

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**MODELO E SIMULAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE
ENERGIA EM UMA INSTALAÇÃO ELÉTRICA INDUSTRIAL**

Área de Engenharia Elétrica

por

Bruno Aparecido Gazio

Geraldo Peres Caixeta, Doutor
Orientador

Campinas (SP), dezembro de 2009

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**MODELO E SIMULAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE
ENERGIA EM UMA INSTALAÇÃO ELÉTRICA INDUSTRIAL**

Área de Engenharia Elétrica

por

Bruno Aparecido Gazio

Relatório apresentado à Banca Examinadora do
Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia
Elétrica para análise e aprovação.
Orientador: Geraldo Peres Caixeta, Doutor

Campinas (SP), Dezembro de 2009

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha namorada, aos meus pais e aos meus irmãos pela participação e por me dar forças em todos os momentos da minha vida

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força, paz e saúde para concluir este trabalho

Agradeço a minha família pela força, paciência, ajuda e compreensão

Agradeço minha namorada pela grande ajuda e compreensão pelos finais de semana dedicados a este trabalho

Agradeço meu Professor Orientador Geraldo Peres Caixeta pela orientação e dedicação para a realização deste trabalho

Agradeço aos meus colegas do trabalho pela grande ajuda e pelo apoio para a realização deste trabalho

Agradeço a Sandvik do Brasil – Divisão Kanthal por colaborar com as realizações das medições

Agradeço a todos que me ajudaram direta ou indiretamente com opiniões e incentivos para a conclusão deste trabalho

Agradeço aos professores da Universidade São Francisco

Agradeço a todos de coração, muito Obrigado

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE EQUAÇÕES.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. OBJETIVOS.....	13
1.1.1. Objetivo geral.....	13
1.1.2. Objetivos específicos.....	13
1.2. MATERIAIS UTILIZADOS.....	13
1.3. METODOLOGIA.....	14
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS.....	18
3.1. RESISTÊNCIA METÁLICA.....	18
3.1.1. Processo de fabricação.....	18
3.1.2 Exemplos de elementos.....	18
3.2. RESISTÊNCIA GLOBAL.....	18
3.2.1. Vantagens do elemento Global.....	19
3.2.2. Aplicações.....	20
3.3. TRANSFORMADORES.....	20
3.3.1. Medida de conservação de energia.....	20
3.3.2. Elevação do fator de potência.....	20
3.3.3. Redistribuição das cargas entre os transformadores.....	20
3.3.4. Desligamento dos transformadores.....	21
3.4. MÓDULO TIRISTORIZADO.....	21
3.4.1. Vantagens.....	21
3.4.2. Funcionamento.....	22
3.4.3. Considerações sobre modo de controle.....	23
3.4.4. Disparo por ângulo de fase.....	24
3.4.5 Controle por ciclo integral – Sistema trem de pulsos.....	25
3.4.6 Conservação de energia.....	26
4. MEDIÇÕES.....	28
4.1. ELEMENTO METÁLICO.....	28
4.2. ELEMENTO GLOBAL.....	29

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	31
5.1. ELEMENTO METÁLICO	31
5.1.1 Elemento metálico ligado direto na rede elétrica.....	31
5.1.2. Alimentação com transformador	32
5.1.3. Alimentação com módulo de potência tiristorizado	32
5.2. ELEMENTO DE CARBETO DE SILÍCIO	33
5.2.1. Elemento carbeto de silício ligado direto na rede elétrica.....	34
5.2.2. Alimentação com transformador	35
5.2.3. Alimentação com módulo de potência tiristorizado	36
6. CONCLUSÃO	39
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

LISTA DE ABREVIATURAS

GWh	Gigawatt-hora
SiC	Carbeto de Silício
CEPEL	Centro de pesquisa de Energia Elétrica
SCR	Silicon Controlled Rectifier
RMS	Root Mean Square
IRF	Interferência de rádio-freqüência

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplos de elementos metálicos	18
Figura 2. Elemento Global LL	19
Figura 3. Sistema monofásico com dois SCRs em antiparalelo	22
Figura 4. Sistema trifásico antiparalelo um SCR com um diodo	23
Figura 5. Sistema trifásico com seis SCRs em antiparalelo	23
Figura 6. Disparo ângulo de fase - condução de 0 a 180°	24
Figura 7. Disparo por sistema trem de pulsos	25
Figura 8. Fator de potência x disparo ângulo de fase	26
Figura 9. Resistência ôhmica a frio (20 °C)	28
Figura 10. Medindo a resistência ôhmica	28
Figura 11. Resistência metálica aquecida	29
Figura 12. Tensão aplicada	30
Figura 13. Corrente elétrica medida	30
Figura 14. Elemento Global aquecido	30
Figura 15. Coeficiente de temperatura liga KA-1 e APM	31
Figura 16. Coeficiente de temperatura liga N-80	31
Figura 17. Esquema elétrico resistência direto na rede elétrica	32
Figura 18. Módulo de potência tipo trem de pulsos	33
Figura 19. Gráfico da resistividade x temperatura	33
Figura 20. Transformador com controle tiristorizado	35
Figura 21. Transformador com vários taps e controle liga - desliga	36
Figura 22. Módulo de potência – Ângulo de fase	36
Figura 23. Esquema de ligação da resistência	37
Figura 24. Simulação Software PSCAD	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Modelos de fornos

14

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Lei de Ohm	29
------------------------------	----

RESUMO

GAZIO, Bruno. Modelo e simulação de equipamentos de controle de energia em uma instalação elétrica industrial. Campinas, 2009. nº 40. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Campinas, 2009.

O consumo de energia elétrica no país cresceu 5,4% em fevereiro de 2008 na comparação com igual período em 2007, totalizando 32.051 GWh (Gigawatt-hora). A presença de harmônicos nos sistemas de potência resulta em um aumento das perdas relacionadas com o transporte e distribuição de energia elétrica, em problemas de interferências e na degradação do funcionamento, na maior parte dos equipamentos ligados à rede. Os prejuízos econômicos resultantes destes e de outros problemas dos sistemas elétricos são muito elevados, e por isso a questão da eficiência energética com qualidade da energia elétrica é o foco. O objetivo desse estudo é simular o desempenho de modelos de fornos elétricos industriais, fornecendo subsídios de maneira a se obter uma melhoria na qualidade da energia, menos perturbações na rede, maior eficiência no aquecimento da câmara com menor consumo de energia. Foram utilizados oito modelos de fornos elétricos industriais para as simulações, quatro modelos ligados a resistência metálica e os outros quatro ligados a resistência carbeto de silício, usando simulação computacional com o software PSCAD. Onde cada resistência obteve-se um resultado diferente, pois as diferentes resistências foram ligadas diretamente na rede elétrica, no módulo de potência tiristorizado (trem de pulso e ângulo de fase) e no transformador. O módulo de potência tiristorizado apresenta maior vantagem que os contatores e os transformadores. A resistência de carbeto de silício ligada no módulo tiristorizado tipo ângulo de fase, e a resistência metálica ligada no módulo tiristorizado tipo trem de pulso tiveram melhores resultados perante qualidade e economia de energia.

Palavras-chave: Qualidade de energia, resistência metálica, resistência carbeto de silício.

ABSTRACT

The electric power consumption in the country grew 5,4% in February 2008 compared to the same period in 2007, totaling 32,051 GWh (Gigawatt-hours). The presence of harmonics in power systems results in increased losses related to transmission and distribution of electric power, interference problems and functioning deterioration in most of the equipment connected to the power network. Economic losses resulting from these and other problems with electrical systems are very high, so the issue of energy efficiency with power quality is the focus. The aim of this study is to simulate model's performance of industrial electric furnaces, providing support in order to achieve an improvement in energy quality, less network disruption, more efficient in chamber heating with lower power consumption. Will be used eight models of industrial electric furnaces for simulations, four models working with metallic resistance and other four working with silicon carbide resistance, using computer simulation with PSCAD software. For each resistance was obtained different results because the different resistances were connected directly to the power network, power module thyristorized (cycle firing and phase angle) and the transformer. The power module thyristorized presents biggest advantage than the contactors and transformers. The silicon carbide resistance linked to thyristorized module type phase angle, and the metallic resistance connected in the thyristorized module type cycle firing had better results considering quality and saving energy.

Keywords: Power Quality, Metallic Resistance, Silicon Carbide Resistance.

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica no país cresceu 5,4% em fevereiro de 2008 na comparação com igual período em 2007, totalizando 32.051 GWh (Gigawatt-hora). Nos dois primeiros meses de 2008, o mercado de energia elétrica registrou alta média de 5,2%. Nos últimos doze meses terminados em fevereiro 2008, o crescimento do consumo de energia elétrica é de 5,6%, [1].

Com esses aumentos necessita-se de estudos para uma diminuição no consumo de energia elétrica que ocorre em equipamentos industriais, como o forno elétrico, no qual dependendo de suas ligações, pode gastar energia elétrica de maneira desnecessária para manter certa temperatura na câmara de aquecimento e uma boa qualidade e energia.

