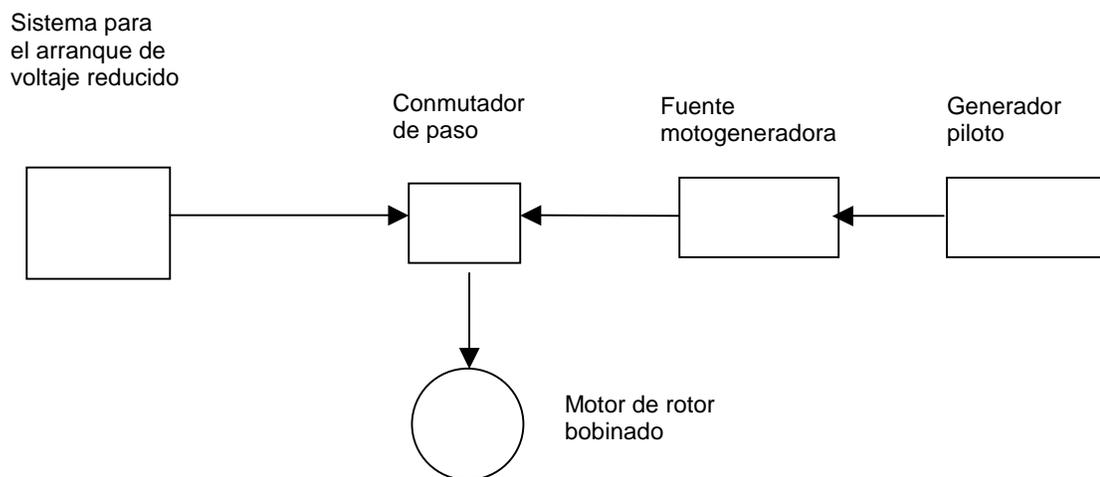
El problema consiste que solo uno de los motores cuenta con un control del tipo no mecánico motogenerador, para poder efectuar la variación de voltaje de alimentación del rotor para realizar el cambio del valor del factor de potencia (denominado de aquí en adelante: fp), implicando para INCSA una gran demanda de energía para el funcionamiento de dichos molinos y del pago de altas cantidades de dinero por concepto de electricidad, de las multas y sanciones por el fp que se crea y, la alta inversión en dinero y tiempo para el mantenimiento preventivo, reparaciones y tiempo de parada de la máquina y por ende el proceso de producción.

Actualmente la manera para variar el factor de potencia del motor en cuestión, se realiza por medio de un conjunto de fuente excitatriz, compuesto por tres máquinas rotativas, un motogenerador, un generador piloto y un motor impulsor (primotor). El motogenerador suministra el voltaje de alimentación para el rotor y el generador piloto se encarga de controlar el voltaje de generación del motogenerador. En el diagrama de bloques de la figura 2.1, se presenta todo el sistema en discusión. Su módulo de arranque de voltaje reducido, la fuente motogeneradora y el generador piloto.

La única fuente controlada que se mencionó anteriormente, se instaló debido a un daño ocurrido al conjunto de motogenerador y su piloto control de uno de los motores para los molinos.

Al ser la fuente excitadora del tipo motogenerador, se deben realizar mantenimientos preventivos periódicos, para evitar fallos y daños al equipo, atrasos en la producción y compra de equipo nuevo. Dentro de este mantenimiento se debe mencionar: cambio de rodamientos, limpieza de motor, rectificación de conmutador (colector de delgas), cambio de carbones (escobillas) entre los más grandes y representativos. También se debe recordar los productos y suministros necesarios

para tal acción (repuestos, jabón, dieléctrico, tela, desengrasante entre otros). Otros de los más importantes en esta lista son: el tiempo y el personal empleado. Se hace una aclaración de vital importancia en el caso de los carbones, los cuales presentan varios inconvenientes. Estos componentes producen polvo debido al desgaste, que se va acumulando entre las delgas del conmutador, pudiendo provocar cortocircuitos entre las espiras del rotor inductor, llevando a la pérdida de características magnéticas, disminuyendo la eficiencia. También este polvo se acumula entre los bobinados provocando suciedad, así como en los rodamientos y demás partes del motor. Otro inconveniente son los falsos contactos y las chispas que se producen al ir desgastándose y por ende el desgaste prematuro y daños al conmutador de delgas hechas en cobre. También la adquisición y compra de dichos componentes se ha vuelto bastante difícil. Para tener una magnitud del problema, el generador utiliza treinta piezas (carbones) en el denominado sistema de escobillas para cerrar el circuito eléctrico del rotor.



**Figura 2.1** Esquema del montaje actual del motor trifásico de rotor bobinado, su arrancador y fuente excitatriz de tipo mecánica.

Otro de los problemas es el sistema que se tiene para el arranque. En estos momentos se realiza por medio de variación de resistencias, accionado por un mecanismo que hace el paso de un valor de resistencia a otro hasta alcanzar la velocidad adecuada. Este sistema se encuentra sumergido en aceite dieléctrico en un recipiente metálico. Por ser un sistema mecánico trae consigo el desgaste físico de sus partes, pérdida de precisión, desajuste y éstas inconveniencias mecánicas producen calentamiento excesivo, chispas, pérdida de energía al ambiente, deterioro de las piezas mecánicas, tanto por la fricción y movimiento como por la fundición de las partes conductoras por las altas corrientes de circulación al momento del arranque.

Para resolver el problema que presenta la fuente motogeneradora, se pretende diseñar una propuesta de una fuente controlada de voltaje del tipo de estado sólido, trayendo como beneficios en la parte técnica: una corriente de alimentación más estable, mejor control del factor de potencia, libre de mantenimiento o mínimo; reduciendo gastos destinados en la parte de mantenimiento y de reparaciones.

En la parte del estudio para el arrancador, con los datos obtenidos de las mediciones y los obtenidos de los cálculos, se propondrá una posible solución para el cambio del actual sistema de arranque, el cual es un módulo de resistencias, para producir el método de variación de voltaje; por otro del tipo de estado sólido. Este cambio pretende generar beneficios como los anteriormente mencionados para la fuente de voltaje (eliminación de fallas mecánicas, reducción o eliminación del mantenimiento preventivo, inversión en mantenimiento).

## 2.2 Requerimientos de la empresa

En esta sección se hará un análisis cronológico para dejar en claro la posición de la empresa ante el proyecto y de sus requerimientos.

Al inicio del proyecto se pretendía utilizar partes de la fuente que se encuentra en la planta, como lo son: el transformador de alimentación principal, los disipadores, el gabinete, el ventilador de enfriamiento, las barras de conexión, el cableado existente y entonces solamente adquirir los tiristores y su control de disparo, así como algunos instrumentos de medición y las protecciones necesarias. Sin embargo se encontró que los disipadores existentes no servirían para el tipo de tiristores que se necesitan para la fuente, por las exigencias de corriente; el tipo de dispositivo que se debía adquirir y el tipo de montaje para la disipación de calor, porque los dispositivos que se encuentran en la actualidad son del tipo para atornillar (stud), los que se deben obtener son los del tipo disco (hockey puk), que se deben ensamblar a presión contra los disipadores. Al realizar los cálculos y simulaciones de una configuración tipo puente con un diseño de seis tiristores, se observó la forma peligrosa de funcionamiento de la configuración ante la demanda de corriente y la generación de calor de los tiristores, poniéndolos a su límite según especificaciones de fabricante (aproximadamente entre 95° a 121°C el dispositivo y una temperatura del disipador un poco menor). Por este lado, ya no se podía utilizar el montaje de la fuente existente en la planta, así que habría que comprar todo el sistema de bloque de disipadores y el sistema de barras de conexión, aumentando el costo de la inversión en el proyecto.

Por el otro lado, debido a que las especificaciones y características de la carga exigen llevar a la fuente a trabajar a condiciones extremas, se opta por buscar otra solución. Después del proceso de investigación se halla el método de utilizar dos convertidores de 6 pulsos para cubrir las exigencias eléctricas de la carga. Este método consiste en la interconexión de los dos módulos de seis tiristores en paralelo –para este caso- para formar el denominado convertidor de 12 pulsos.

Para esta configuración se debe instalar un transformador especial, el cual su primario debe estar conectado en delta y poseer dos secundarios, uno conectado en estrella y el otro en delta, y que de ambos se obtenga el mismo valor de voltaje. Aparte de este transformador especial, se debía de adquirir el doble de tiristores y de disipadores para la fuente, así como de un transformador de acople (filtro) para la conexión de los dos convertidores de 6 pulsos. También en lugar de colocar tres fusibles para semiconductores para el diseño presentado al principio, se debe instalar seis, tres en cada secundario para cada convertidor. Como se nota, la enumeración de estos componentes que se deben adquirir, y la petición de construcción de un transformador especial, aumentan la inversión que se debe realizar en el montaje de la fuente excitatriz estática. Este detalle del aporte económico fue una de las razones de peso; la otra, también importante, fue el factor tiempo.

El procedimiento de solicitud de fabricación del transformador, así como la compra de los demás componentes y el proceso de importación, sobrepasarían el tiempo máximo estipulado para la realización de la práctica de especialidad, tomando en cuenta que la solución definitiva se logra a una etapa ya avanzada del proyecto.

Por estos motivos de inversión económica y del poco tiempo restante se opta por dejar el proyecto en una propuesta del tipo técnica, para su posterior montaje.

### **2.3 Solución propuesta**

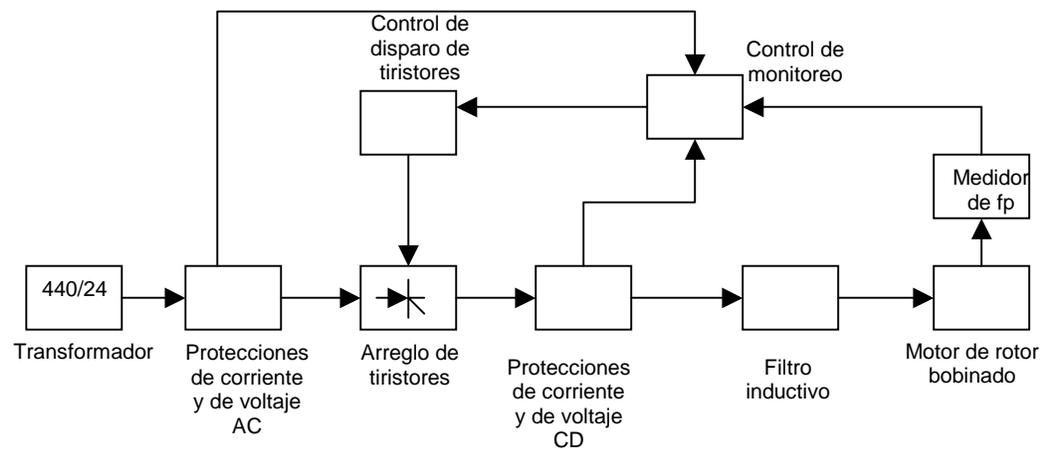
Actualmente los avances de la tecnología, han logrado implementar nuevos productos y productos mejorados, gracias a la investigación y a las nuevas técnicas de fabricación. Se cuenta con una amplia gama de dispositivos de estado sólido para el control de alta potencia. También con el uso de microcontroladores, se pueden realizar múltiples funciones, basado en análisis de entradas y salidas. Otra de las posibilidades es la utilización de módulos ya diseñados para ciertas aplicaciones específicas. Ésta última opción, acompañada de los sensores y actuadores darán la solución adecuada.

Para eliminar la actual fuente generadora excitatriz (motogenerador y piloto que controla a la anterior), se pretende diseñar una fuente excitatriz del tipo de semiconductores de estado sólido. Dicha fuente dará los siguientes beneficios: libre de mantenimiento o mínimo, eliminación de imprecisiones y desgastes físicos al no contar con partes mecánicas, eliminación o reducción de pérdidas de energía calórica por parte de la fricción, chispas o arcos, posibilidad de ajustar el factor de potencia. Con la instalación de esta fuente se elimina la necesidad de realizar mantenimiento a tres máquinas rotativas (generador, motor impulsor y generador piloto), disminuyendo el tiempo de parada de cada intervención de mantenimiento preventivo al motor de rotor bobinado; también disminuye la posibilidad de fallos mecánicos. Otra ventaja es la posibilidad de ajustar el factor de potencia, de convertir el motor a una carga capacitiva frente a la línea de alimentación trifásica, disminuyendo el consumo de energía eléctrica. Todos estos beneficios se resumen en: disminución de tiempo de parada, disminución de fallas mecánicas, disminución en costos de mantenimiento preventivo y de reparaciones y manejo del factor de potencia del motor.

Para la elaboración de la fuente controlada de voltaje del tipo de corriente continua, se pretende utilizar tiristores, con su respectivo control, las protecciones necesarias para AC y DC, medidores de corriente y de voltaje, el filtro de tipo

inductivo y un control de monitoreo. La figura 2.2 muestra un esquema general de cómo se pretende estructurar el diseño de la fuente.

