

Ricardo Campagnin

RELATÓRIO DE ESTÁGIO CURRICULAR DO CURSO DE  
TECNOLOGIA EM ELETROELETRÔNICA

CONSTRUÇÃO DE UMA FONTE DE SOLDAGEM INVERSORA  
COM DOIS MÓDULOS DE CORRENTE EM PARALELO

São José (SC)

2009

Ricardo Campagnin

RELATÓRIO DE ESTÁGIO CURRICULAR DO CURSO DE  
TECNOLOGIA EM ELETROELETRÔNICA

CONSTRUÇÃO DE UMA FONTE DE SOLDAGEM INVERSORA  
COM DOIS MÓDULOS DE CORRENTE EM PARALELO

Relatório de estágio do curso de  
Tecnologia eletroeletrônica da  
Universidade do Sul de Santa Catarina,  
realizado no LABSOLDA - UFSC.

Orientador: Emerson Barbosa da Silva

São José (SC)

2009

Ricardo Campagnin

RELATÓRIO DE ESTÁGIO CURRICULAR DO CURSO DE  
TECNOLOGIA EM ELETROELETRÔNICA

CONSTRUÇÃO DE UMA FONTE DE SOLDAGEM INVERSORA  
COM DOIS MÓDULOS DE CORRENTE EM PARALELO

Este relatório foi julgado como adequado à obtenção do título de Tecnólogo em Eletroeletrônica - Eletroeletrônica Universidade do Sul de Santa Catarina.

São José, 02 de outubro de 2009

-----  
Ms. Eng. Mec. Tiago Vieira da Cunha  
Supervisor de campo

-----  
Eng. Elet. Emerson Barbosa da Silva  
Supervisor de estágio

## Dedicatória

Aos meus tios Ivo e Mariazinha pelo incentivo que me foi dado durante todo tempo em que convivo com eles. Eles fazem muito mais por mim do que a maioria dos pais fazem aos seus filhos.

A minha irmã Lilian e meu cunhado Fernando por me ajudarem sempre que precisei.

## Agradecimentos

Agradeço:

O meu orientador do laboratório (LABSOLDA - UFSC) Tiago Vieira da Cunha (grande mestre), que não é só um orientador, mas sim um amigo, sempre esteve me ajudando e me orientando ao longo período em que trabalhamos juntos;

Ao colega de trabalho Dr. Eng. Elet. Raul Gohr jr, que sempre dedica parte do seu tempo para ensinar aos colegas o que aprendeu ao longo de sua carreira profissional;

O meu orientador de estágio o professor Emerson Barbosa da Silva, que dedicou uma parte do seu tempo para orientar-me neste relatório;

Ao colega de trabalho Ms. Eng. Mec. Renon Steinback Carvalho, por repassar seus conhecimentos em robótica e automação e controle.

Ao professor Dr. Jair Carlos Dutra pela contratação de meus serviços no (LABSOLDA - UFSC) e por ter apostado em minha capacidade profissional;

Aos professores do SENAI, por dedicarem parte do seu tempo para repassarem seus conhecimentos;

A coordenação do SENAI pela contribuição e pela bolsa de estudo;

Aos colegas de trabalho que de uma forma ou de outra contribuíram para que este trabalho pudesse ser concluído.

## SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	7
1 INTRODUÇÃO .....	9
2 PROPÓSITO DO PROJETO .....	10
3 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....	13
4 DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA DE POTÊNCIA DA FONTE DE SOLDAGEM .....	22
4.1 Desenvolvimento do Transformador .....	22
4.2 Desenvolvimento da Estrutura de Potência .....	24
5 FONTE DE ALIMENTAÇÃO .....	39
6 PROTEÇÕES DA FONTE DE SOLDAGEM .....	41
7 CIRCUITO PWM .....	42
8 DESENVOLVIMENTO DA FONTE .....	43
9 APERFEIÇOAMENTO DO PROJETO.....	47
10 CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS.....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Janela de acesso à parte interna da usina .....	10
Figura 2 - Espaço entre as colunas de tubos da caldeira .....	11
Figura 3 - Altura em que os equipamentos serão usados.....	11
Figura 4 - Respiro da caldeira (1), tubos afetados pela corrosão (2) e parte do tubo sem corrosão (3) .....	12
Figura 5 - Estrutura de funcionamento da fonte.....	14
Figura 6 - Placa de comunicação AQX.....	14
Figura 7 - Termopar tipo K.....	15
Figura 8 - Fluxograma de funcionamento do termopar.....	15
Figura 9 - Circuito para amplificar e filtrar o sinal d e tensão dos termopares.....	17
Figura 10 - Fluxograma do circuito do termopar .....	17
Figura 11 - Tela do notebook e do osciloscópio durante a medição da temperatura.....	18
Figura 12 - Configuração do sinal para medição da temperatura....	18
Figura 13 - Tela de ajuste do sinal de temperatura.....	19
Figura 14 - Tela de configuração da interface gráfica.....	19
Figura 15 - Configuração dos sinais de entrada a serem exibidos na interface gráfica .....	20
Figura 16 - Configuração dos limites da escala a ser exibida .....	20
Figura 17 - Configuração das coordenadas X e Y.....	21
Figura 18 - Fluxograma de calibração do sistema de aquisição de temperatura .....	21
Figura 19 - Núcleo do transformador (A) e carretel do transformador (B).....	22
Figura 20 - Efeito da corrente em alta frequência circulando por um condutor .....	23
Figura 21, transformadores usados nas fontes de soldagem .....	24
Figura 22 - Comando de gate dos IGBTs .....	25
Figura 23 - Dissipador usado nos experimentos.....	27
Figura 24 - Dissipador após sofrer o aquecimento. ....	27
Figura 25 - Estrutura de potência ser testada .....	27
Figura 26 - Fonte de corrente Digitec 450 .....	28
Figura 27 - Circuito a ser testado com 4 IGBTs.....	29
Figura 28 - Dedução do cálculo térmico do componente .....	30
Figura 29 - Comportamento térmico do componente a ser testado	30