A presença de harmônicos nos sistemas de potência resulta em um aumento das perdas relacionadas com o transporte e distribuição de energia elétrica, em problemas de interferências e na degradação do funcionamento, na maior parte dos equipamentos ligados à rede. Os prejuízos econômicos resultantes destes e de outros problemas dos sistemas elétrico são muito elevados, e por isso a questão da eficiência energética com qualidade da energia elétrica é o foco, [2].

O mercado está cada vez mais competitivo e soluções que indicam melhorias e inovações no processo e no produto final com a diminuição do custo-final de produção, são exemplos de mecanismos favoráveis à competitividade. Este trabalho se apresenta como uma ferramenta de apoio na tomada de decisões quanto ao processo de produção de fornos elétricos empregados na indústria de manufatura de produtos cerâmicos, metalurgia, vidros, indústria eletrônica e demais equipamentos que necessitam de aquecimento.

Segundo o manual Kanthal Handbook os empregos de fornos a gás ou a óleo são menos eficientes, a eficiência de aquecimento é menor, sendo de 50%, comparando com a energia elétrica que é de 70 – 85% e a manutenção do forno a gás ou a óleo é mais alta, pois necessita checar as válvulas regularmente e um maior espaço de utilização. [3]

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo desse estudo é simular o desempenho de modelos de fornos elétricos industriais, fornecendo subsídios de maneira a se obter uma melhoria na qualidade da energia, menos perturbações na rede, maior eficiência no aquecimento da câmara com menor consumo de energia.

1.1.2. Objetivos específicos

- Modelar e simular computacionalmente modelos de fornos elétricos;
- Simular modelos de instalações elétricas;
- Comparar as ligações realizadas com contadores, transformadores e com módulos de potência tiristorizado.
- Comparar a resistência de carbeto de silício com a resistência metálica.

1.2. MATERIAIS UTILIZADOS

Para as simulações foram utilizados os seguintes materiais:

- Software PSCAD;
- Computador pessoal.

Para as medições foram utilizados os seguintes materiais:

- Resistência de elemento metálico, Kanthal;
- Resistência de carbeto de silício (SiC), Glocal Kanthal;
- Transformador;
- Multímetro da HP;
- Multímetro da Fluke;
- Alicata amperímetro da Fluke;

- Voltímetro Kron;
- Multimetro da Kron;
- Módulo de potência tiristorizado da Therma;

1.3. METODOLOGIA

Foram utilizados dois modelos de resistência elétrica para simulações, com as características mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos de fornos

Caso	Pot (kW)	V (Volts)	I (Amper)	Res (Ω)	Mod. Resistência	Lig.
1	10	110	90	1,21	Metálica	Direta
2	10	110	90	1,21	Metálica	Transformador
3	10	110	90	1,21	Metálica	Ângulo de Fase
4	10	110	90	1,21	Metálica	Trem de pulsos
5	6,38	55	116	0,474	(SiC)	Direta
6	6,38	55	116	0,474	(SiC)	Transformador
7	6,38	55	116	0,474	(SiC)	Ângulo de Fase
8	6,38	55	116	0,474	(SiC)	Trem de pulsos

- Medição da resistência ôhmica, corrente elétrica e voltagem;
- Simulação computacional utilizando o software PSCAD, aplicados nos modelos acima;
- Análise de resultados obtidos das simulações e medições.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em quatro etapas.

Na primeira etapa está descrita a introdução deste trabalho, o objetivo geral e específico, os materiais e a metodologia utilizada para a conclusão deste trabalho.

Na segunda etapa será tratada a fundamentação teórica na qual está pautado este trabalho.

Na terceira etapa os materiais trabalhados, suas estruturas, seus componentes.

Na quarta e última etapa, a análise dos resultados obtidos a partir da simulação dos elementos e conclusão.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Tratando em energia tem que se levar em conta a necessidade mundial do seu uso adequado, uma vez que é um recurso que apresentará escassez no futuro. Partindo disso, procuramos expor dentro das simulações propostas, uma maneira de observar o desempenho de modelos de fornos elétricos industriais para que atingisse melhorias na qualidade de energia, com menos perturbações na rede, apresentando uma maior eficiência no aquecimento e um menor consumo de energia.

Para Burani et al, em seu texto intitulado “Uso racional e econômico da energia dentro de uma indústria metalúrgica: oportunidade de troca de eletricidade para gás natural” os transformadores utilizam cerca de 5% de sua capacidade para consumo próprio e mesmo sem carga, há consumo de energia devido às perdas joule (calor) e para manter os circuitos magnetizados e prontos para utilização. [4]

Segundo Eletrobrás – CEPEL, Centro de pesquisa de Energia Elétrica, os transformadores como todo equipamento apresenta perdas, sendo classificadas em dois tipos:

Perdas no núcleo magnético (perdas no ferro). Essas perdas são constantes, basta que o transformador esteja ligado para que eles aconteçam.

Perdas no enrolamento (perdas no cobre). A circulação de corrente pelos enrolamentos provoca perda por efeito Joule, quanto maior a corrente que circula no transformador, maior será a perda no cobre. [5]

Segundo a empresa Therma Instrumentos de Medição Automação e Projetos Ltda., em seu manual, os conversores de potência tiristorizados vêm sendo comercializados desde o fim dos anos 50, desde então, a aplicação têm crescido e vêm sendo difundida em vários setores industriais para controle de temperatura nos banhos de fusão de fiber glass. Devido à simplicidade e as vantagens do circuito eletrônico de disparo dos SCRs, os módulos tiristorizado têm efetivamente substituído com vantagens as antigas válvulas thyatron, transformadores para controle de potências elétricas, etc. sendo utilizado para os controles de temperatura, pressão e velocidade de rotação.

Um conversor de potência com SCRs projetado apropriadamente com tempos rápidos de disparo para “condução” e “não condução”, possui uma eficiência que excede as melhores aplicações de transformadores (melhor do que 99%). [6]

3. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS

3.1. RESISTÊNCIA METÁLICA

Os materiais metálicos KANTHAL são utilizados com sucesso na forma de fios, fitas, tubos radiantes e tubos de proteção. São usados principalmente em aquecimento de fornos nas indústrias de aço, tratamento térmico e alumínio. Os elementos metálicos KANTHAL contribuem para um grande aumento na produtividade dos fornos e oferece maior potência, menor manutenção e uma vida útil mais prolongada. Os elementos abrangem uma faixa de temperatura entre 50 – 1350 °C. [7]

3.1.1. Processo de fabricação

O processo de fabricação de elementos metálicos consiste em etapas padronizadas pela matriz na Suécia, onde o material recebe todo um tratamento térmico adequado antes da produção dos elementos.

3.1.2 Exemplos de elementos

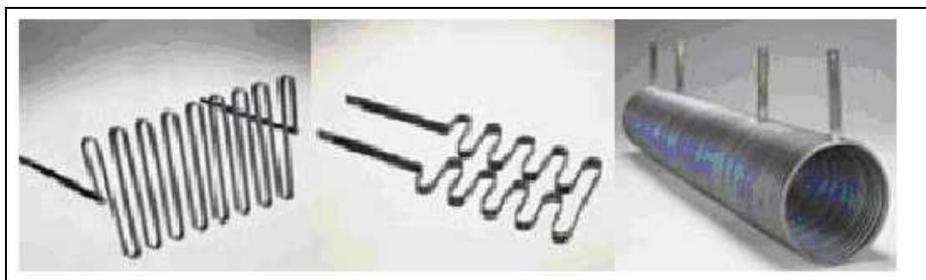


Figura 1. Exemplos de elementos metálicos

3.2. RESISTÊNCIA GLOBAL

Resistência de carvão de silício marca Global, Modelo LL, fabricante Kanthal, o elemento Global LL é constituído de grãos de carvão de silício de qualidade altamente controlada, apresentando alta pureza e densidade nas três seções constituintes desse elemento. Ele é projetado para operações de aquecimento até 1450°C em ar atmosférico, possuindo uma zona quente bem definida e duas partes frias altamente condutoras, (Figura 2).

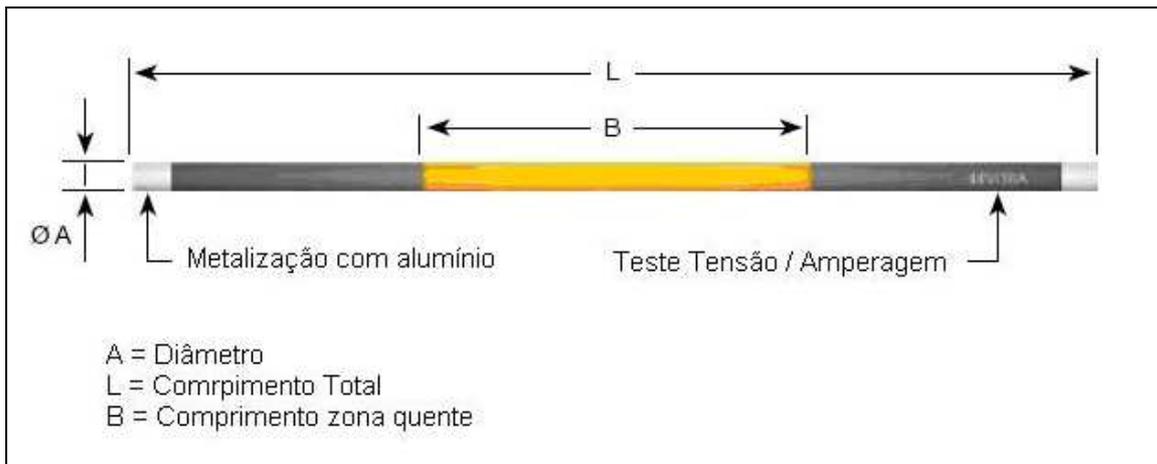


Figura 2. Elemento Global LL

A seção de aquecimento é uma estrutura de carbeto de silício de grandes cristais uniformes e fortemente ligados; é dimensionalmente estável e a sua resistência mecânica não varia com a temperatura.