La solución que se propone, surge en el momento de tener la necesidad de implementar una fuente de voltaje para alimentar el rotor bobinado del motor, por el fallo ocurrido a la otra fuente existente. El ingeniero Federico Navarro C. propone la creación de una fuente que evite los actuales problemas del tipo mecánico y, los costos en mantenimiento. La propuesta se dirige en el diseño de una fuente controlada de voltaje cd, utilizando semiconductores de potencia.



**Figura 2.2** Esquema general de bloques de la fuente controlada de voltaje propuesta para la solución.

Transformador: para adecuar el voltaje de la línea de distribución en la empresa de 460V a 20V, suministrando la alimentación necesaria para el rotor bobinado.

Protecciones de corriente y de voltaje CA: serán las necesarias para eliminar la posibilidad de un daño grave, tanto a la fuente como al motor. Estas protecciones serán: los fusibles, térmicos, interruptores termomagnéticos, fallos de fase. Los sistemas de protección, que se elijan, por sugerencia del ingeniero deben de emitir una señal (bandera), para indicar y corregir la falla. También la señal será utilizada en el módulo de monitoreo para tomar decisiones en el proceso de diagnóstico en el arranque y también en funcionamiento pleno.

Arreglo de tiristores: es la configuración necesaria para efectuar la rectificación de ca a cd para la alimentación del rotor.

Control de disparo de los tiristores: es un sistema digital para la secuenciación de disparo, tiempo de conducción y demás variables necesarias para manejar el funcionamiento de los tiristores.

Filtro inductivo: para disminuir el rizado proveniente de la fuente y también sirve como protección de cambios de corriente.

Medidor de fp: aquí se debe investigar para elegir un módulo ya construido a nivel comercial o medidores individuales de corriente y de voltaje para tal fin.

Control de monitoreo: con la información proveniente de la compañía Enerpro, la misma unidad de control de disparo de los tiristores, provee la posibilidad de unas entradas para el monitoreo y control de variables como: el fallo de fase, voltaje y corriente en la carga. Su función será el diagnóstico total antes de entrar a funcionar la fuente y alimentar el rotor, conjuntamente tomar las decisiones necesarias, si se presenta una señal (bandera), por parte de alguna de las protecciones en pleno funcionamiento.

## **CAPÍTULO 3**

### **PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO**

---

Primeramente se procede a realizar las mediciones de los parámetros eléctricos necesarios del motor, así como también de toda la información importante relacionada y de algún otro detalle para el diseño de la fuente. Se solicita información sobre el proceso de arranque y del modo de funcionamiento del motor en régimen permanente cuando ejecuta la función de molienda. Para dichas mediciones se recurren a instrumentos de medición que se encuentran colocados en el conjunto del motogenerador ya existente. De ahí se toman los datos de corriente del motor (estator), la corriente y el voltaje de la excitadora (motogenerador) y por último el factor de potencia en ese momento, en su valor y comportamiento. De la placa de datos se extraen otros datos de información necesaria. Con estos últimos se hace una proyección de las características eléctricas máximas que debe tener la fuente de cd por diseñar.

Ya con los datos recopilados se realiza la búsqueda de información concerniente a teoría de tiristores (SCR: silicon rectifier controlled), puentes rectificadores, convertidores, para decidir el tipo de tiristor y la configuración adecuada. También para el cálculo del transformador, filtro reactivo, protecciones. Otra de las investigaciones es concerniente al tipo de control de disparo para los tiristores.

Otros de los detalles técnicos por estudiar es la aparición de los armónicos que se generan por el proceso de rectificación.

Con todos los datos a disposición se comienzan a evaluar opciones, de las cuales, dentro de la empresa INCSA se consigue un catálogo de la marca Semikron, que se dedica a la fabricación de semiconductores de potencia y accesorios. La ventaja con Semikron fue que dentro del mismo catálogo, al elegir un semiconductor, en este caso tiristor, se recomienda la utilización de los posibles disipadores, circuitos de protección RC denominados “snubber”, los ventiladores y otra gama de componentes necesarios para el montaje de un circuito de potencia. Se añade que al diseñar una configuración puente de tiristores, Semikron presenta los diferentes tipos de configuraciones y la corriente directa que se puede extraer de ellas. Esta fue una de las razones de peso para decidirse por esta marca. Otra muy importante fue que al revisar el sitio en Internet, se encuentra un software para simular diferentes configuraciones, constituidas por diferentes tipos de dispositivos, con la posibilidad de variar parámetros de entrada, que determinan el funcionamiento y las condiciones de trabajo. Valiéndose de este tipo de ayuda digital, con la teoría consultada en textos bibliográficos y la cooperación de la experiencia de diferentes personas calificadas en la empresa. Aunque se revisan otros catálogos y direcciones electrónicas de semiconductores de potencia, no se contaba con las facilidades que proporciona Semikron. Como se menciona anteriormente otros de los accesorios que se necesitan para la protección y funcionamiento de los tiristores, Semikron referencia el dispositivo adecuado, como los circuitos snubber, los varistores, abanicos de enfriamiento entre otros cuando se elige alguno de los semiconductores que venden.

En la parte del control de disparo de los tiristores, Internet revela que existe una empresa con gran trayectoria en la manufactura y venta de tarjetas específicas para este tipo de proceso, dicha empresa se denomina Enerpro Inc.. Se solicita información de sus productos, la cual llega a la empresa INCSA, con ella se elige el tipo de tarjeta adecuada así como de otras que se utilizan para el monitoreo de

ciertos parámetros, pero el tipo de información es muy general, por lo que se solicita una información más detallada.

Los fusibles de protección, deben ser del tipo de acción rápida, para protección de semiconductores, eligiendo los más cercanos a las características de los parámetros:  $di/dt$  y el  $I^2t$ . Este tipo de análisis es el resultado de la información proveniente de la teoría y de recomendaciones del asesor de práctica. Como se han elegido tiristores con características eléctricas de mayor capacidad, para soportar las demandas de la carga, se eligen fusibles con las mencionadas características con un porcentaje menor para asegurarse la protección eficiente de elementos tan delicados como los semiconductores. Para este caso se examinan las páginas web de las empresa Ferraz y Bussmann, para encontrar primeramente notas técnicas y teoría, para luego elegir los fusibles adecuados.

Con respecto a los transformadores, el de alimentación y el de acople entre los convertidores, existen varias opciones. Se puede mandar a fabricar en forma individual y exclusivamente a una compañía llamada Transcoil.Inc., que se encarga de la fabricación de este tipo de dispositivos. La otra opción es la de mandar a cotizar y encargarlo con la compañía que se encargue del suministro y del montaje de la fuente de voltaje directo basada en tiristores, así estos dos transformadores ya vengan incluidos en esta parte.

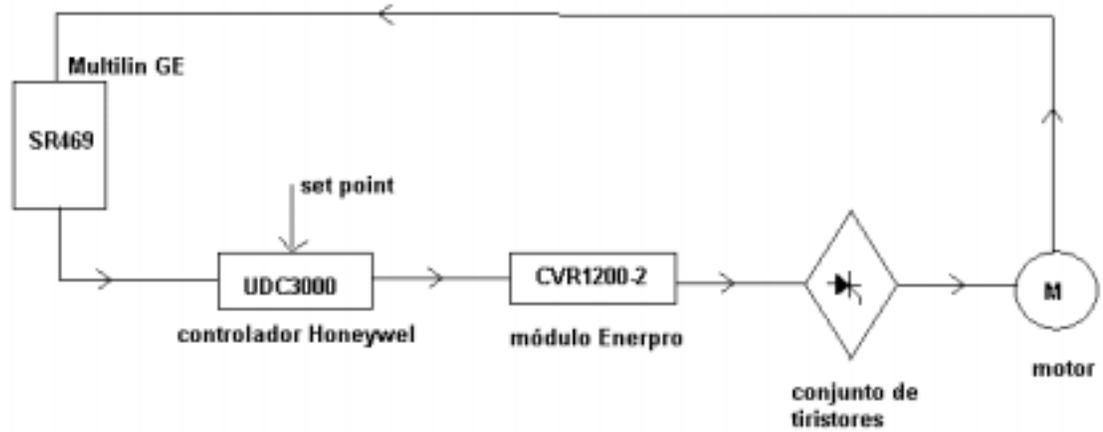
El medidor de factor de potencia que se va a utilizar se encuentra ya disponible en un sistema de monitoreo llamado Multilin de General Electric, de aquí se toma la señal del valor denominado, con esta señal se alimenta un controlador de la marca Honeywell, que es un controlador, la salida de este controlador servirá para alimentar las señales de referencia de la tarjeta Enerpro, que es la encargada del disparo de los tiristores. En la figura 3.1 se muestra un diagrama general que se planea realizar para la medición de este parámetro y la interconexión con los demás elementos de control y de actuadores.

Para la parte del gabinete también existen varias formas de solucionar el problema. Una de ellas es adquirir un gabinete nuevo adecuado a las características y dimensiones y acomodar todas las partes de la fuente. La otra es solicitar a la empresa que se le encargada de la implementación de la fuente que ellos se encarguen de conseguirla y la tercera es, utilizar algunos de los gabinetes que se encuentran sin uso en la empresa INCSA, de equipos obsoletos o dañados.

Toda la evaluación de las partes seleccionadas se han hecho con base en la teoría consultada y por medio de las simulaciones realizadas, para dar peso y respaldo suficiente a las decisiones tomadas: Dentro de este punto cabe destacar la valiosa aportación en experiencia brindada por algunas personas relacionadas con la materia.

Algunas otras pequeñas partes que no se hacen referencia en el diagrama de bloques, se pueden solicitar a la empresa que se solicite la implementación de la fuente o solicitarle alguna recomendación de otra u otras empresas que tengan relación con ello o que la pueda facilitar en el momento que se le realiza el pedido de fabricación y compra. Dentro de algunas de estas partes se encuentran las barras de conexión, cableado, circuitos de protección  $di/dt$ ,  $dv/dt$ , varistores entre otros.

Básicamente la metodología se ha basado en la información estudiada en los libros consultados, los artículos encontrados en Internet y los datos técnicos proporcionados por los fabricantes en las hojas de datos. También de la amplia experiencia de algunas de las personas que trabajan para esta misma empresa en las áreas de electricidad y de electrónica.



**Figura 3.1** Diagrama general de la conexión entre la tarjeta de control Enerpro, controlador Honeywell y sistema de manejo Multilin del motor.

## CAPÍTULO 4

### DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE UTILIZADO

---

Para la implementación del convertidor, entre las partes más importantes están: los tiristores y accesorios, el transformador principal y el control de disparo de los tiristores. Dentro de la composición básica del convertidor puente, está elegido el tiristor de la marca Semikron, tipo disco, cuya designación por parte del fabricante es SKT760, con el disipador recomendado por el fabricante y el mismo que se utilizó en la simulación denominado N4/250 y el circuito snubber RC. Las características eléctricas y físicas se pueden apreciar en las hojas de datos que se adjuntan en la sección de anexos. Para la selección de los tiristores se debe observar los parámetros de corriente que pueden soportar los dispositivos, tomando en cuenta la corriente de la carga y el tipo de carga, los parámetros que se relacionan con los cambios repentinos de voltaje y de corriente como lo son  $dv/dt$  y el  $di/dt$ . El voltaje de régimen de trabajo como el que soporta en conexión inversa en este caso no es muy relevante, porque se trabaja con un voltaje bajo para la alimentación del rotor del motor y, según se vio en las hojas de datos, al aumentar las características antes mencionadas aumentan el voltaje de régimen de trabajo y el que soporta en conexión inversa. Otro parámetro que no tiene mucha importancia es la frecuencia de trabajo, debido a que estos semiconductores trabajarán con la frecuencia de la línea de alimentación, o sea a 60Hz, la cual es una frecuencia muy baja. En esta misma sección, se hace aclaración que se pueden utilizar otros tipos de disipadores de la misma marca de Semikron. La diferencia radica en la forma y tamaño de cada

uno de ellos, las características termodinámicas y los efectos que este puede producir en el elemento, porque dependiendo del disipador y del tipo de enfriamiento que se utilice, se puede demandar más o menos exigencias de potencia. La razón de haberse elegido el disipador denominado N4/250 es por las características que presentan, que son mejores que los otros, también porque es el disipador que al ensamblarse con el tiristor, ocupa el menor espacio físico, y por último, es con el cual se realiza la simulación de diseño.

El transformador de alimentación principal de entrada, es un transformador especial, debido a esta característica se debe mandar a construir por solicitud explícita. Este dispositivo debe contar con un primario en delta y dos secundarios, de los cuales uno conectado en estrella y el otro en delta; además como otro requisito del transformador es suministrar un valor de voltaje de ambos secundarios del mismo valor; esto con el fin de lograr el funcionamiento adecuado del sistema elegido. La compañía TCI, Trans-Coil, Inc, fábrica este tipo de transformadores especiales para tales aplicaciones. También esta compañía suministra el transformador de acople que se necesita para la interconexión de los dos convertidores, comportándose como un filtro para el desbalance entre las corrientes de estos últimos.