As partes frias são impregnadas com silício metálico para proporcionar uma baixa resistência elétrica à passagem de corrente, o que significa altíssima condutividade elétrica dessas seções. Esta impregnação com silício metálico permanece estável durante toda a vida do elemento. As extremidades são ainda metalizadas com alumínio para proporcionar uma baixa resistência de contato elétrico com os terminais flexíveis, também de alumínio. [8]

3.2.1. Vantagens do elemento Global

O aquecimento elétrico com elementos Global é econômico, confiável, silencioso, limpo, seguro, e ainda, não libera gases nocivos à saúde. Não oferece problemas de estocagem de combustível e nem preocupação com o controle desse estoque.

Os fornos equipados com Global são versáteis, podendo operar eficientemente com uma grande faixa de produtos e atmosferas, sendo que as temperaturas podem ser controladas tão precisamente quanto se queira. Os elementos de carbeto de silício são de simples instalação e substituição, não necessitando suportes de material refratário para sua sustentação. [8]

3.2.2. Aplicações

Queima de Cerâmica; Tratamento Térmico; Sinterização; Forjaria; Recozimento; Fundição e Espera; Ensaio de Choque Térmico; Calcinação; Laboratório; Cerâmica Avançada. [8]

3.3. TRANSFORMADORES

Como todo equipamento, o transformador apresenta perdas. Essas perdas podem ser classificadas em dois tipos:

- Perdas no núcleo magnético (perdas no ferro). Essas perdas são constantes. Basta que o transformador esteja ligado para que eles aconteçam.
- Perdas no enrolamento (perdas no cobre). A circulação de corrente pelos enrolamentos provoca perda por efeito Joule. Quanto maior a corrente que circula no transformador, maior será a perda no cobre.

3.3.1. Medida de conservação de energia

Uma vez adotada qualquer medida de economia, além dessa economia no uso final, existe também uma economia no transformador, pois a carga em questão terá uma menor solicitação de potência, e conseqüentemente, menores são as perdas no cobre. [5]

3.3.2. Elevação do fator de potência

A elevação do fator de potência reduz a componente indutiva da corrente, reduzindo o valor da corrente de carga. [5]

3.3.3. Redistribuição das cargas entre os transformadores

Quando uma indústria dispõe de mais de um transformador, pode-se obter uma redução das perdas com uma adequada redistribuição das cargas, de forma que os transformadores que operam com carregamento elevado tenham sua corrente reduzida, enquanto que outros, com carregamento baixo, recebam parte da carga. [5]

3.3.4. Desligamento dos transformadores

Uma das formas de eliminar as perdas no núcleo é desligar o transformador quando este não estiver alimentando nenhuma carga. Sendo assim, indústrias que não operam no período noturno e em fins de semana reduzirão o seu consumo de energia elétrica, se desligar seus transformadores. [5]

3.4. MÓDULO TIRISTORIZADO

Os conversores de potência tiristorizados foram os primeiros a serem comercializados no fim dos anos 50 para controle de temperatura nos banhos de fusão de fiber glass. Desde então a aplicação dos conversores têm crescido e vêm sendo difundida em vários setores industriais.

A principal aplicação dos conversores de potência é no controle de temperatura de fornos elétricos, estufa, etc. Outras aplicações, tais como, o controle da tensão sobre elementos de aquecimento por indução, calhas vibratórias, velocidade de motores em corrente alternada estão começando a ser usadas, junto com a função original de controle de temperatura.

Hoje em dia, por causa de suas vantagens e da simplicidade do circuito de comando eletrônico de disparo dos SCRs, com a função de controle de temperatura, pressão, velocidade de rotação, os conversores de potência utilizando SCRs têm efetivamente substituído com vantagens as antigas válvulas thyatron, transformadores para controle de potenciais elétrico, etc.

Os conversores de potência com SCRs dispõem de componentes que permitem o controle de cargas elevadas na ordem de megawatts, abrindo um novo nicho comercial e assim ampliando sua aplicação nos mais diversos e complexos sistemas. [6]

3.4.1. Vantagens

As vantagens dos conversores de potência com SCRs incluem: alta eficiência, baixo custo, dimensões reduzidas, simplicidade no manuseio e alta confiabilidade. Como não existem partes móveis, nem desgastes, a sua manutenção reduz-se ao mínimo e sua eficiência supera a dos transformadores, isto é, melhor do que 99%.

O novo projeto dos SCRs em forma de disco permite maior utilização e uma variada gama de aplicações na ordem de 100 – 1000 kW em comparação no uso de transformadores, estes limitados a 1/10 de sua utilização.

Atualmente, encontra-se em desenvolvimento SCRs de disparo rápido, que permite introduzir sistemas de prevenção contra curto – circuitos mais eficientes, comparados aos sistemas eletromecânicos até então conhecidos. [6]

3.4.2. Funcionamento

A denominação SCR (Silicon Controlled Rectifier) também é conhecida como “Tiristor”. Tiristor ou SCRs tem sua aplicação em redes de até 3000 volts e correntes até 2000 A RMS com refrigeração forçada a ar. No caso de refrigeração à água, atingem-se potências em valores de megawatts.

O tiristor é um elemento que opera basicamente como interruptor rápido, unidirecional. Quando aplicada uma tensão senoidal de rede alternada, ele conduz a corrente em questão de micro segundos e da mesma forma deixa de conduzir quando a senóide atinge seu valor zero. Devido à característica unidirecional, é necessário configurar dois SCRs em antiparalelo para conduzir uma corrente alternada (senóide) completa (Figura 3).

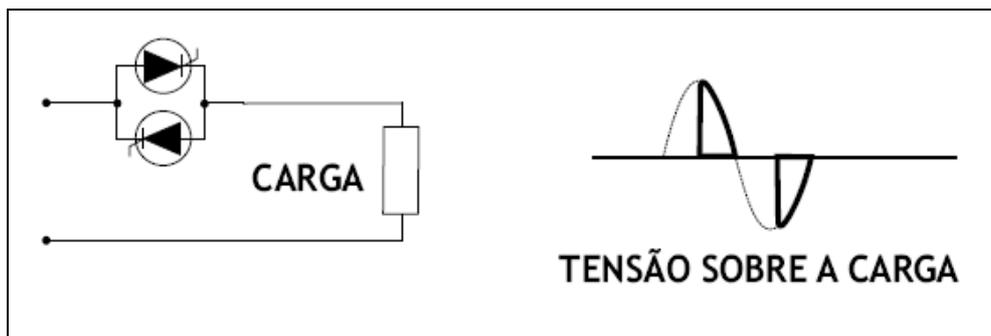


Figura 3. Sistema monofásico com dois SCRs em antiparalelo

No sistema trifásico, um dos componentes que forma a ligação antiparalelo, pode ser substituído por diodo (Figura 4) com o intuito em diminuir custos do módulo eletrônico de disparo dos SCRs.

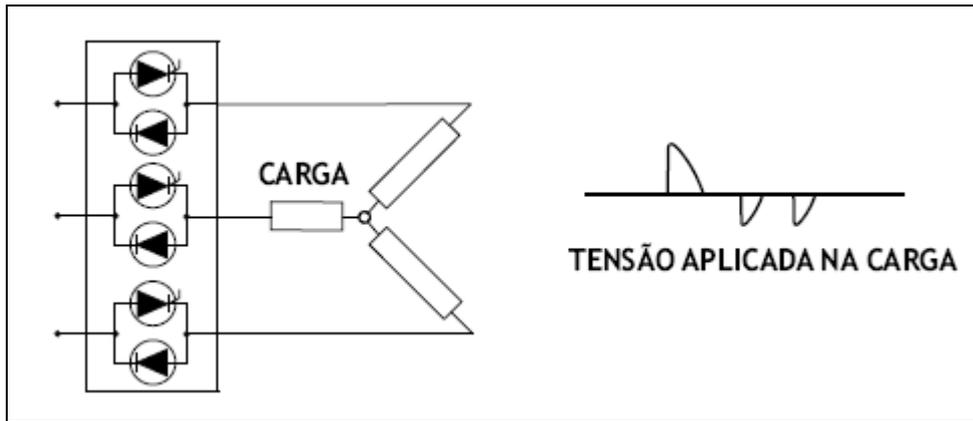


Figura 4. Sistema trifásico antiparalelo um SCR com um diodo

A configuração mostrada na Figura 4 é usualmente aplicada em todos os tipos de circuitos de carga resistiva. Devido a sua assimetria na tensão de saída, opta-se por usar uma ponte com 6 SCRs (Figura 5) para minimizar o aparecimento de campos magnéticos bem como equilibrar as formas de onda positiva e negativa como também eliminar o aparecimento de indesejáveis correntes contínuas saturadas. [6]

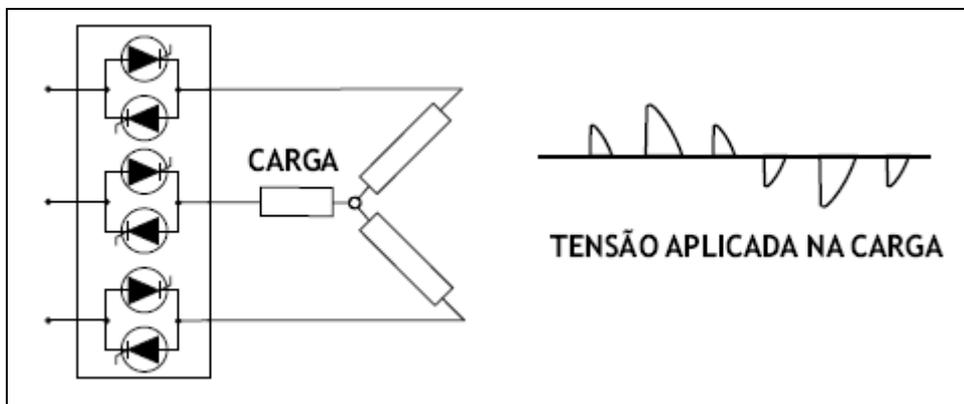


Figura 5. Sistema trifásico com seis SCRs em antiparalelo

3.4.3. Considerações sobre modo de controle

A potência liberada para a carga pode ser regulada por conversores de potência pelos métodos de disparo por ângulo de fase ou disparo pela passagem de zero da senóide (zero crossing). Cada modo de disparo tem suas vantagens ou desvantagens considerando sua aplicação.

3.4.4. Disparo por ângulo de fase

O modo de controle por ângulo de fase, corta o semi-ciclo da senóide tanto positiva como negativa durante o momento de “ligado” e “desligado” do tiristor. A porção “ligada” é comumente denominada de “ângulo de condução”. No controle do ângulo de fase do tiristor desde zero até 180° elétricos, a tensão sobre a carga varia de zero volt (condução com ângulo zero elétrico) até a tensão plena sobre a carga (180° elétricos de ângulo de condução) em todos os estágios. [6]

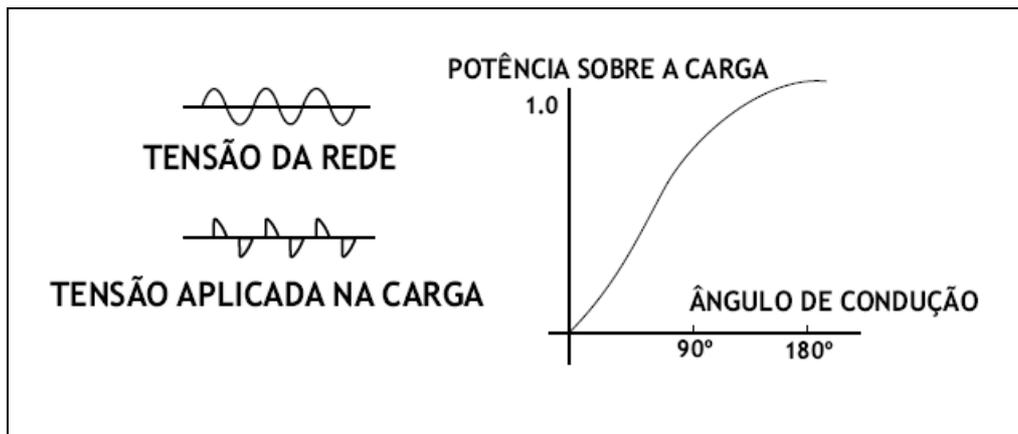


Figura 6. Disparo ângulo de fase - condução de 0 a 180°

As vantagens do modo de disparo por ângulo de fase são as seguintes: permite obter um disparo inicial suave (soft-start) bem como poder limitar a corrente máxima sobre a carga.

As desvantagens são: gera interferências de rádio frequência (IRF) durante o disparo do tiristor bem como baixar sensivelmente o fator de potência (cosphi) com reflexos sobre a remuneração da energia elétrica. Este sistema é aplicado sobre as cargas não lineares (resistências de carvão de silício ou tungstênio), cargas indutivas (transformadores) controle de velocidade de motores em corrente alternada ou em sistemas de controle de iluminação. [6]

3.4.5 Controle por ciclo integral – Sistema trem de pulsos

O modo de disparo pela passagem de zero da senóide envia pacotes completos de senóide para a carga, dependendo do nível do sinal de comando. A corrente recebida pela carga é um pacote de senóides completas quando o comando está “ligado” ou “desligado” sempre pela passagem pelo zero da senóide através do conversor de potência, bem como a saída de potência varia linearmente na condução de energia (Figura 7).

As vantagens deste tipo de controle é a eliminação da IRF, bem como, transientes de perturbação refletidas de volta ao sistema da rede de alimentação. A sua maior vantagem hoje em dia é sobre o mercado consciente no aproveitamento de energia, pois libera um fator de potência próximo a ($\cos \Phi = 1$) sobre a carga resistiva. [6]

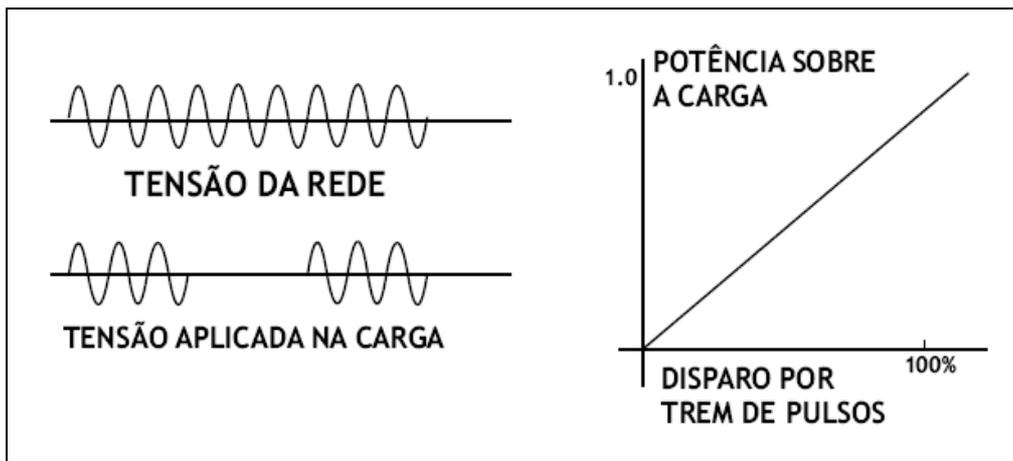


Figura 7. Disparo por sistema trem de pulsos

Como desvantagem, este sistema de disparo não permite atuar no controle sobre primário de transformadores ou permitir limitar a corrente sobre uma carga devido ao pico de corrente sobre a mesma.

A maior aplicação deste modo de controle de forma proporcional é sobre cargas resistivas ou similares com baixo índice de coeficiente de variação de temperatura da carga. Nota: atualmente é possível fazer o controle sobre uma carga indutiva, disparando-se o primeiro semi-ciclo da senóide em ângulo de disparo aproximadamente em 60° elétricos, minimizando-se o fenômeno de “in-rush” característico neste tipo de carga. Outros sim existem dispositivos de proteção contra surtos de sobre corrente. [6]

3.4.6 Conservação de energia

Um conversor de potência com SCRs projetado apropriadamente, com tempos rápidos de disparo para “condução” e “não condução”, possui uma eficiência que excede as melhores aplicações de transformadores (melhor do que 99%).

A sua resposta instantânea do sinal de comando, minimiza a flutuação de corrente sobre a carga. No caso de aplicação de contator convencional para controle de temperatura em fornos ou estufas, provoca uma flutuação muito grande da temperatura resultando em perdas por radiação e produtos finais de baixa qualidade submetidas a estas variações. [6]

Porém recentemente, estas limitações foram baseadas primariamente considerando o uso de conversores de potência com SCRs, pois se sabia que a forma de onda distorcida que nasce através do comando com SCRs quando o comando de disparo é por ângulo de condução sobre carga resistiva, causando um rebaixamento no valor do fator de potência ($\cos \Phi$).

Este efeito pode ser demonstrado ao ser determinada a potência sobre a carga (Watts) como produto do vetor da tensão (V) senoidal da rede e a forma do corte da senóide da corrente (A) expressa na fórmula de Fourier.