La parte de control de disparo de los tiristores se utilizará un módulo ya existente en el comercio, de la compañía Enerpro, este módulo cumple con los requerimientos para el sistema total así también con las estipulaciones de monitoreo y acciones en caso de fallas o errores. Cuenta con las entradas de control, tanto en la parte de monitoreo como de ajuste (set point), también de las respectivas salidas para el disparo de los tiristores.

El diodo de protección para colocar en la salida del cada convertidor de 6 pulsos, que se conecta en paralelo y en conexión inversa con respecto a la polaridad de salida de cada convertidor, se eligió de la misma marca de los tiristores, de la marca Semikron. En este caso se escogió un diodo normal, aunque

se recomienda uno de rápida recuperación, pero para éstas potencias no se dispone, pero se puede tomar en cuenta que la frecuencia de operación del rectificador no es alta. Dentro de esta selección está el SKN320 y el SKR320, que tiene como característica una corriente de conducción en conexión directa de  $700A_{rms}$  ( $I_{FRMS}$ ); la diferencia de la designación es que el SKN, su ánodo es atornillable y el otro lado (cátodo) es un cable con terminal. El SKR es inverso, el cátodo es del lado de la rosca y el ánodo el cable. Este diodo puede ser conectado entre las barras o los bornes de salida de cada convertidor, no es necesario montarlo en un disipador, porque su régimen de trabajo será en cortos periodos y distanciados en el tiempo, como se explicó anteriormente, es un elemento de protección.

Para la selección de los fusibles de protección, se debe tomar en cuenta que el sistema que se va a proteger es del tipo de semiconductores, entonces el fusible debe ser de acción rápida, para que el fusible pueda responder antes que se dañe alguno de los componentes semiconductores o alguna otro elemento del circuito. También se debe tomar en cuenta el parámetro  $i^2t$ , que define una característica de energía; es la capacidad de evacuar la energía que se produce en el momento que se funde el elemento del fusible y, que el cuerpo del fusible (el empaquetado) tenga la consistencia de soportar la explosión y contenerla, para evitar daños al equipo y al personal. En este punto se debe considerar los valores de corriente y de voltaje en los cuales el fusible va a trabajar. Otro de las consideraciones es elegir un fusible con un valor menor de corriente nominal del equipo, evitando así llevarlo a condiciones extremas. Para el fabricante Bussmann, se pueden elegir dos tipos de fusibles, que pertenecen a la misma serie, estos son: FWA-700A y el FWX-700A, que cumplen con los requisitos; que trabajan a 150V y 250V respectivamente. Dentro de la marca Ferraz (Ferraz Shawmut), que fue en la cual se investigó más por medio de Internet, se especifican los siguientes tipos de fusibles:

A70QS⇒ Hasta 700V y 700A (A700QS700-4), menor  $i^2t$  para mejor protección, menor potencia de pérdida, recomendado para la protección dinámica de equipos de estado sólido tales como controladores de motor, UPS, etc.

A70P⇒ Hasta 700V y 700A (A70P700-4), alta velocidad de acción, bajo  $i^2t$ , opciones de indicadores, recomendado para controladores CD, UPS, inversores, etc.

A70Q⇒ Provee el más bajo  $i^2t$  para, extremadamente rápido, recomendado para protección de inversores y otros equipos que requieran la mejor protección AC y DC en este rango de voltaje.

Dentro de esta misma marca existe otro tipo de fusibles especialmente diseñados para la protección de equipos electrónicos llamados "Protistor", denominados URGG/URGH y URR/URLG/URU/URGM. Los primeros son fusibles hasta 250V, con rangos extremadamente altos de interrupción y con varias certificaciones de estándares de diferentes compañías. Los segundos son hasta 660V, y con las mismas características de los anteriores.

En el caso de la protección de la entrada del transformador principal de la fuente, se puede utilizar las protecciones ya existentes del conjunto motogenerador que se encuentra actualmente funcionando, aprovechando de esta forma el equipo de protección, el cableado que ya se encuentra distribuido y tendido, los gabinetes de conexión, agilizando el proceso de montaje del proyecto.

Como se mencionó anteriormente, la magnitud del factor de potencia del motor será medido por un sistema ya instalado, que realiza otra variedad de mediciones y también se encarga de proteger el motor en cuestión. Este sistema es de la reconocida marca General Electric (GE), llamado Multilin SR469; el valor del factor de potencia que este genere, será enviado a otro aparato, en este caso de la marca Honeywell, que es un controlador de la línea por ellos denominada UDC3000, este a su vez es el encargado de cerrar el circuito de realimentación de

control, al ser llevado a la tarjeta Enerpro, de control de disparo de los tiristores. La razón de realizar este tipo de configuración, es por el hecho de encontrarse los equipos ya instalados, evitando la necesidad de comprarlos y también la de su montaje. La proyección de este montaje se estructura en la figura 3.1.

El gabinete o los gabinetes que se vayan a utilizar para guardar y proteger tanto la parte de potencia como la parte de control de la fuente, se pueden adquirir de varias formas. Se puede solicitar que la fuente ya venga en un gabinete, se puede adquirir por separado en el momento que se cuenten con todos los datos de dimensionamiento físico de todos los elementos y bloques que conforma la fuente. Otra en la reutilización de gabinetes que en este momento ya se encuentran en la fábrica INCSA, de equipos que se han sacado de servicio. Para la selección de este gabinete se debe tomar en cuenta la capacidad de evacuar el calor generado por el proceso de rectificación que se ventila por medio del abanico de enfriamiento. También que las condiciones en INCSA son de un alto contenido de partículas en el ambiente (polvo de varios materiales para la fabricación del cemento). Para la protección de la parte de control se puede utilizar un pequeño compartimento dentro del gabinete que se menciona o, podría ser montado en otro lugar donde se mantenga protegido de las condiciones tan adversa de la fábrica.

Para el caso de los abanicos de enfriamiento se toma en cuenta la recomendación que ofrece el catálogo de Semikron, del cual se eligen del tipo axial (SKF17A-230-01). Estos son los que consumen menos potencia, trabajan a 230V y suplen el flujo de aire necesario para el enfriamiento del bloque de los tiristores y sus disipadores. Otra de la razón para elegir este abanico es porque se necesitan al menos cuatro, debido a las dimensiones del bloque con respecto a las dimensiones de la salida del flujo de aire, el bloque es más amplio, por ello se recomienda instalar un mínimo de cuatro abanicos para cumplir con la función de enfriamiento. Así también se prevé que si se daña un abanico, los tiristores no alcancen temperaturas altas de peligro, sino que entren a funcionar otros dispositivos de seguridad como los sensores bimetálicos (termostatos).

# CAPÍTULO 5

## DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO

---

Dentro de esta sección se menciona que los únicos paquetes o programas de software que se utilizaron, son los simuladores de circuitos de potencia. Entre ellos el llamado Semisel, de la compañía Semikron, que sirve para realizar las simulaciones de diferentes configuraciones que ellos distribuyen o que se puede implementar con dispositivos discretos o ya integrados, así como de varias entradas importantes en las condiciones de funcionamiento del circuito, como son los parámetros eléctricos, de temperatura, disipadores, rangos de carga. En la parte de apéndice, se inserta la simulación que se realizó con este programa, para verificación del buen funcionamiento y desempeño de la configuración y elementos seleccionados.

Otro de los simuladores utilizados tiene el nombre Simsen, el cual sirve para probar y obtener las mediciones de un circuito, ya sea de la librería o que sea editado por el usuario. Con él se obtiene los valores y curvas de diferentes parámetros de las mediciones que se realicen en diferentes partes del circuito. También se utilizó el simulador de circuitos llamado "Simcad demo version 5", obtenido de la dirección electrónica [www.powersimtech.com](http://www.powersimtech.com), el cual también sirve para realizar simulaciones tanto en circuitos de su propia librería o de diseños propios del usuario.

Con respecto al tipo de software o tipo de programación que utiliza el módulo de control de disparo y monitoreo de los tiristores, no se tiene conocimiento. Se procedió a solicitar información técnica a la compañía fabricante para tener conocimiento y proceder a analizar su funcionamiento y características. También para incluir la respectiva información en el documento. Pero nunca se recibió tal respuesta de ésta ni de ninguna otra empresa a la cual se les solicitó una información más detallada de sus productos. La tarjeta de control de disparo y de monitoreo de Enerpro, con la poca información que se recopiló, se establece que la mayor parte de las características a programar, se realizan por medio de potenciómetros, de ciertos valores de resistencia específicos y de puentes (jumpers), esto con la finalidad de hacer las tarjetas más versátiles y flexibles, de fácil manejo y amplia aplicación. Se recuerda que dichas tarjetas son de características y aplicaciones específicas.

## **CAPÍTULO 6**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

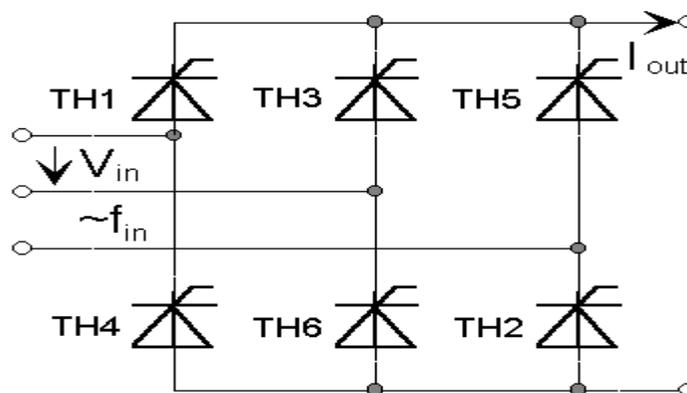
---

#### **6.1 Explicación del diseño**

En secciones anteriores se ha explicado bien el problema existente, el cual consiste en la tenencia y funcionamiento de una fuente de cd, que se genera por un conjunto de máquinas rotativas para alimentar el rotor bobinado de un motor trifásico. Al ser máquinas giratorias y con movimientos mecánicos, la posibilidad de fallas es mayor a una fuente estática del tipo semiconductor; se agrega la alta inversión en mantenimiento preventivo y correctivo en algunas ocasiones del conjunto. La idea principal para la solución es el diseño de una fuente controlada de voltaje cd, basándose en dispositivos semiconductores, más específicamente tiristores (SCR) o llamados rectificador controlados de silicio, porque a modo muy simplista es un diodo al cual se le puede controlar su momento de conducción y de apagado.

En el inicio del desarrollo del proyecto, se estimó que con una configuración puente de seis tiristores (convertidor de 6 pulsos), se podría cubrir las demandas de potencia de la carga y al mismo tiempo, utilizar varios de los componentes y de las partes de la actual fuente existente, que esta conformada por diodos rectificadores de potencia. Al realizar la investigación de los dispositivos semiconductores adecuados en esta fuente, para este motor la demanda de potencia es mayor a la fuente existente, entonces en primer lugar se encuentra el inconveniente de no

poder utilizar los disipadores, porque los existentes son para dispositivos semiconductores que se hacen atornillados al disipador, tipo stub y los que se necesitan son del tipo disco, tipo cápsula, que se presan a los disipadores dependiendo de la energía calórica que se deba evacuar. Otro de los inconvenientes encontrados fue que al simular el circuito puente de 6 pulsos para la corriente máxima que se quiere para la fuente, los tiristores alcanzan temperaturas altamente peligrosas, llevando al dispositivo a condiciones extremas y de fácil destrucción. Se comienza a buscar otra solución, hallándose la configuración de 12 pulsos. Para conformarla se utilizan dos convertidores de 6 pulsos y, dependiendo de las características de la carga se pueden conectar en serie o en paralelo. Como se ha venido mencionando en muchas ocasiones del convertidor puente de 6 pulsos, en la figura 6.1 de muestra su configuración. Se hace importante distinción en la forma que se encuentran numerados los tiristores; esta numeración se mantendrá por motivo de posibles explicaciones y análisis de la secuencia de disparo del sistema de control.

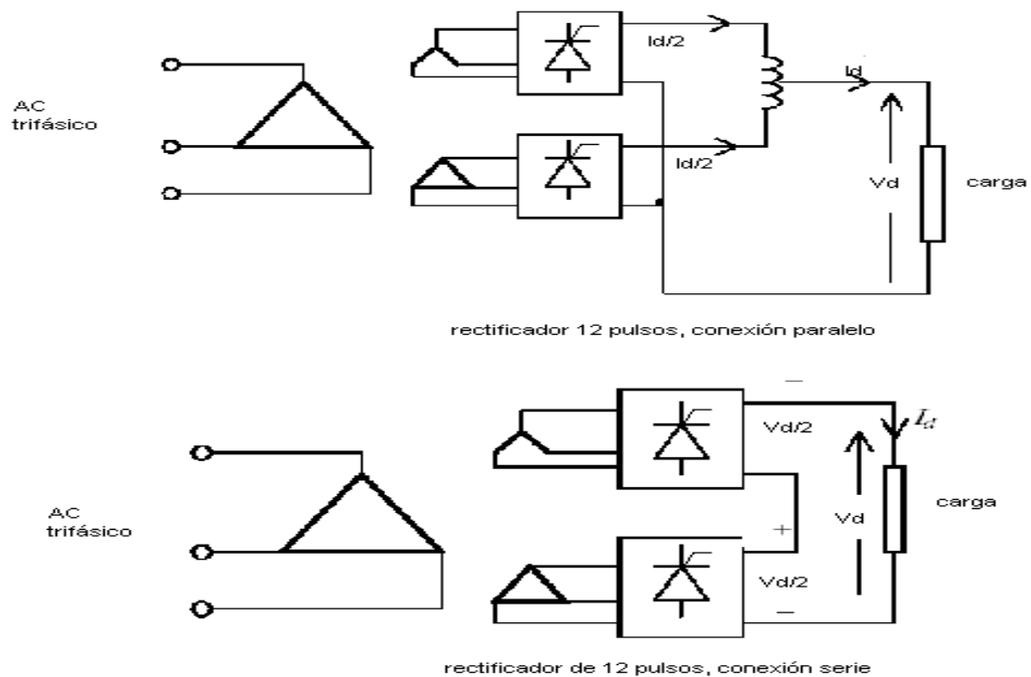


**Figura 6.1** Configuración de un convertidor puente de 6 pulsos

Como por ejemplo, la secuencia de disparo o de su conducción, como se quiera observar, es la misma que la de un inversor. La forma general de disparo es por control de fase. Sin embargo, la onda senoidal se suele convertir en onda en diente de sierra cuyo nivel de continua se puede regular, y luego sigue un disparador Schmit, un biestable, un amplificador diferenciador, una salida selectora

y un amplificador de impulso. Finalmente la señal podría alcanzar la puerta del tiristor por medio de un transformador de aislamiento (de pulsos) o por medio de fibra óptica. La secuencia de disparo de los tiristores es: 1-2-3-4-5-6, conduciendo en las siguientes combinaciones: 1-6, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6.

Las formas de conectar un convertidor de 12 pulsos depende de las exigencias de la salida. Cuando se requiere que el voltaje de salida sea alto se utiliza una conexión serie entre los dos convertidores de 6 pulsos. Para una salida que se necesite una corriente alta, se procede a conectar los convertidores de 6 pulsos en paralelo. En cada caso la magnitud involucrada se divide por igual en rectificador, voltaje en la conexión serie y corriente en la conexión paralelo. La figura 6.2 hace una pequeña ilustración de estas configuraciones.



**Figura 6.2** Distintas formas de conexión de un convertidor de 12 pulsos.

El convertidor de 12 pulsos ha utilizar en este caso es de conexión en paralelo. Se necesitan varias condiciones especiales para su montaje. Primeramente el transformador de entrada debe tener una configuración especial.

El transformador debe contar con un devanado primario conectado en delta; debe poseer dos devanados secundarios de los cuales uno conectado en delta y el otro en estrella, esta característica permite varias ventajas tales como: la reducción de armónicos, adecuación de los fasores de corriente para la configuración de 12 pulsos. La condición de los devanados en diferente conexión es para lograr un desfase de  $30^\circ$  entre ellos, logrando un factor de potencia más alto y menor distorsión armónica de la corriente absorbida por la red<sup>♦</sup>. La denominación por parte de IEC es Dd0y1. Las letras mayúsculas son para la designación de los bobinados primarios, las minúsculas para los secundarios, el número cero para definir el índice de desfase, este índice se debe multiplicar por  $30^\circ$ . Otra forma de interpretación es: cuando aparece un cero significa en la carátula de un reloj de agujas las doce en punto; el 1 indica un desfase de  $30^\circ$ ; un 11 representa un desfase de  $-30^\circ$ , estos con respecto a la posición de las doce. Otra de las características de este transformador es que el valor de voltaje de ambos devanados debe ser el mismo. Con el transformador para la configuración de 12 pulsos, se reduce la cantidad de armónicas presentes en la línea, eliminándose la 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónica de corriente. Se habla de eliminación de las armónicas, pero no es completamente cierto, siempre se presenta un porcentaje de dichas armónicas en la línea, pero es un valor no significativo ni perjudicial para el sistema de distribución y de alimentación.

Al aumentar el número de pulsos en un puente rectificador, se reduce el contenido de armónicas en la línea, sin embargo los puentes de 12 pulsos son generalmente los más usados en la práctica por lo tanto solamente la onceava armónica y menores son suprimidas. La tabla 6.1 da un contenido típico del contenido de las armónicas de una línea de corriente para varias configuraciones de convertidores, expresadas como un porcentaje de la corriente rms.

---

<sup>♦</sup>Ramshaw, Raymond; "Electrónica de potencia"; 1<sup>o</sup> edición; Barcelona; Marcombo; 1982

Las armónicas de corriente son una función de la cantidad de pulsos del rectificador y se expresa como:

$$h = (np \pm 1), \text{ donde } n = 1,2,3,4,\dots \quad (1)$$

Uno de los problemas del convertidor de 12 pulsos en paralelo, es que sus dos rectificadores deben compartir la corriente exactamente para alcanzar la reducción en armónicos. Esto requiere que la salida de voltaje de ambos devanados del secundario del transformador sean exactamente iguales. Por causa de las diferencias de las impedancias del secundario y voltajes de salida de circuito abierto, esto puede ser prácticamente realizado para una carga dada (típicamente carga clasificada), pero no para un rango de cargas. Esto es un muy significativo problema de la configuración de los 12 pulsos en paralelo.

**Tabla 6.1** Porcentaje de armónicos según el número de pulsos en los convertidores

Orden de las armónicas	Armónicas de corriente como un porcentaje de la de línea rms			
	2 pulsos	3 pulsos	6 pulsos	12 pulsos
2	-	46	-	-
3	22	-	-	-
4	-	7	-	-
5	13	8	24	-
7	8	4	9	-
11	4	4	9	4.5
13	4	3	5	3.0

Dentro de las características más importantes por la elección de la configuración de 12 pulsos para la fuente se mencionan: manejo de alta corriente directa de salida ( $I_d$ ); se disminuye la corriente que debe circular en cada convertidor de 6 pulsos, reduciendo las características térmicas y físicas del semiconductor; se

reduce el número de armónicas presentes en la línea de alimentación; el proceso de conmutación de los tiristores es del tipo natural o de fase para cada uno.

Para poder interconectar los dos convertidores de 6 pulsos, se debe utilizar un transformador especial que se comporta como un filtro. Por causa que las salidas instantáneas de cada rectificador no son iguales se necesita la conexión de un transformador de acople entre los dos convertidores y de ahí a la carga, así cada rectificador puede operar independientemente. En la figura 6.2, la configuración en paralelo de los convertidores, se nota el modo de interconexión antes mencionada. Este transformador de acople limita la corriente circulante en cada convertidor; reduce la salida de rizado en la corriente de los circuitos puente. En la parte de los apéndices se incluye el cálculo del transformador de acople para este caso. El reactor se utiliza para la porción de rizo de corriente de descarga, también cualquiera de los voltajes transientes son suprimidos efectivamente. Se reduce la salida de rizado en la corriente de los circuitos puentes. Se debe diseñar que no se sature cuando lleve la corriente máxima.

La parte de control de disparo y sensado, se realizará por medio de un módulo integrado de la marca Enerpro, que se encargará de la secuencia de disparo adecuada para los doce tiristores, sincronizando las señales de las compuertas de los tiristores y también sincronizando ambos convertidores. Se debe tomar en cuenta que en el secundario o los secundarios del transformador de entrada, se cuenta ahora con un sistema de 6 fases, que al estar desplazadas  $30^\circ$ , forma el ciclo completo de  $360^\circ$  ( $6 \times 30^\circ \times 2$ ). También cada tiristor conducirá por  $30^\circ$ , al ser 12 tenemos  $12 \times 30 = 360^\circ$ , utilizándose el ciclo completo de la onda de entrada de alimentación. Este mismo módulo tiene la ventaja que posee entradas para las señales que se generan de sensores para el monitoreo de voltaje y corriente de la carga, pudiendo así regular el factor de potencia y las condiciones de trabajo. Otra entrada con la que cuenta, es el monitoreo de las tres fases de alimentación del primario, por si sucede que falle alguna desconecte totalmente la fuente. Como control que es, cuenta con las entradas en las cuales se puede ajustar los valores a

los cuales se desea poner a trabajar los tiristores (set point). Se vuelve a enfatizar acá, que por medio del controlador Honeywell alimentado por el sistema Multilin de GE, se va a realizar el monitoreo y punto de referencia para programarle a la tarjeta de Enerpro. Con respecto a la forma de llevar las señales de control de disparo de los tiristores, el denominado “gate”, se puede realizar por medio de transformadores de acople o más comúnmente transformadores de pulsos. Otro método posible de utilizar es el uso de fibra óptica. Dentro de las ventajas de estos métodos están aislar la parte de potencia de la parte de control, la confiabilidad de los dispositivos, el aislamiento de las condiciones ambientales e industriales en las líneas que transportan estas señales de control (filtrado de ruido). Se recomienda estos métodos y dispositivos, porque esta misma empresa Enerpro supe esta tecnología en tarjetas ya ensambladas, listas para interconectar con sus otros módulos ya existentes de su fabricación. Otro método es de utilizar optoacopladores para realizar la alimentación de las señales de disparo de las compuertas de los tiristores. Otros aspectos que se consideran para esta decisión son las normas de seguridad, robustez, confiabilidad con las que debe diseñarse y funcionar este proyecto. Dentro de la seguridad, los tiristores pueden llegar a conducir hasta 1000A en un pico, si esta corriente llega a la parte de control por medio de la línea de control de compuerta, dañaría todo el sistema. Robustez por el tipo de ambiente en el cual debe de funcionar la fuente, un ambiente pesado, abrasivo, sucio. Confiabilidad, para que las interferencias causadas por las líneas de alimentación eléctrica a otros equipos más grandes, no afecten las señales de disparo y se pierda la sincronía y se produzca un cortocircuito. También las perturbaciones mecánicas influyen en las dimensiones eléctricas digitales.

## **6.2 Alcances y limitaciones**

Dentro de los alcances de este proyecto están: poder suministrar un voltaje de salida de 20V, con 1500A de salida, para la parte de corriente directa que es la encargada de alimentar el rotor; en la parte de corriente alterna trifásica, el transformador en su primario conectado a 460V, para una salida de 20V, con una potencia de 52KVA.

El proyecto esta diseñado para funcionar dentro de las condiciones hostiles de esta industria en particular.

Tendrá la facultad de poder controlar el ángulo de disparo de los tiristores, de ésta forma se puede variar el voltaje de salida que es el encargado de alimentar y excitar el rotor, logrando variar el comportamiento del motor ante la línea de alimentación, transformándolo a carga capacitiva y entonces controlar el valor del factor de potencia, que es la primordial función que se desea. Enumerando características, está la facultad de poder monitorear varios parámetros, para velar por el eficiente funcionamiento de la fuente.

Como la más importante limitante de este proyecto, fue el no poder haber realizado el montaje y puesta en marcha de la fuente, debido a las circunstancias de tiempo y dinero. Tiempo porque con la solución inicial de un convertidor de 6 pulsos no se podía satisfacer las demandas de potencia de la carga, así que hubo que investigar que otro tipo de solución se podía aplicar. Dinero porque el presupuesto no contemplaba el adquirir por completo todas las partes de la fuente, sino que utilizar algunas de las que ya se encontraban en la otra fuente existente. Con estos inconvenientes entrelazados, al tener que investigar el tipo de componentes que se deberían utilizar, se abarca mayor tiempo en búsqueda e investigación. Consecuentemente ésta investigación lleva a la conclusión que se deben adquirir elementos de los cuales no se poseen en la empresa y que no se tenían proyectados, así que toda esta cadena lleva a tener que hacer una mayor inversión

económica para el proyecto. Con respeto al tiempo, se hace hincapié en el hecho que al tener que adquirir la mayor parte de componentes y que existe un caso especial para el transformador principal, por no ser de uso común, que habría que mandarla a fabricar contra pedido, y luego importarlo, al igual que las demás piezas que se deberían también importar, provocarían que no calcen en el tiempo estipulado para el Proyecto de Graduación, según la coordinación de la Escuela. Por estos motivos por recomendación del ingeniero asesor, el presente proyecto quedará como una propuesta técnica, para una futura instalación.

Una limitante de ésta configuración en paralelo, que solo puede trabajar con la carga específica con la que fue diseñada o cargas similares.

Algunas de las informaciones que podrían ser de interés en este informe, no se pueden presentar debido a la falta de respuesta de las compañías, empresas, casas fabricantes y también representantes, que no dieron respuesta a los correos electrónicos enviados, y a algunas empresas que se les insistió por medio de llamadas telefónicas directas a la persona encargada y a la que se le dirigía la correspondencia electrónica. Dentro de estos datos podrían tabularse las dimensiones físicas, características de diferentes tipos (eléctricas, mecánicas, físicas). Otros de los datos, de los cuales serían el costo total o de las partes que se les solicite, las condiciones de compra y de envío, que tendrían un gran peso a la hora de evaluar la aprobación del presupuesto necesario para la compra de la fuente.