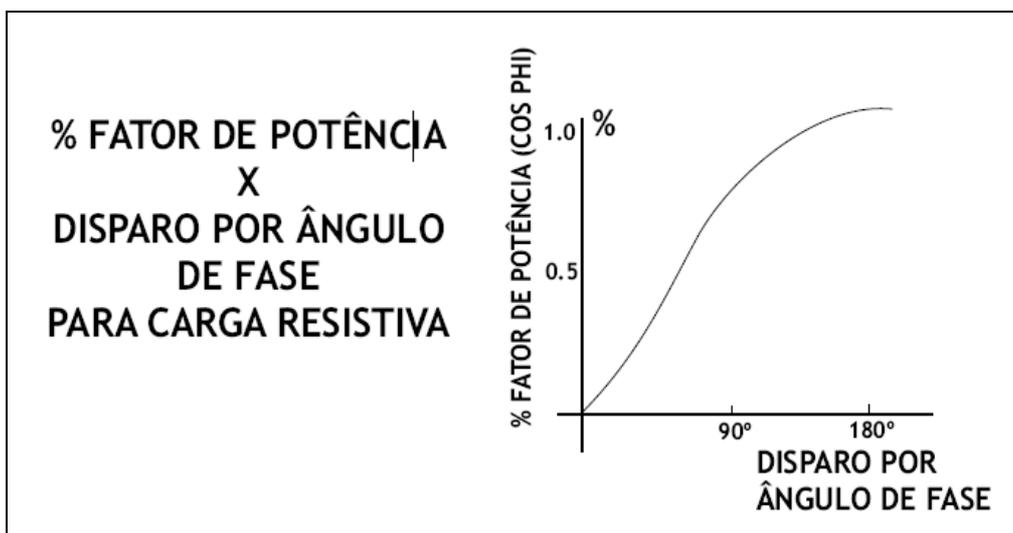


Figura 8. Fator de potência x disparo ângulo de fase

Na participação atual sobre a “conscientização da energia” (economia) o fator de potência ($\cos \Phi$) sobre uma carga resistiva deve ser levado em conta, pois seu valor varia de 10% até 98% dependendo do ângulo de condução. A metade da tensão sobre a carga (90° elétricos de ângulo de condução) registra-se um fator de potência de 70%.

Nos contratos de fornecimento de energia elétrica, um fator de potência de 70% está sujeito a penalidades que refletem no aumento da conta de energia. Por causa deste fato, o modo de disparo por ângulo de fase deve ser aplicado onde é absolutamente necessário e em qualquer outro lugar deve-se escolher o modo de disparo pela passagem da senóide pelo zero (zero crossing) que opera sobre a carga com fator de potência ($\cos \Phi = 1,0$). [6]

3.5. SOFTWARE PSCAD

A ELECTROMAG [9] é a representante oficial e exclusiva do PSCAD no Brasil. O PSCAD é um software de simulação desenvolvido pela Manitoba-HVDC, dedicado ao projeto e à análise de sistemas de potência, fornecendo resultados rápidos e precisos através de uma interface gráfica bastante amigável. Utilizado em estudos de qualidade de energia, análises de defeitos e planejamento energético, o PSCAD permite aprimorar o desempenho e a confiabilidade do seu sistema de potência. PSCAD é ideal para análises de transitórios, envolvendo a presença de:

Linhas e cabos de energia

Cargas industriais altamente não-lineares

Acionamentos com eletrônica de potência

Faltas assimétricas

Geração de energia distribuída

Máquinas rotativas

Sistemas FACTS/HVDC

4. MEDIÇÕES

4.1. ELEMENTO METÁLICO

Realizada as medições da resistência ôhmica, corrente elétrica e tensão do elemento metálico, a resistência ôhmica a frio foi medida no multímetro da marca HP – Hewlett Packard modelo 3478 A “mutimeter”, a corrente elétrica foi medida em um alicate amperímetro da marca Fluke modelo 336 True RMS “clamp meter” e a tensão aplicada foi medida em um multímetro da marca Fluke modelo 179 True RMS, a resistência ôhmica a frio foi de 1, 1642 ohms conforme a figura 9, aplicado uma tensão de 110 volts a corrente medida na partida foi de 94 A, conforme a resistência foi aquecendo e ganhando temperatura a corrente foi caindo até estabilizar em 92,7 A.



Figura 9. Resistência ôhmica a frio (20 °C)

Fonte: Medição realizada na Sandvik do Brasil S.A – Área de produto Kanthal



Figura 10. Medindo a resistência ôhmica

Fonte: Medição realizada na Sandvik do Brasil S.A – Área de produto Kanthal

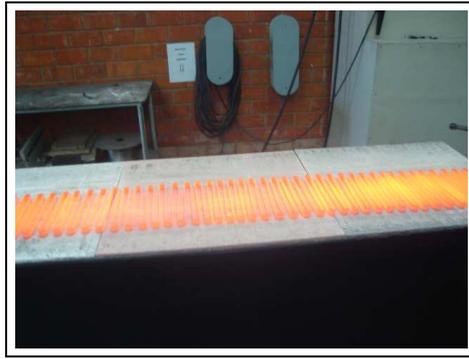


Figura 11. Resistência metálica aquecida

Fonte: Medição realizada na Sandvik do Brasil S.A – Área de produto Kanthal

4.2. ELEMENTO GLOBAL

No elemento de carbetto de silício foram realizadas as medições da tensão aplicada e a corrente elétrica, diferente da resistência metálica o elemento Global não tem como medir a resistência ôhmica a frio, neste caso a resistência ôhmica terá que ser calculada pela equação,

Equação 1 – Lei de Ohm

$$R = U / I$$

Onde:

R = resistência ôhmica;

U = tensão aplicada;

I = corrente elétrica medida.

As medições foram realizadas no painel elétrico, foi utilizado um módulo de potência tiristorizado da marca Therma tipo ângulo de fase para alimentar as resistências e foi aplicada tensão de 0 até 55 volts, a tensão aplicada foi medida pelo voltímetro da Marca Kron, conforme (Figura 12), e a corrente foi medida pelo multimedidor trifásico da marca Kron modelo MKM – X, conforme (Figura 13). [8]



Figura 12. Tensão aplicada

Fonte: Medição realizada na Sandvik do Brasil S.A – Área de produto Kanthal



Figura 13. Corrente elétrica medida

Fonte: Medição realizada na Sandvik do Brasil S.A – Área de produto Kanthal

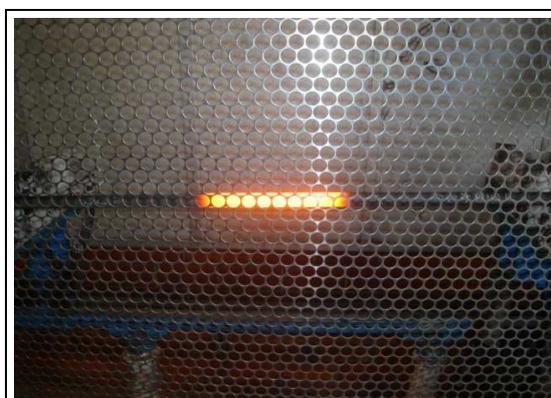


Figura 14. Elemento Global aquecido

Fonte: Medição realizada na Sandvik do Brasil S.A – Área de produto Kanthal

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. ELEMENTO METÁLICO

Os elementos de aquecimento metálicos são lineares e sofrem uma pequena variação na resistência ôhmica com o aumento da temperatura, essa variação com a temperatura chama-se C_t (Coeficiente de temperatura), esse C_t é multiplicado pelo valor da resistência ôhmica a fio e depende da liga metálica que esta sendo utilizada, para as ligas Kanthal FeCrAl (exemplos KA-1 e APM) verificar (Figura 15), para ligas Nikrothal NiCr (exemplo N-80) verificar (Figura 16).

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
C_t	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05

Figura 15. Coeficiente de temperatura liga KA-1 e APM

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
C_t	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07

Figura 16. Coeficiente de temperatura liga N-80

5.1.1 Elemento metálico ligado direto na rede elétrica

Como a variação da resistência ôhmica do elemento metálico é baixa comparada com o elemento de carbeto de silício (SiC) Global, a conexão dos elementos direto na rede elétrica pode ser feita sem problema, o controle e feito através de um controlador de temperatura, onde é ajustado a temperatura desejada e um sensor (ex. Termopar) faz a leitura e manda o sinal para o controlador de temperatura ligar ou desligar a resistência através de um contator, (Figura 17).