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

#### **7.1 Conclusiones**

a) Los tiristores se utilizan por motivo de su alto rendimiento, uso de pequeñas potencias para su control, cualidad de manejo de altas potencias y no contiene partes móviles.

b) Los rectificadores de 12 pulsos reducen la cantidad de armónicos en la línea de alimentación, al existir dos convertidores de 6 pulsos se aumenta la frecuencia por medio del sistema de seis fases que se implementa, mayor número de pulsos en cada ciclo de la línea de entrada, menor cantidad de cambios de corriente en la línea de entrada, menor rizado, tiende a valor constante la salida (aproximadamente un nivel cd).

c) Los rectificadores de 12 pulsos se utilizan para condiciones especiales de las características eléctricas de salida, con dos convertidores de 6 pulsos conectados en serie se logra altos voltajes y conectados en paralelo altas corrientes.

d) Los convertidores de 12 pulsos requieren de condiciones especiales en su implementación como lo son: transformador de entrada, transformador de acople, módulos de control de disparo y secuenciación.

e) Un convertidor de 12 pulsos puede trabajar sin el transformador de acople en la conexión serie de los convertidores de 6 pulsos, por las mismas características de esta configuración.

f) El buen control del fp en una empresa trae consigo grandes beneficios como: reducción de multas por parte de la compañía que se encarga de la distribución eléctrica, mejor aprovechamiento de las características de los motores, menos daño a los demás circuitos y elementos que se encuentran alimentados a la red.

g) Al utilizar dispositivos semiconductores en sistemas de control, como variadores de frecuencia, fuentes estáticas, se eleva la eficiencia de los equipos controlados, por ser de mayor confiabilidad, de respuestas más rápidas, comparados con elementos discretos o de otro tipo como el de accionamiento mecánico.

## 7.2 Recomendaciones

Se puede realizar un análisis en la configuración puente de 6 pulsos, utilizando otros disipadores recomendados, así como de ventiladores para el enfriamiento por aire forzado de diferentes valores de flujo. Dentro de los disipadores se pueden utilizar varios tipos de los que suministra Semikron, dentro de los cuales se nombran: N4/250, P9/210, P8/180, P17/130, P18/180, P19/200. Todos estos disipadores son especialmente diseñados para la evacuación de calor por el método de “doble lado enfriado” (DSC), todos disponibles en diferentes largos. Cada uno de ellos tiene la misma función, pero son diseñados con diferentes características: Con los dos primeros, el SKT760, quedaría totalmente sentado en las caras de los disipadores, ya que cubren por completo el diámetro del dispositivo que es en forma de disco: El N4 sirve con aire forzado o natural. El U3 es especialmente diseñado para aire forzado. El P9 sirve con aire natural y forzado. El P8 es especialmente para enfriamiento por aire natural y altas corrientes. Aunque se recomiendan todos estos disipadores para la misma función y el mismo valor de corriente, para que funcionen adecuadamente se debe velar en el suministro del flujo de aire forzado necesario para la eficiente evacuación de calor del sistema y no acarrear fallos.

La configuración de 12 pulsos conectados en paralelo puede trabajar sin el reactor que se utiliza para la interconexión de los dos puentes de 6, y para el filtrado del rizo de los puentes, que es el responsable de la generación de armónicas. Su eliminación aumentará en un porcentaje muy poco los niveles de las armónicas en la red.

Cuidar las distancias entre las barras de interconexión de cada convertidor de 6 pulsos, para evitar fallas por arcos y cortocircuitos, debido a la alta corriente de suministro.

En el puente se debe velar por dejar el espacio necesario para que el aire forzado pueda circular por todos los bloques y evacuar la energía calórica con bastante eficiencia para evitar daños a los semiconductores, y también ubicar la mejor disposición espacial de los bloques para contribuir a este proceso.

Se puede solicitar a la casa fabricante de tiristores, que este caso se consultó en su mayoría a Semikron, que envíen los bloques ya ensamblados, nombrándose un bloque como la formación del: tiristor-disipadores-snobber-varistor-termostatos, de tal forma que vengan apretados al torque recomendado, así también con la grasa de silicón para uso eléctrico y electrónico y todos los accesorios que sean necesarios en la parte de protección y ensamblaje, tales como: láminas de baquelita, tornillos, tuercas, arandelas, huecos para el montaje con su respectiva rosca. Aquí si la compañía suplidora, tiene el servicio o por solicitud, pedirle que venga armado la mayor parte de la fuente; que los bloques vengan conectados entre sí y se tuviera la oportunidad que los envíen en un gabinete, que este conectados los módulos a las barras de interconexión y al transformador de acople. Tomar en cuenta que los disipadores deben ser anclados al gabinete por medio de aislantes, o propiamente el bloque completo de los tiristores y sus disipadores.

Todo el sistema de control y monitoreo de la fuente de 12 pulsos, así como las magnitudes de corriente y voltaje, se puede también implementar con un microprocesador o con un PLC, montando todos los sensores y actuadores necesarios, en lugar de utilizar tarjetas ya diseñadas con fines específicos.

Las características de la fuente de voltaje controlado de cd constituida por tiristores, se pueden reducir, por motivo que el motor nunca se ha llevado a trabajar el 100% de su capacidad. Se vería una reducción en el ámbito de la inversión, pero se vería limitada en la parte de aprovechamiento.

# BIBLIOGRAFIA

---

## B1 Libros

- Dewan, S., B.; "Power semiconductor circuits"; Estados Unidos; 1975.
- Fink, Donald, G.; Beaty, H., Wayne; "Manual de ingeniería eléctrica"; 13ª edición; Colombia; 1996.
- Kumar, Sugandhi, Rajendra ; Kumar, Sugandhi, Krishna; "Tiristores, conceptos y aplicaciones"; 1ª edición; México; 1985.
- Möltgen, Gottfried; "Line Commutated Thyristor Converter"; 2ª edición; Alemania; 1972.
- Ramshaw, Raymond; "Electrónica de potencia"; 1º edición; Barcelona; Marcombo; 1982.
- Rashid, Muhammad, H.; "Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones "; 2ª edición; México; 1995.

## B2 Sitios en Internet (páginas web)

- Perrealt, David, J.; Kassakian, John G.."Effects of Firing Angle Imbalance on 12-Pulse Rectifiers with Interphase Transformer" 1995. <<http://www.mit.edu/people/diperrea/Jptpemay95p257.pdf>> (Marzo 2002).

- Rezek, Angelo J.J.; de Abreu, José P.G.; da Silva, Valverto F.;Vicente; Jose´M.E.; Cortez, José A.; Assis, Wanderson de O.; Miskulin, Mauro S. “Power factor improvement of line-commutated graetz convertes by incresing their number of pulses” <<http://caveromiranda.50megs.com/3.3- -1.pdf>> (Marzo 2002).
- Hink, Karl M. “Harmonic mitigation of 12-pulse drivers with unbalanced input line voltages” <<http://www.mtecorp.com/12pulse.pdf>> (Marzo 2002).
- “Pocket Guide to DC DRIVES & HARMONICS” <[http://www.drivesportal.com/pocket\\_guides/pdf/DC-drives-harmonics.pdf](http://www.drivesportal.com/pocket_guides/pdf/DC-drives-harmonics.pdf)> (Marzo 2002).
- Trans Coil Inc. “Perfomance and Protection for drives” <<http://www.transcoil.com/kmppcat.pdf>> (Abril 2002).
- Trans Coil Inc. “KMP 12-pulse transformer/filters” <<http://www.transcoil.com/Salessupport/2001%20list%20price%20schedule.pdf>> (Abril 2002).
- Ferraz Shawmunt. “Application information” <[http://www.gouldshawmunt.com/products/pdf\\_107/APPLICATIONS2\\_44.pdf](http://www.gouldshawmunt.com/products/pdf_107/APPLICATIONS2_44.pdf)> (Mayo 2002).
- Ferraz Shawmunt. “Semiconductor Protection Fuses” <[http://www.gouldshawmunt.com/products/pdf\\_107/A70QS\\_101.pdf](http://www.gouldshawmunt.com/products/pdf_107/A70QS_101.pdf)>,
- <[http://www.gouldshawmunt.com/products/pdf\\_107/A70P.pdf](http://www.gouldshawmunt.com/products/pdf_107/A70P.pdf)>,
- <[http://www.gouldshawmunt.com/products/pdf\\_107/A70Q.pdf](http://www.gouldshawmunt.com/products/pdf_107/A70Q.pdf)>,
- <[http://www.gouldshawmunt.com/products/pdf\\_107/URGG-URGH.pdf](http://www.gouldshawmunt.com/products/pdf_107/URGG-URGH.pdf)>,
- <[http://www.gouldshawmunt.com/products/pdf\\_107/URR-URGL-URU-URGM.pdf](http://www.gouldshawmunt.com/products/pdf_107/URR-URGL-URU-URGM.pdf)> (Mayo 2002).

- Cooper Bussmann. <<http://www.bussmann.com/library/bifs/720002.pdf>>,  
 ➤ <<http://www.bussmann.com/library/bifs/720005.pdf>> (Mayo 2002).
- Semikron. <<http://www.semikron.com/>> (Febrero 2002).
- Enerpro. <<http://www.enerpro-inc.com/>>.(Febrero 2002).
- Power Designers. “Interactive Power Electronics Online Course, Fully Controlled 3-PH SCR Bridge Rectifier” <[http://www.powerdesigners.com/InfoWeb/resources/pe\\_html/contents.htm](http://www.powerdesigners.com/InfoWeb/resources/pe_html/contents.htm)> (Marzo 2002).
- Walshe, K.A. “Basic switching circuits” <[http://www.rspysse.anu.edu.au/~bdb112/engn4506/Chapter\\_3\\_part1.pdf](http://www.rspysse.anu.edu.au/~bdb112/engn4506/Chapter_3_part1.pdf)> (Marzo 2002).
- Sapin. A.; Simond, J.-J. “Simsen: a modular software package for the analysis of power networks and electrical machines” <<http://lemewww.epfl.ch/ME/publications/1995/simsen.pdf>> (Marzo 2002).
- “Interactive Power Electronics Seminar (iPES)” <<http://www.ipes.ethz.ch/ipes/e-index.html>> (Marzo 2002).

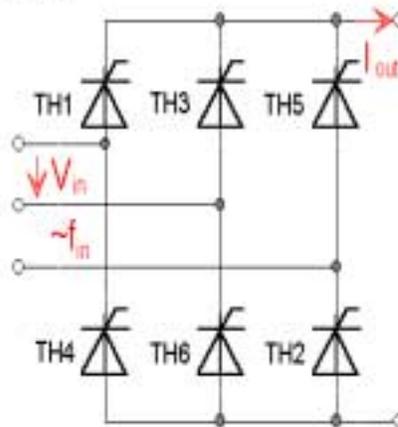
# APÉNDICES Y ANEXOS

## Apéndice A.1: Simulación de un convertidor de 6 pulsos, con el programa Semisel y el tiristor SKT760 de Semikron.

### Result

#### Project:

User name: Lizandro Salazar, Dicoin sa  
Name of session: simu760  
Topology: AC/DC  
Circuit: B5C



#### Circuit:

$V_{in} = 20\text{ V}$

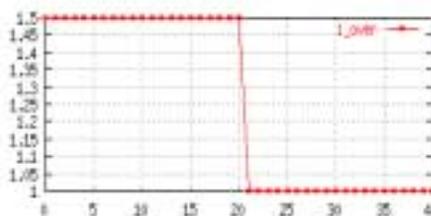
$I_{out} = 750\text{ A}$

Form factor = 1.7321

$I_{out\ rms} = 750.02\text{ A}$

$f_{in} = 60\text{ Hz}$

Overload: factor = 1.5, duration = 20 sec



#### Device:

Device:

device: SKT760\_DSC

recommended voltage: 200 V

number of parallel devices on the same heatsink: 1

Max. junction temperature: 125 °C

use maximum values: no

$$V_{T0,25} = 0,88 \text{ V}$$

$$r_{T,25} = 0,20 \text{ mOhm}$$

$$R_{thjh} = 0,045 \text{ K/W}$$

$$V_{T0,125} = 0,72 \text{ V}$$

$$r_{T,125} = 0,26 \text{ mOhm}$$

Cooling:

Ambient temperature = 40°C

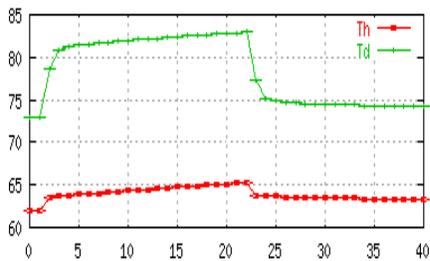
SK-Heatsink: N4\_250x2, correction factor: 1

forced air cooling, flow rate: 90 m<sup>3</sup>/h

$$R_{thha} = 0,09 \text{ K/W}$$

Losses and temperatures:

	steady state	overload
Losses <sub>device</sub> :	243,73 W	394,29 W
Losses <sub>tot</sub> :	243,73 W	394,29 W
Heatsink Temperature :	62 °C	65 °C
Device Temperature :	73 °C	83 °C



Evaluation:

This configuration seems to be too powerful.

## APÉNDICE A.2: Cálculo del transformador de interfase

Para el cálculo del transformador de interfase, se puede tomar dos casos: cuando la reactancia en serie con la carga tiende a infinito ( $X \rightarrow \infty$ ) y cuando ésta tiene valores finitos.

Para el primer caso se encuentra el valor de la reactancia del transformador por medio de la ecuación:

$$I_{dL} = I_{crit} = \frac{\sqrt{2}U_s}{4X_s}, \text{ para } \alpha=90^\circ \quad (1)$$

La reactancia en las terminales externas del transformador de interfase es de  $4X_s$ . En cada instante, la diferencia de dos voltajes desplazados en el tiempo está en las terminales externas. Esta diferencia de voltaje tiene un pico de amplitud de  $\sqrt{2}U_s$ . La corriente magnetizante del transformador de interfase para  $\alpha=0^\circ$  tiene aproximadamente una a forma de onda triangular. Formada por secciones de corriente:  $i = \frac{\sqrt{2}U_s}{4X_s} \text{sen } x$ , durante los intervalos  $-\pi/6$  a  $\pi/6$  y  $5\pi/6$  a  $7\pi/6$ . Este tipo de forma de onda de corriente puede ocurrir si (1) es satisfecha.

Para el segundo caso, cuando  $X$  tiene valores finitos, la corriente  $I_{dL}$  depende de  $X$  y de la razón  $X/X_s$ . Para este caso se debe utilizar diferentes relaciones de corrientes, voltajes, reactancias inductivas y gráficas que las relaciona entre sí.

$I_{dL}$  : corriente directa del convertidor

$I_{dN}$  : corriente directa considerada del convertidor

$E$  :  $U_{di} \cos \alpha$

$U_{di}$  : voltaje directo ideal sin carga con  $\alpha=0^\circ$ .

X : valor del reactor de alisamiento común entre ambos convertidores

$X_s$  : valor del transformador de interfase

$I_{crit}$  : el valor más pequeño de corriente directa necesaria para la conducción de un tiristor por  $120^\circ$

a) ( $X \rightarrow \infty$ ),  $\alpha = 90^\circ$

$$X_s = \frac{\sqrt{2}U_s}{4I_{crit}} = \frac{\sqrt{2} * 20}{4 * 1500} = 4,714mH$$

significa que el transformador de interfase debe tener un valor de 4,714mH, tomando en este caso la suposición que la reactancia en serie con la carga es muy grande. Se hace notar que este transformador debe contar con tres terminales para llevar a cabo la conexión de los dos convertidores por los extremos y de una derivación central para alimentar la carga. Entonces entre cada extremo y la derivación central debe haber la mitad del valor calculado.

### APÉNDICE A.3: Mediciones de corriente y voltaje en el momento de arranque y el régimen permanente del motor del molino 3

**Tabla A.1** Datos en estado de régimen permanente del motor molino 3

$I_{\text{motor}}$ (A)	$I_{\text{excitadora}}$ (A)	$V_{\text{excitadora}}$ (V)	fp (capacitivo)	Fecha de medición	Hora de medición
200-210	1120	14	0,92	18 Feb	12:30h
190-210	1095	14,5	0,93	18 Feb	14:00h
180-190	960	12,5	0,99	25 Feb	15:00h
190-195	1000	13	0,99	8 Marzo	9:30h
185-195	1000	12,5	0,98	12 Marzo	14:30h
190	1000	13	0,98	18 Marzo	13:45h
185-190	940	12,3	1	9 Abril	14:30h
195	970	12,5	0,92	18 Abril	10:30h
185-190	960	12,5	0,99	22 Abril	12:35h
185-190	1020	13,2	0,99	7 Mayo	14:30h
185-190	980	13	0,99	10 Mayo	13:25h
185-190	990	13	0,99	17 Mayo	13:28h

Las mediciones que se realizan desde la fecha del 10 de Mayo en adelante, son con la fuente de diodos que estaba alimentando otro de los motores de molienda de cemento. Dentro de los puntos importantes a marcar en estas mediciones son las características que se presentan para cada una, porque se hacen en diferentes horas del día influyendo las condiciones ambientales en los materiales del motor, el calentamiento que se ha generado por las horas de trabajo. Otro punto a considerar es el tipo de carga que maneje en ese momento el molino. Este molino es uno de los más eficientes y que se utiliza para elaboración de los diferentes tipos de cemento y dependiendo del cemento, así son las porciones de los diferentes materiales que se deben añadir como lo son: caliza, yeso, puzolana, clinker y por ende poseen diferentes densidades.

**Tabla A.2** Corriente de estator y rotor en el momento del arranque del motor del molino 3

Pos	$I_{\text{estator}}$ (A)	$I_{\text{motor}}$ (A)
1	60	360
2	120	260
3	180	220
4	180	180
5	180	150
6	180	120
7	180	80
8	180	70
9	180	55
10	180	40
11	180	30
12	120	15
13	120	5

El proceso de arranque tiene aproximadamente una duración de 40s.

Tiempo aproximado de cada etapa de arranque 3,5s.

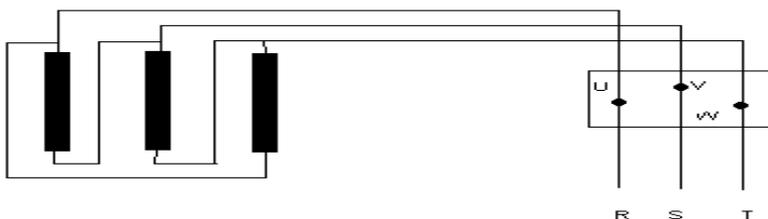
En funcionamiento normal, el arrancador queda en la posición “s”, este arrancador tiene 13 posiciones.

El fp 0,6 inductivo máximo estable.

**APÉNDICE A.4: Datos de la placa del motor y del generador excitador del molino 3**

AEG

Tipo: ASL 4000/14 R	
C. Trf. Mot	N° 264/105
$\Delta$ 4160 V	246 A
1500KW 2040cv	cos $\phi$ 0,9
$\leftarrow$ 514 rpm	60Hz
Exc 1500/20 V	600/1580A
Cl. de aisl. B	P 33R
VDE 530/59 Refrig. Ind 5,5m <sup>3</sup> /s	



Placa del motor y diagrama de conexión

AEG

Tipo: 285/6	
C. C. Gen	Nr 700035
$\Delta$ 4160 V	246 A
28/32 V	1600/1830 A
45758,5 KW	
1760 U/min	
Exc 180/220V	4,25/5,25 A

Placa del generador

## Apéndice A.5 Ecuaciones

El valor promedio  $E_{cd\alpha}$  de voltaje se puede calcular como:

$$E_{cd\alpha} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\alpha+\pi/6}^{\alpha+\pi/2} [E_{max} \sin \theta - E_{max} \sin(\theta - 120^\circ)] d\theta$$

$$E_{cd\alpha} = \frac{3\sqrt{3}E_{max}}{\pi} \cos \alpha, E_{max} = \text{valor} - \text{maximo} - \text{del} - \text{voltaje} - \text{de} - \text{fase}$$

$$E_{cd\alpha} = \frac{2.34E_2}{\sqrt{3}} \cos \alpha$$

Para cualquier valor particular del ángulo de disparo, se puede derivar la siguiente relación como:

$$E_{cd\alpha} = E_{cd} \cos \alpha$$

$$E_{cd\alpha} = 1,35E_2 \cos \alpha$$

Puede calcularse la corriente de ca  $I_2$  de la corriente de cd  $I_d$  como sigue:

$$I_2 = \left[ \frac{1}{2\pi} 2I_d^2 \frac{2\pi}{3} \right]^{1/2} = 0,817I_d$$

La potencia de ca terminal proviene de

$$P_{ca} = \sqrt{3} \text{voltaje} \times \text{corriente}$$

$$P_{ca} = \sqrt{3}E_2 I_2$$

$$P_{ca} = \sqrt{3} \frac{E_{cd}}{1,35} \times 0,817I_d$$

$$P_{ca} = 1,05E_{cd} I_d$$

$$P_{ca} = 1,05P_{cd}$$

## **Apéndice A.6 Glosario de términos y lista de abreviaturas**

ca: corriente alterna.

cd: corriente directa.

fp: factor de potencia.

INCSA: Industrial Nacional de Cemento S.A.

clinker: mineral sintético obtenido por la calcinación de piedra caliza a 1450°C, usado como materia prima principal para la fabricación de cemento.

SCR: silicon rectifier controlled, rectificador controlado de silicio, también denominado tiristor.

Stub: características de algunas dispositivos de potencia para se atornillados a un disipador.

Shunt: dispositivo para medir altas corrientes, por medio de un voltaje de caída entre las resistencias del que esta constituido.

IEC: International Electrotechnical Commission, organización global que prepara y publica estándares internacionales para electricidad, electrónica y tecnologías relacionadas, mayor información: <http://www.iec.ch/gnote1-e.htm>

DIN: Deutsches Institut für Normung.

VDE: The Association for Electrical, Electronic & Information Technologies is a non-profit association for electrical science and technology. It was founded in 1893.

GE: General Electric, compañía encargada de diferentes productos, en este caso se hace referencia a la parte de electricidad y de electrónica.

Puzolana: son materiales síliceos o alumino-síliceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.

## Anexo B.1: Hojas de datos del tiristor SKT760 de Semikron.



# SEMIKRON

V <sub>RSM</sub>	V <sub>RRM</sub> V <sub>DORM</sub>	(di/dt) <sub>cr</sub>	I <sub>TRMS</sub> (maximum values for continuous operation)	
			1400 A	1600 A
V	V	V/μs	I <sub>TAV</sub> (sin. 180; T <sub>case</sub> = . . . ; DSC)	
			890 A (57 °C)	1020 A (56 °C)
500	400	500	SKT 600/04 D	SKT 760/04 D
900	800	500	SKT 600/08 D	SKT 760/08 D
1300	1200	1000	SKT 600/12 E	SKT 760/12 E
1500	1400	1000	SKT 600/14 E	SKT 760/14 E
1700	1600	1000	SKT 600/16 E	SKT 760/16 E
1900	1800	1000	SKT 600/18 E	SKT 760/18 E

### Thyristors

SKT 600  
SKT 760



Symbol	Conditions	SKT 600	SKT 760	Units
I <sub>TAV</sub>	sin. 180; (T <sub>case</sub> = . . .); DSC	600 (85)	760 (80)	A °C
I <sub>TRM</sub>	T <sub>vj</sub> = 25 °C; 10 ms T <sub>vj</sub> = 125 °C; 10 ms	11 500 10 000	15 000 13 000	A A
i <sup>2</sup> t	T <sub>vj</sub> = 25 °C; 8,3 ... 10 ms T <sub>vj</sub> = 125 °C; 8,3 ... 10 ms	660 500	1 125 845	kA <sup>2</sup> s kA <sup>2</sup> s
I <sub>gd</sub>	T <sub>vj</sub> = 25 °C I <sub>G</sub> = 1 A di <sub>G</sub> /dt = 1 A/μs		typ. 1 typ. 2	μs μs
t <sub>gr</sub>	V <sub>D</sub> = 0,67 · V <sub>DORM</sub>		125	A/μs
(di/dt) <sub>cr</sub>	f = 50 ... 60 Hz		150 / 500	mA
I <sub>H</sub>	T <sub>vj</sub> = 25 °C; typ./max.		0,5 / 2	A
I <sub>L</sub>	T <sub>vj</sub> = 25 °C; typ./max.		100 ... 200	μs
I <sub>q</sub>	T <sub>vj</sub> = 125 °C; typ.			
V <sub>T</sub>	T <sub>vj</sub> = 25 °C; I <sub>T</sub> = 2400 A; max.	2,0	1,65	V
V <sub>T(RO)</sub>	T <sub>vj</sub> = 125 °C	1,0	0,92	V
r <sub>T</sub>	T <sub>vj</sub> = 125 °C	0,4	0,3	mΩ
I <sub>DD</sub> ; I <sub>RD</sub>	T <sub>vj</sub> = 125 °C; V <sub>RD</sub> = V <sub>RRM</sub> V <sub>DD</sub> = V <sub>DORM</sub>		80	mA
V <sub>GT</sub>	T <sub>vj</sub> = 25 °C		3	V
I <sub>GT</sub>	T <sub>vj</sub> = 25 °C		200	mA
V <sub>GD</sub>	T <sub>vj</sub> = 125 °C		0,25	V
I <sub>GD</sub>	T <sub>vj</sub> = 125 °C		10	mA
R <sub>thjc</sub>	cont. DSC		0,038	°C/W
	sin. 180; DSC/SSC		0,040 / 0,082	°C/W
	rec. 120; DSC/SSC		0,045 / 0,093	°C/W
R <sub>thch</sub>	DSC/SSC		0,007 / 0,014	°C/W
T <sub>vj</sub>			- 40 ... + 125	°C
T <sub>stg</sub>			- 40 ... + 130	°C
F	SI units		10 ... 13	kN
	US units		2200 ... 2850	lbs.
w			240	g
Case			B 10	