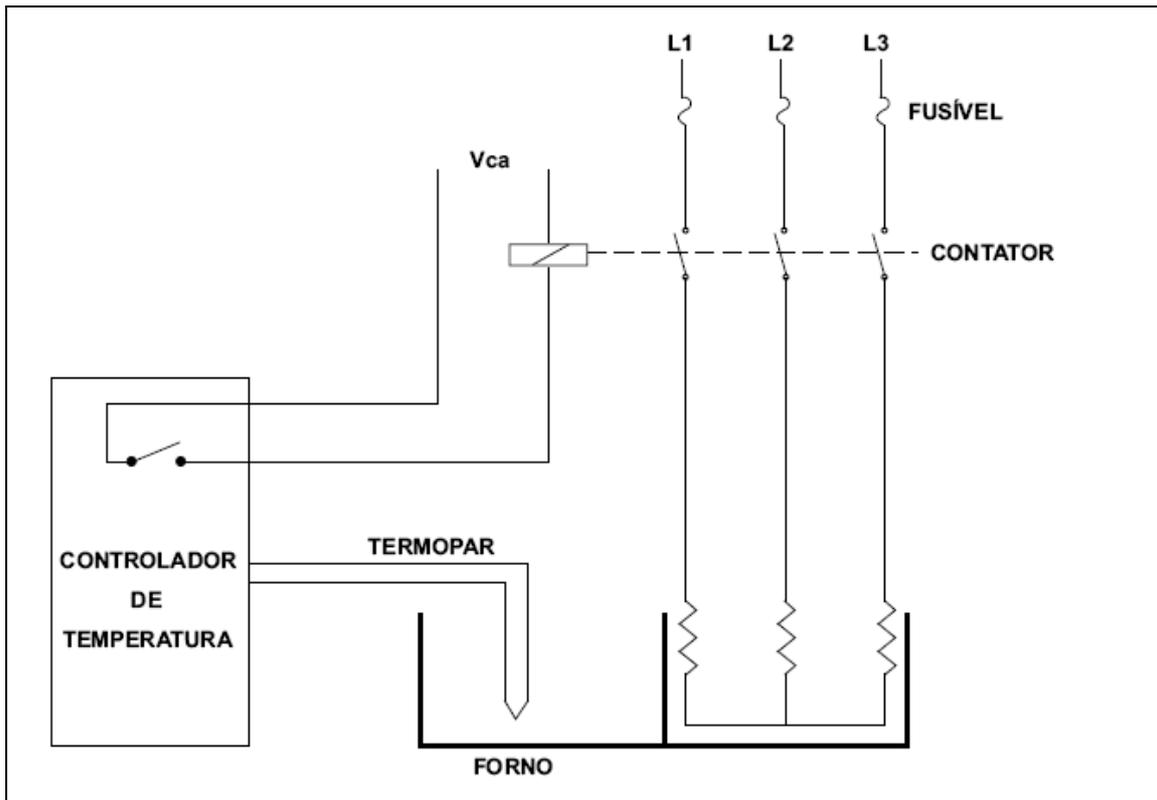


Figura 17. Esquema elétrico resistência direta na rede elétrica

5.1.2. Alimentação com transformador

Utiliza-se transformador onde a tensão de rede é muito alta para alimentar as resistências, neste caso o transformador serve para abaixar a tensão na resistência.

5.1.3. Alimentação com módulo de potência tiristorizado

Os módulos de potência tiristorizado podem ser de dois modelos, trem de pulsos e ângulo de fase, esses modelos podem ser utilizados para alimentar as resistências metálicas. O melhor modelo para alimentar as resistências metálicas é o tipo trem de pulsos (Figura 18). Com os módulos de potência consegue-se uma economia de energia em torno de 20% comparada com os contatores.

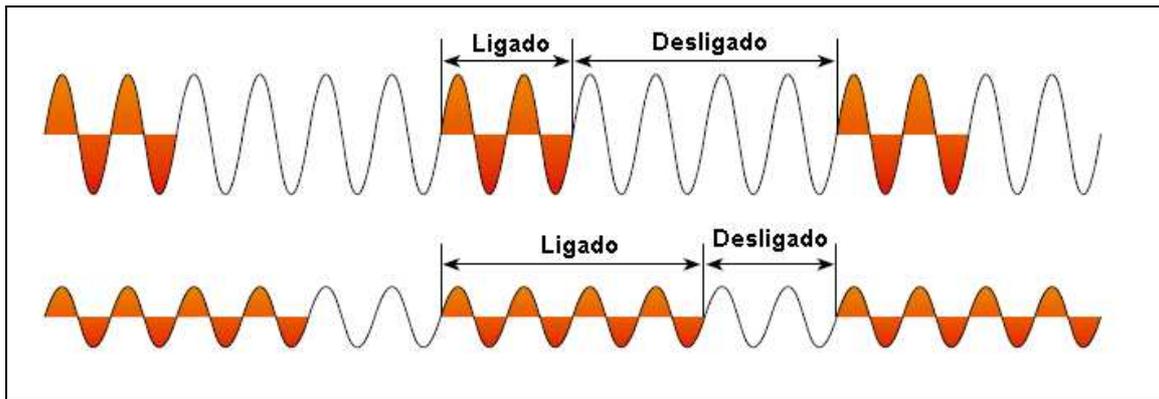


Figura 18. Módulo de potência tipo trem de pulsos

5.2. ELEMENTO DE CARBETO DE SILÍCIO

Os elementos da Kanthal de carbeto de silício têm uma resistividade muito mais alta que os elementos metálicos e podem funcionar com uma carga superficial maior, W/cm² carga superficial da zona quente. A figura 19 mostra as características da resistividade pela temperatura.

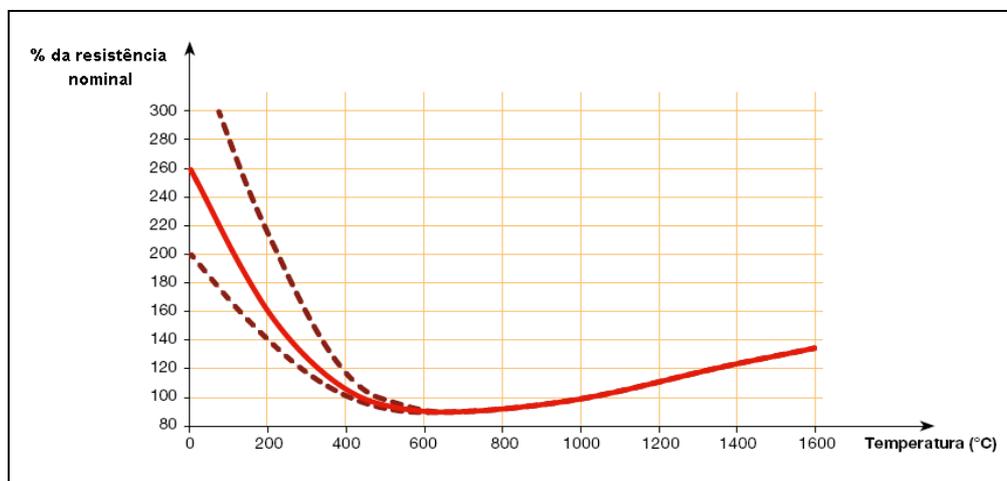


Figura 19. Gráfico da resistividade x temperatura

Os elementos da Kanthal GLOBAR SD (Globar LL no Brasil) têm uma resistividade alta e variável à temperatura ambiente, porém diminui conforme aumenta a temperatura e alcança um valor mínimo a temperatura por volta dos 700°C. Quando a temperatura dos elementos sobe acima dos 700°C, aumenta a resistividade conforme aumenta a temperatura.

Uma variação mínima na quantidade de impurezas do material tem um efeito desproporcional sobre o valor da resistência a frio, como se pode verificar na figura 19, e as medições da resistência a temperatura ambiente não nos dão nenhuma indicação do valor que tomará a resistência ao alcançar a temperatura de funcionamento. As medições da resistência sempre se deverão realizar a temperatura constante de 1.000°C ou superior, e o valor da resistência se obterá através da equação 1.

Todos os elementos de carbeto de silício (SiC) aumentam a resistência elétrica durante a vida útil, a velocidade que isto ocorre está relacionada com os seguintes fatores:

Temperatura do forno;

Carga superficial dos elementos em W/cm²;

Atmosfera em que os elementos trabalham;

Modo de funcionamento – Contínuo ou intermitente

Práticas de funcionamento e métodos de controle de alimentação que se utiliza

Como orientação geral, podemos dizer que os elementos de carbeto de silício da Kanthal Global SD (no Brasil modelo LL) podem aumentar a sua resistência aproximadamente em torno de 5 a 6% para cada 1000 horas de funcionamento contínuo em atmosfera ar limpo 1400 °C e aproximadamente 3% para cada 1000 horas de funcionamento a 1000°C. Qualquer pequena variação nas condições de funcionamento pode alterar o aumento da resistência de forma considerável.

5.2.1. Elemento carbeto de silício ligado direto na rede elétrica

Os elementos de carbeto de silício só podem ser conectados diretamente na rede de alimentação, quando a resistência ôhmica de instalação seja suficientemente elevada, para evitar o sobreaquecimento no elemento. A instalação da rede deve ser projetada de modo que a potência de saída inicial seja maior que a teórica do forno e obter uma reserva de potência para compensar o aumento da resistência do elemento.

A reserva de potência que se pode conseguir é mínima comparada com o módulo de potência tiristorizado e será necessário um grande número de elementos na instalação do forno para dissipar o excesso de potencia inicial. Uma maneira de ganhar uma

potência reserva é modificando as ligações dos elementos, após os elementos envelheceram.

Por causa de seus inconvenientes inerentes, a conexão direta na rede de alimentação é limitada normalmente às aplicações da temperatura relativamente baixa (abaixo de 1100°C (2010°F)) ou em fornos cíclico de uso pouco frequente até 1300°C (2370°F).

5.2.2. Alimentação com transformador

O transformador é usado nos casos em que o módulo tiristorizado terá que limitar uma porcentagem muito grande de corrente, podendo ser de dois modelos, o primeiro modelo o transformador irá abaixar a tensão do primário e o secundário será controlado com módulo de potência tiristorizado, conforme a figura 20. O segundo modelo seria utilizar somente o transformador com vários taps, conforme figura 21.