### Features

- Hermetic metal cases with ceramic insulators
- Capsule packages for double sided cooling
- Shallow design with single sided cooling
- International standard cases
- Off-state and reverse voltages up to 1800 V
- Amplifying gate

### Typical Applications

- DC motor control (e. g. for machine tools)
- Controlled rectifiers (e. g. for battery charging)
- AC controllers (e. g. for temperature control)

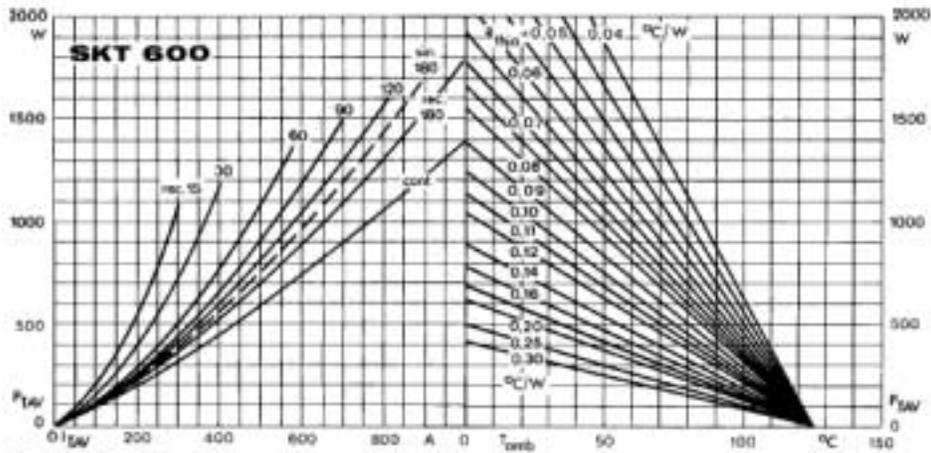


Fig. 1 a Power dissipation vs. on-state current and ambient temperature

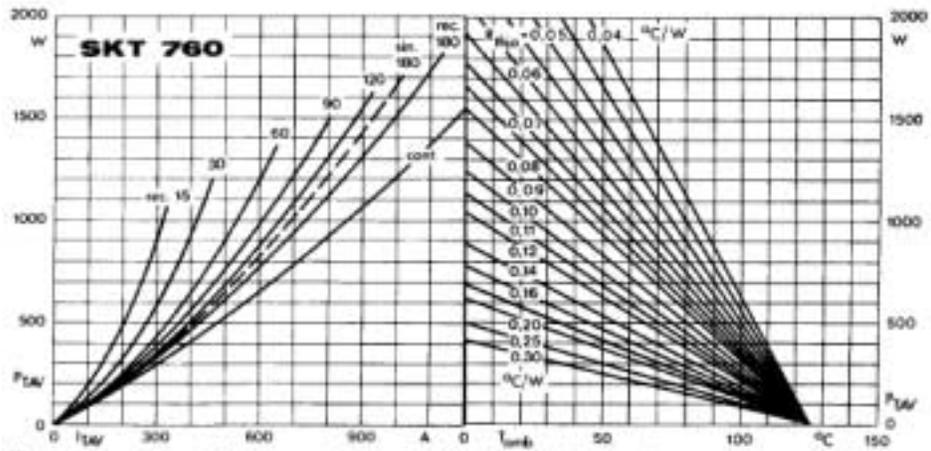


Fig. 1 b Power dissipation vs. on-state current and ambient temperature

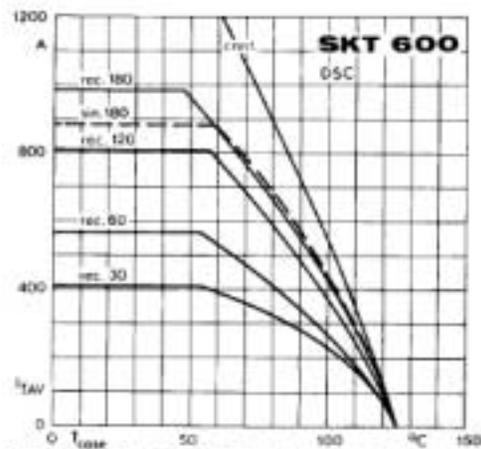


Fig. 2 a Rated on-state current vs. case temperature

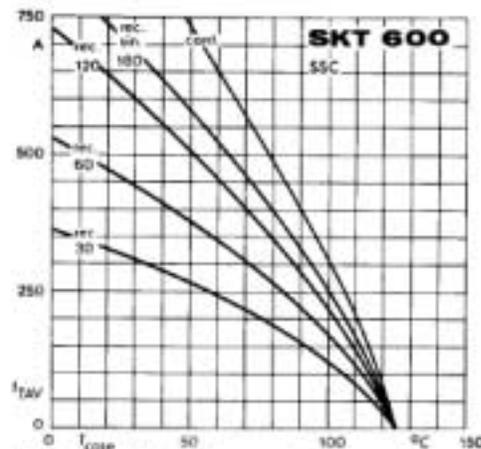


Fig. 2 b Rated on-state current vs. case temperature

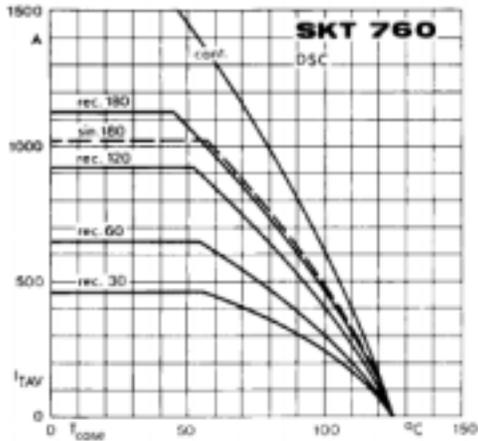


Fig. 2 c Rated on-state current vs. case temperature

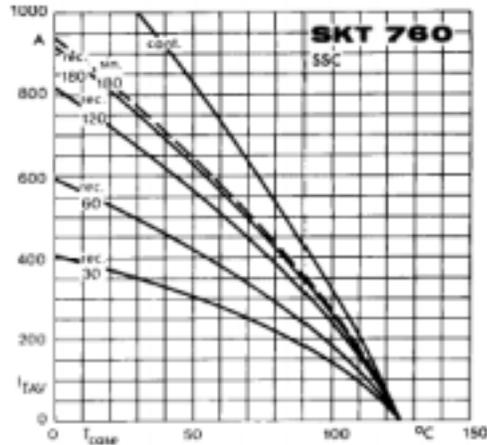


Fig. 2 d Rated on-state current vs. case temperature

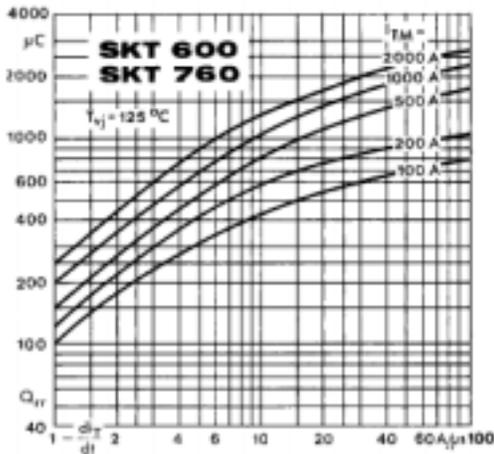


Fig. 3 Recovered charge vs. current decrease

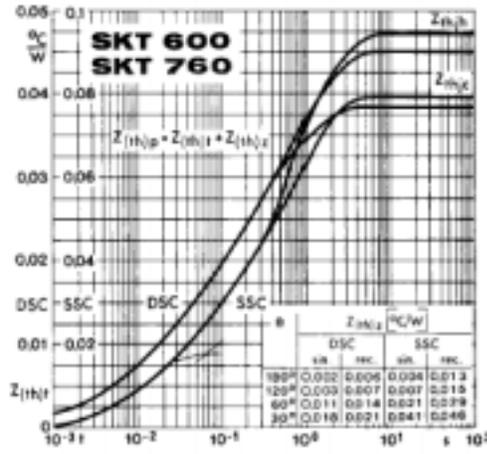


Fig. 4 Transient thermal impedance vs. time

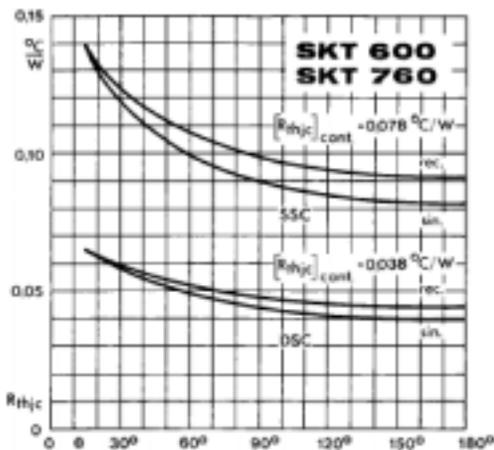


Fig. 5 Thermal resistance vs. conduction angle

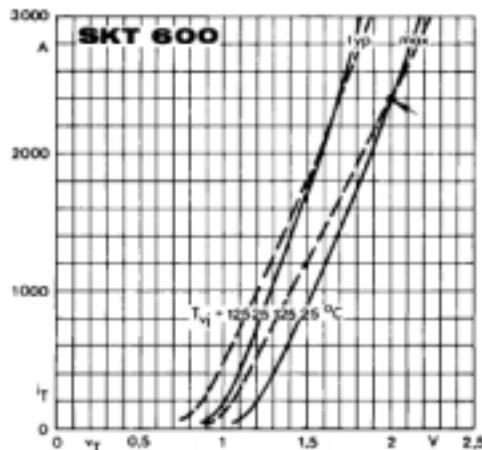


Fig. 6 a On-state characteristics

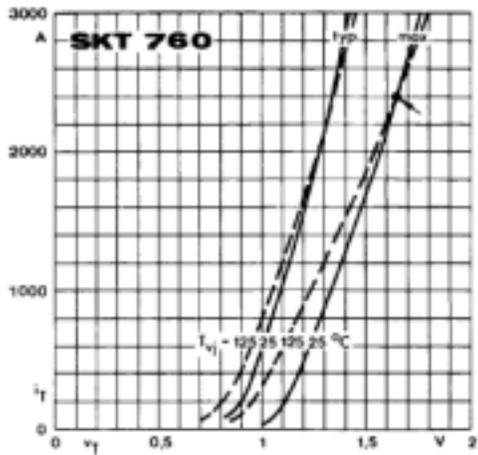


Fig. 6 b On-state characteristics

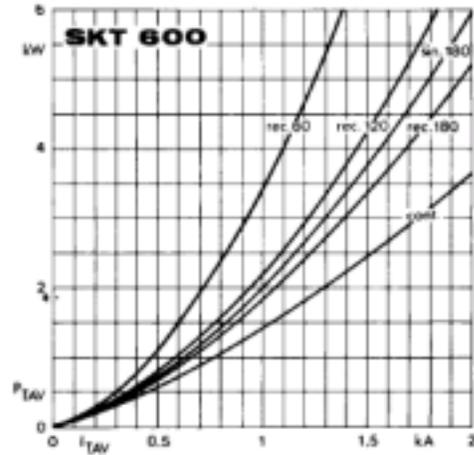


Fig. 7 a Power dissipation vs. on-state current

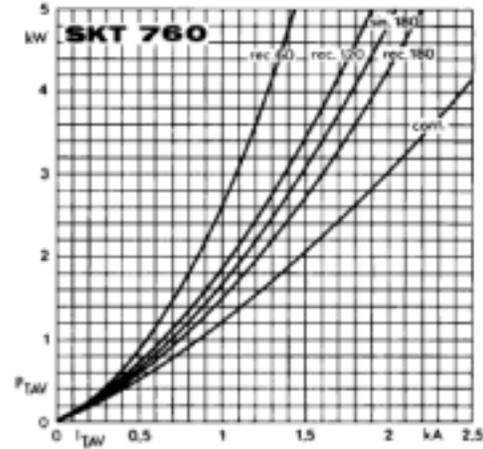


Fig. 7 b Power dissipation vs. on-state current

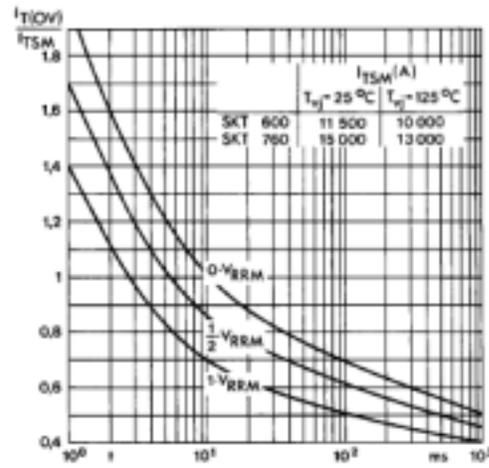


Fig. 8 Surge overload current vs. time

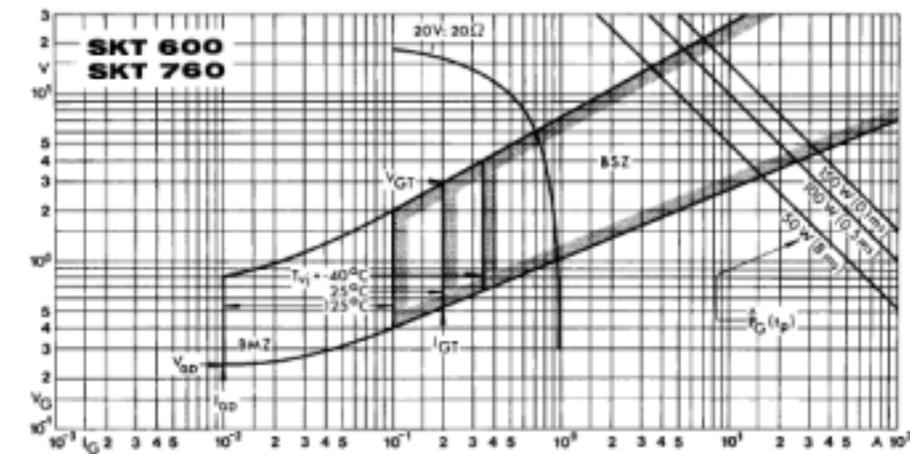
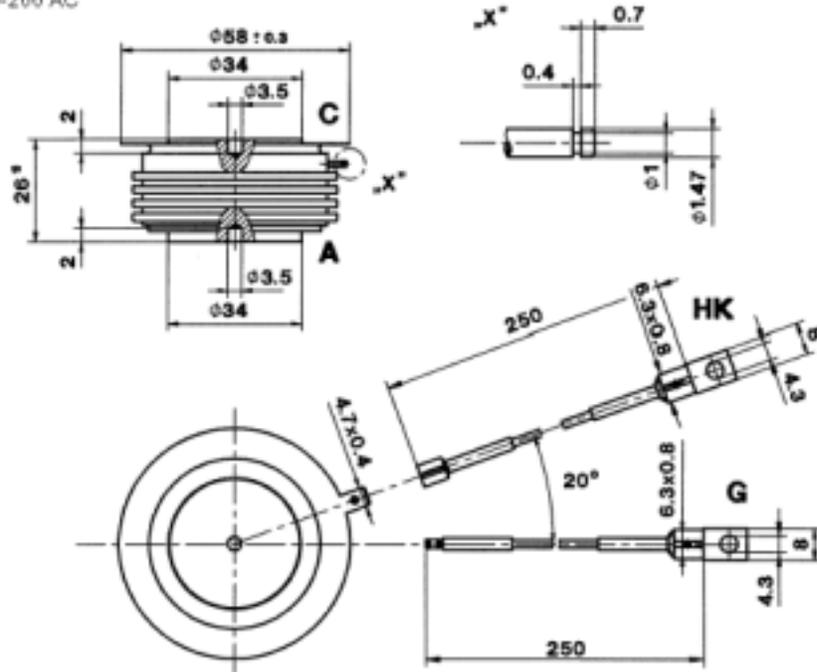


Fig. 9 Gate trigger characteristics

SKT 520  
 SKT 600  
 SKT 760  
 Case B 10