No modelo com vários taps, o primeiro tap será 25% menor que a tensão nominal, o segundo tap será a tensão nominal, o terceiro 10% maior que a tensão nominal, quarto 15% maior que o terceiro, quinto 15% maior que o quarto, esses taps são para compensar o envelhecimento das resistências.

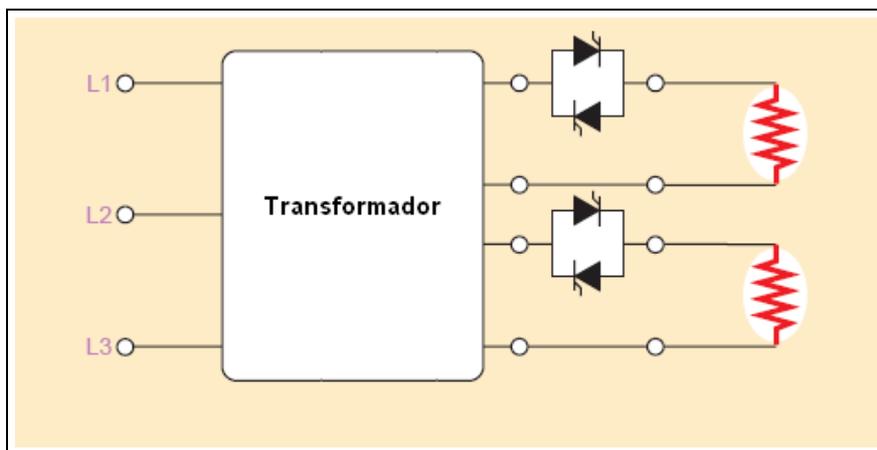


Figura 20. Transformador com controle tiristorizado

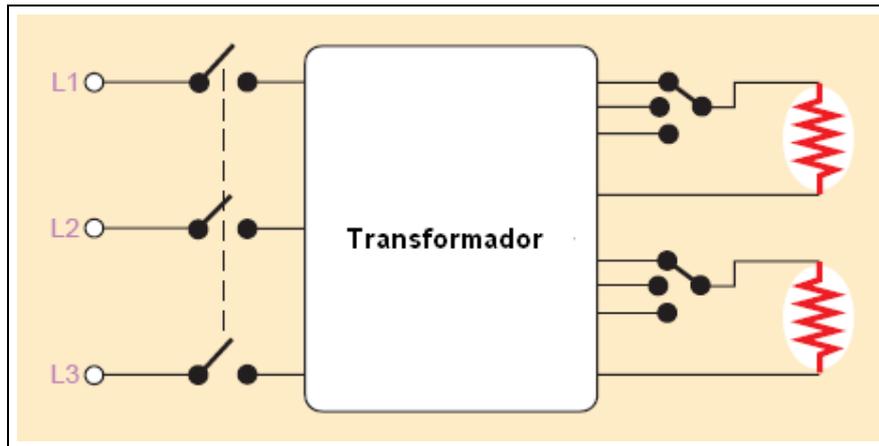


Figura 21. Transformador com vários taps e controle liga - desliga

5.2.3. Alimentação com módulo de potência tiristorizado

Os módulos de potência tiristorizado podem ser de dois modelos, trem de pulsos e ângulo de fase, esses modelos podem ser utilizados para alimentar as resistências carbeto de silício. Para as resistências de carbeto de silício o módulo de potência tiristorizado modelo ângulo de fase (Figura 22) é o melhor, pois, obtém um disparo inicial suave, limita a corrente máxima sobre a carga e compensa o envelhecimento da resistência. O problema são os ruídos e os harmônicos gerados na rede elétrica e interferência de rádio frequência.