DIN 41814: 153 C 4  
 JEDEC: TO-200 AC



1) SKT 520/24 E } 27 mm  
 SKT 520/28 E }

Dimensions in mm

- C: Cathode terminal
- A: Anode terminal
- G: Gate terminal (yellow sleeve)
- HK: Auxiliary cathode terminal (red sleeve)

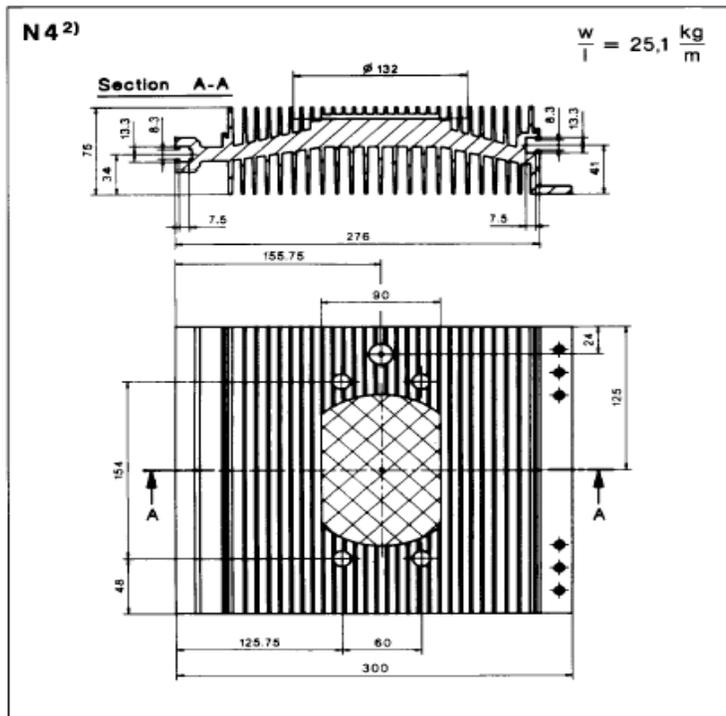
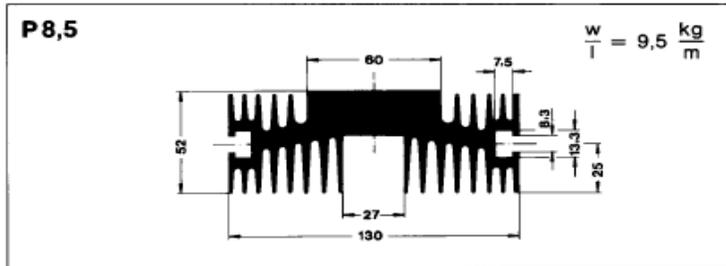
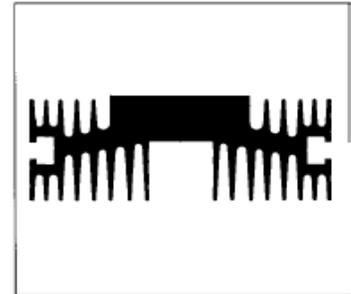
## Anexo B.2: Hojas de datos del disipador de Semikron 4N/250

[← back](#)
[zurück ←](#)

**SEMIKRON**

Standard lengths <sup>1)</sup>	Ø D mm	R <sub>thca</sub> natural cooling °C/W	R <sub>thca</sub> (v <sub>air</sub> = . . .) °C/W	w kg
<b>2 x P8,5/150</b>	33 ± 2	0,3 (200W)	0,0780 (6 m/s)	2,9
<b>2 x N4/250</b>	33 ± 2	–	0,0550 (8 m/s)	12,55
	38 ± 2	–	0,0510 (8 m/s)	
	48 ± 2	–	0,0450 (8 m/s)	
	63 ± 2	–	0,0405 (8 m/s)	
<b>2 x N4/400</b>	63 ± 2	–	0,033 (8 m/s)	20,08
	73 ± 2	–	0,030 (8 m/s)	

**Heatsinks  
P8,5  
N4**



### Features

- Intended for double-sided cooling of capsule devices ("pucks")
- For natural and forced air cooling
- Available in various lengths
- Mounting channels are provided for additional accessories

<sup>1)</sup> Non-standard lengths available on request

<sup>2)</sup> N4/250 with drill-holes and seating plane for  $\varnothing D = 63 \dots 73$  shown as an example

Dimensions in mm

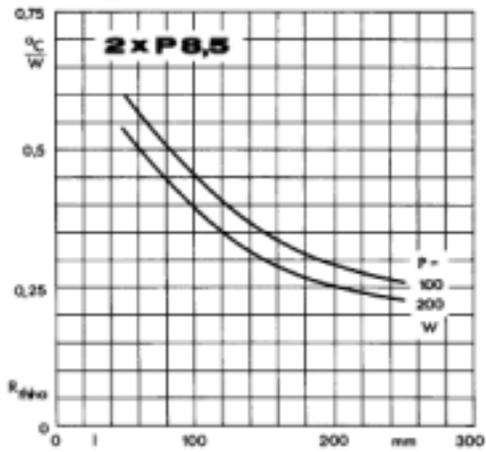


Fig. 2 Thermal resistance per component vs. length

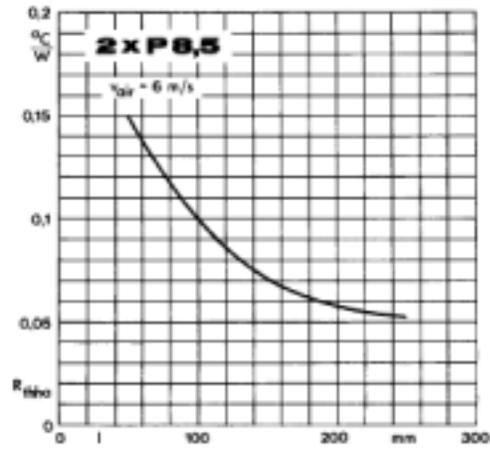


Fig. 6 a Total thermal resistance vs. length

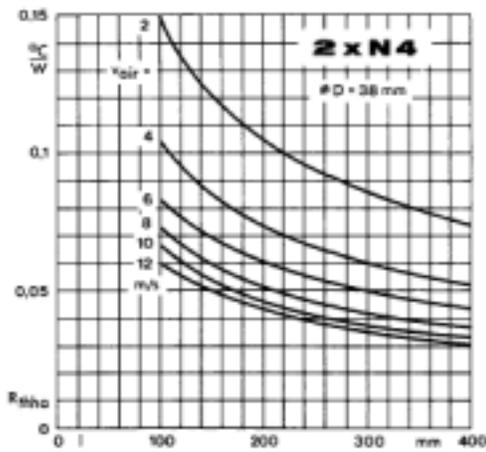


Fig. 6 b Total thermal resistance vs. length

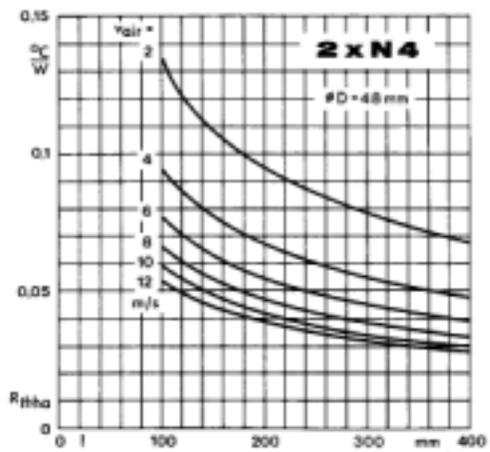


Fig. 6 c Total thermal resistance vs. length

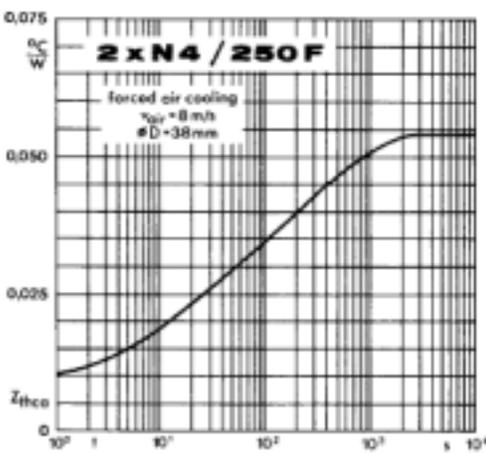


Fig. 11 a Transient thermal impedance vs. time

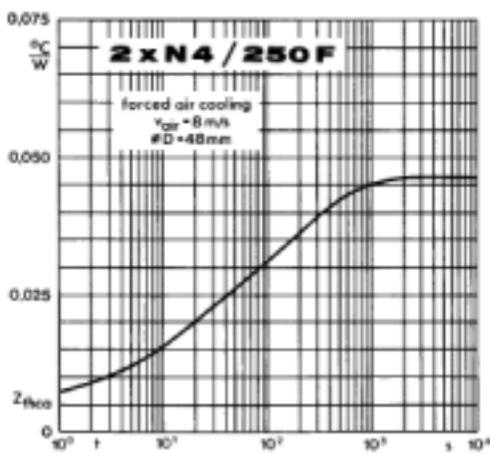


Fig. 11 b Transient thermal impedance vs. time

### Anexo B.3: Tarjeta Enerpro, para el control de disparo de los tiristores y monitoreo.