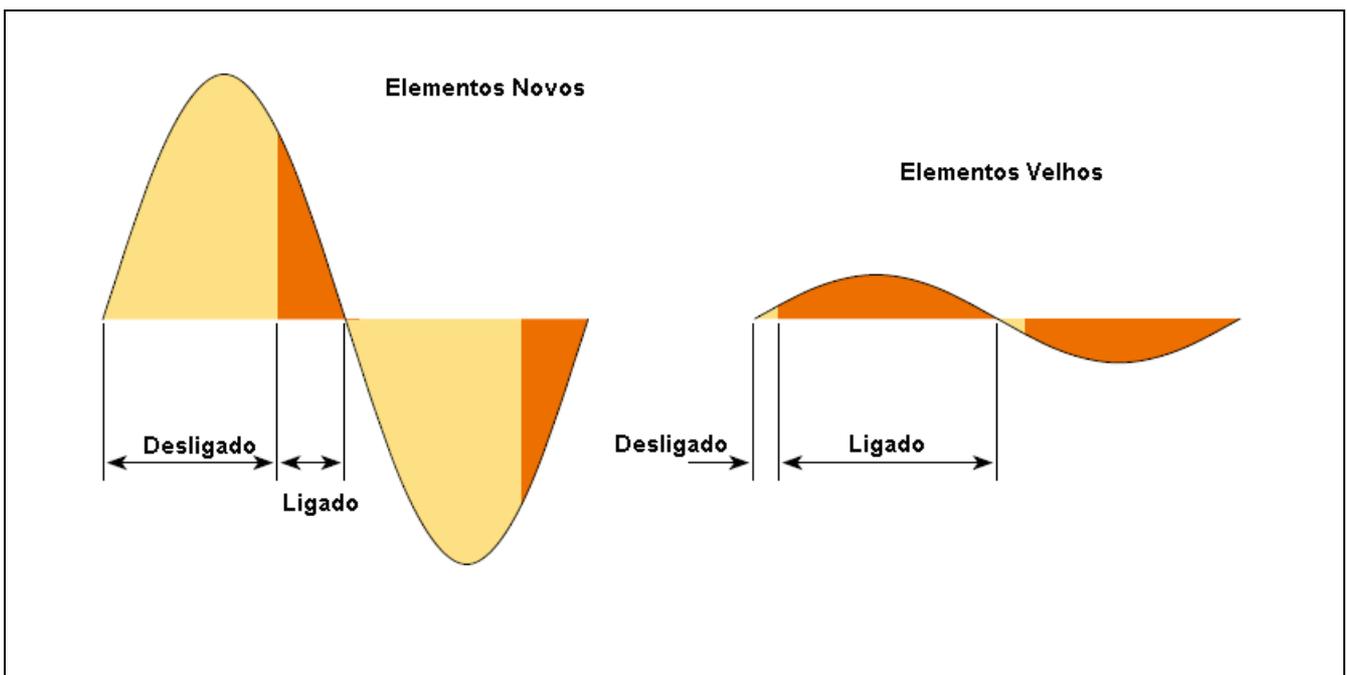


Figura 22. Módulo de potência – Ângulo de fase

O esquema de ligação com o módulo de potência tiristorizado verificar figura 23

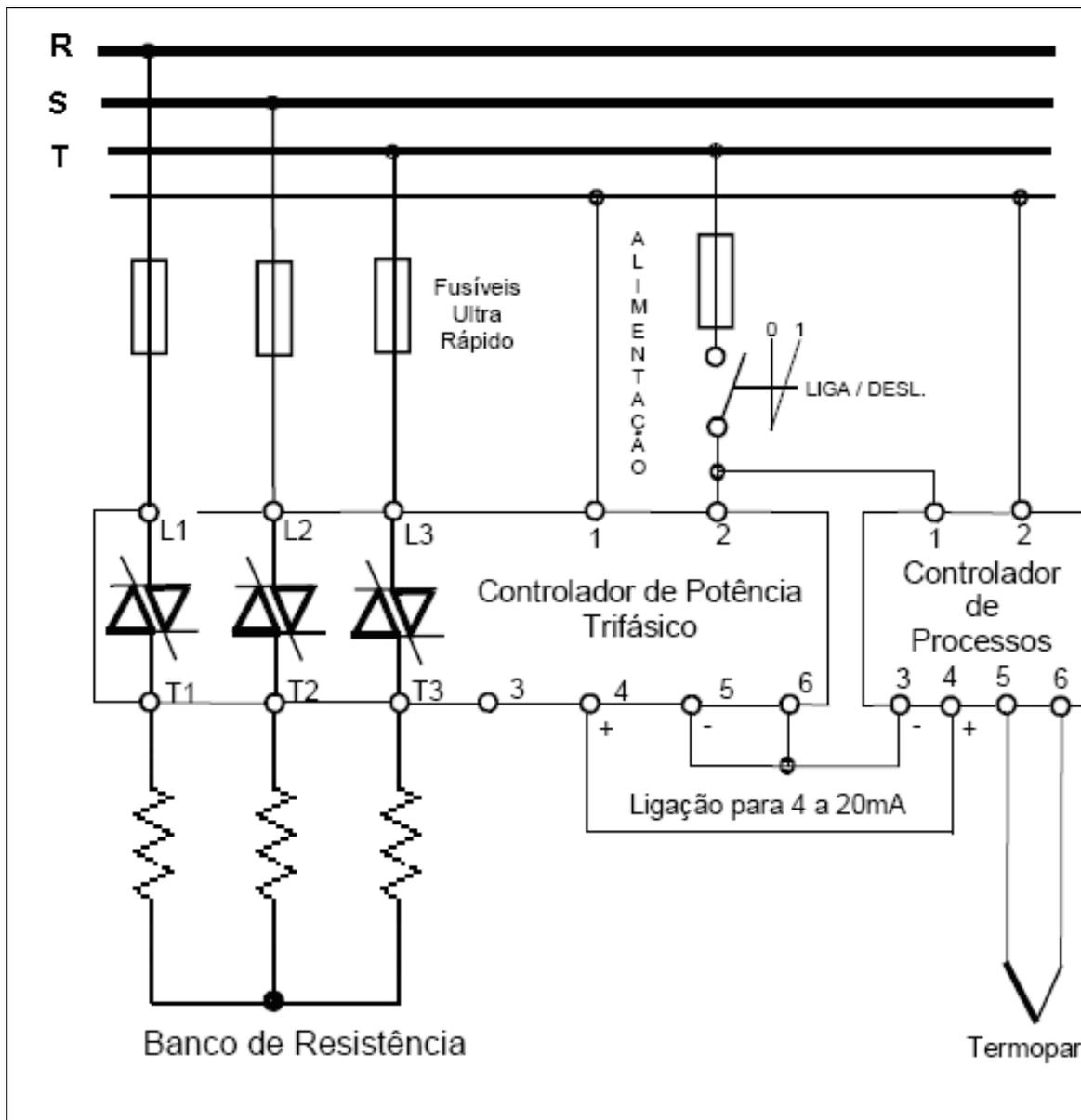


Figura 23. Esquema de ligação da resistência

5.3. SIMULAÇÃO ATRAVÉS DO SOFTWARE PSCAD

As simulações realizadas através do software PSCAD foram para verificar a qualidade de energia. Foram montados esquemas de ligações para as resistências de carbeto de silício e metálica. Essas resistências foram ligadas direto na rede de alimentação, em transformadores e em módulos de potência tiristorizado.

Nas simulações onde os elementos foram ligados direto na rede elétrica, como é um circuito puramente resistivo, não apresentou nenhum harmônico. Nas simulações

onde a alimentação das resistências foi através de um transformador, e esse transformador foi considerado um modelo real, não apresentou nenhum harmônico. Já no modelo com o módulo de potência tiristorizado, os disparos dos tiristores geravam harmônicos na rede elétrica, neste caso deve-se utilizar filtros para eliminar este problema.

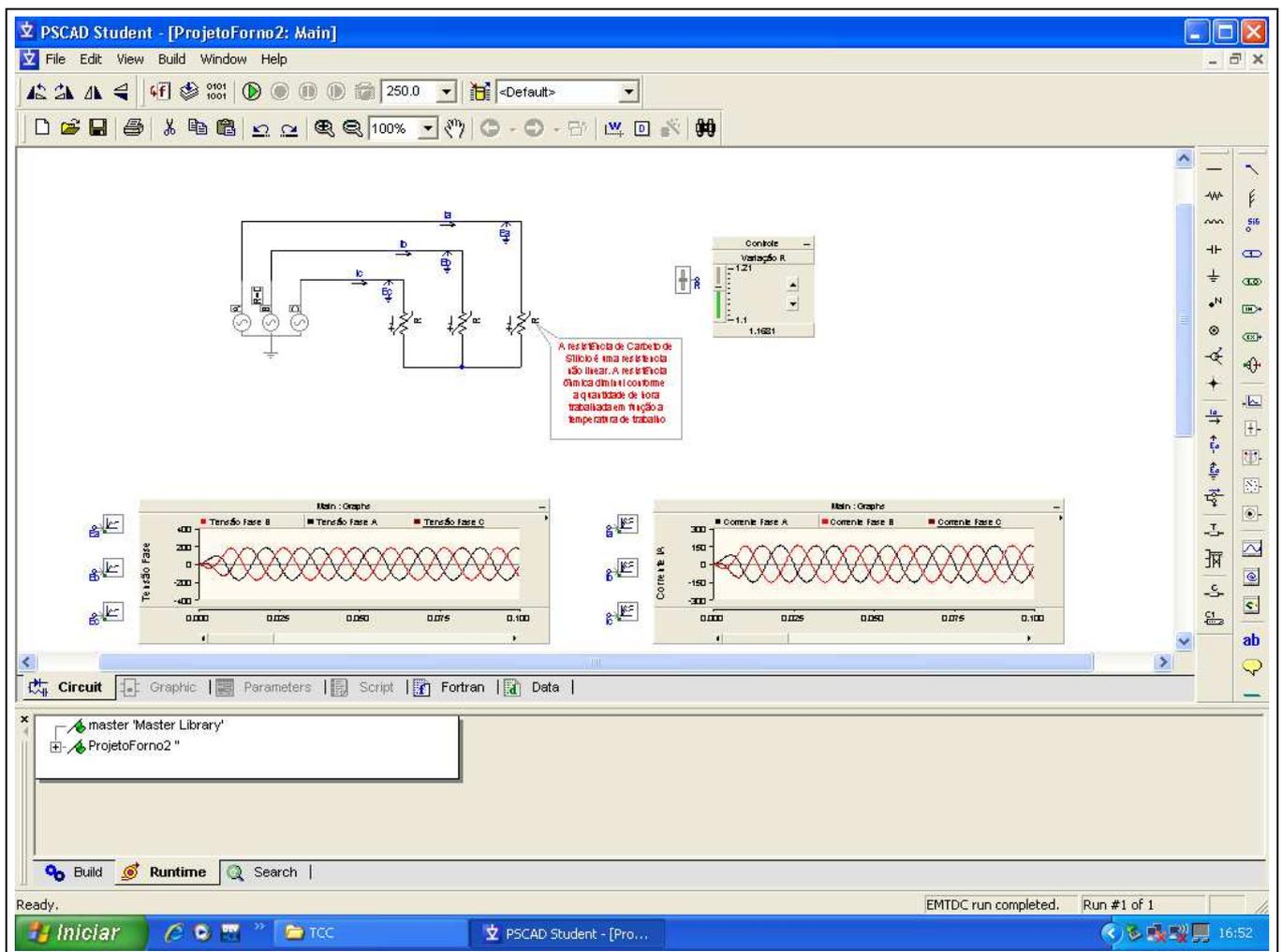


Figura 24. Simulação Software PSCAD

6. CONCLUSÃO

Na comparação do módulo de potência tiristorizado com os contadores, o módulo de potência tiristorizado apresenta vantagem na precisão, pois obtém menor oscilação da temperatura programada; aumenta a vida útil da resistência, pois mantém a temperatura próxima ao valor do set point evitando sobrecarga provocada pela oscilação da tensão de rede; não apresenta desgaste mecânico, pois os tiristores são componentes em estado sólido; consegue-se uma maior economia energia elétrica.

Nos fornos com a resistência de carvão de silício ligada no módulo de potência tiristorizado tipo ângulo de fase torna-se melhor, pois, obtém um disparo inicial suave, limita a corrente máxima sobre a carga e compensa o envelhecimento da resistência. O problema são os ruídos e os harmônicos gerados na rede elétrica e interferência de rádio frequência. Para eliminar esses ruídos devem-se utilizar filtros.

Nos fornos com a resistência metálica ligada no módulo de potência tiristorizado tipo trem de pulso torna-se melhor, pois não há cortes abruptos de tensão e corrente, elimina IRF, menor perturbação na rede e sua maior vantagem é o aproveitamento de energia. Comparado com o tipo ângulo de fase o sistema tipo trem de pulsos apresenta melhor qualidade de energia, e comparado com o sistema liga- desliga através de contadores pode obter uma economia de energia de até 20%.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cirilo Junior da **Folha Online**, no Rio – Folha dinheiro. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u386086.shtml>. Acesso em 26 de março de 2008.
- [2] Afonso; João Luiz, Martins; Julio S. **QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**. Revista: O Electricista, nº. 9, 3º trimestre de 2004, ano 3, pp. 66-71.
- [3] Kanthal Handbook – **RESISTANCE HEATING ALLOYS AND SYSTEMS FOR INDUSTRIAL FURNANCES** – (2003)
- [4] Burani, Geraldo Francisco et al. **Uso Racional e Econômico da Energia dentro de uma Indústria Metalúrgica: Oportunidade de troca de eletricidade para gás natural**.
- [5] Eletrobrás – CEPEL, Centro de pesquisa de Energia Elétrica. Disponível em: http://www.fiec.org.br/acoes/energia/informacoes/dicas_industrial.htm. Acesso em 07 de julho de 2009.
- [6] Therma Instrumentos de Medição Automação e Projetos Ltda. Disponível em: http://www.therma.com.br/artigos/sistemas_controlados_scr.pdf. Acesso em 07 julho de 2009.
- [7] Kanthal Kandbook - **RESISTANCE HEATING ALLOYS AND SYSTEMS FOR INDUSTRIAL FURNANCES** – (2007)
- [8] Kanthal Kandbook – **KANTHAL GLOBAL SD – TECHNICAL DATA** – (2008)
- [9] Software PSCAD – ELETROMAG. Disponível em: http://www.electromagnetics.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=5:sobre-o-pscad&catid=25:os-produtos&Itemid=54. Acesso em 06 de julho de 2009.