Figura 30 - Ensaio com os IGBTs em outra forma de posicionamento.....	32
Figura 31 - Estrutura de potência com dois ventiladores .....	34
Figura 32 - Dissipador com os IGBTs em outra configuração.....	35
Figura 33 - Fonte de alimentação.....	39
Figura 34 - Fonte de alimentação simétrica.....	40
Figura 35 - Correção do ripple por capacitor.....	40
Figura 36 - Circuito PWM.....	42
Figura 37 - Forma de onda do circuito PWM.....	42
Figura 38 - Módulo de corrente concluído .....	43
Figura 39 - Módulos de corrente em paralelo.....	44
Figura 40 - Princípio de funcionamento do sensor hall.....	45
Figura 41 - Fonte de soldagem com os módulos em paralelo controlados por um sistema microcontrolado.....	47
Figura 42 - Cabeçote de soldagem MIG STA20D .....	48
Figura 43 - Cabeçote alimentador de arame da fonte de soldagem Larry .....	49
Figura 44, fonte de soldagem completa .....	50
Figura 45 - Esquema elétrico de conexão dos módulos.....	52
Figura 46, oscilação da corrente de saída .....	53
Figura 47 - Indutor conectado na saída da fonte de soldagem.....	53
Figura 48 - Fonte completa após finalizado o projeto .....	54
Figura 49 - Comprovação do trabalho realizado em campo.....	54
Figura 50 - Comprovação da atuação direta no projeto .....	55

## 1 INTRODUÇÃO

Todas as instituições de ensino superior exigem o estágio curricular obrigatório. O SENAI-SC, unidade de São José não foge à regra. O estágio de conclusão de curso é de extrema importância para qualificar o profissional a fim de que este execute suas atividades com maior responsabilidade e competência, aplicando assim todos os conceitos adquiridos em sala de aula. Devido às necessidades de desenvolver novas tecnologias para suprir o desenvolvimento tecnológico do país, o LABSOLDA - UFSC está sempre em busca de desenvolver novas tecnologias e aperfeiçoar os métodos tecnológicos existentes na área da soldagem. O presente relatório descreve as atividades realizadas durante o período de estágio curricular obrigatório. As atividades foram concentradas no desenvolvimento de uma fonte de soldagem leve, pequena, portátil, microcontrolada e usada para os mais diversos tipos de soldagem, esta foi desenvolvida especialmente para ser usada em locais de difícil acesso onde equipamentos convencionais de soldagem não apresentam tais benefícios. O trabalho também está concentrado no desenvolvimento de um sistema de medição de temperatura usado para fazer as medições da estrutura de potência da fonte de soldagem. Associando-se dois módulos de correntes em paralelo, ambas as correntes são somadas e o controle é realizado por um sistema microcontrolado. O presente relatório também apresenta as dificuldades técnicas encontradas durante o desenvolvimento desta fonte, esta sendo relatado todas as etapas necessárias para tornar o protótipo em um equipamento de aplicação industrial.

## 2 PROPÓSITO DO PROJETO

A Tractebel atua na geração de energia elétrica, uma de suas unidades geradoras é a usina termelétrica Jorge Lacerda, esta está situada na Cidade de Capivari de Baixo próximo a Tubarão.

As usinas termelétricas necessitam de manutenção preventiva aproximadamente a cada quatro e a manutenção corretiva quando se faz necessário. Quando uma usina é parada para a manutenção, tem se como objetivo, colocá-la novamente em operação o mais rápido possível, a fim de evitar este procedimento e aumentar o tempo em que uma usina é fechada para manutenção, a Tractebel recorreu ao LABSOLDA - UFSC para desenvolver uma fonte de soldagem e um manipulador robótico que satisfizessem as suas necessidades.

Entre os requisitos para o desenvolvimento do projeto, pode-se citar os elementos necessários a fonte: esta deve ser leve, pequena, portátil, fácil de transportar e que não tivesse um consumo de energia muito elevado. O manipulador robótico também deve ser de fácil transporte e operação.

A fonte de soldagem de ser pequena por conta de que o local de acesso à parte interna da usina é muito reduzido, se o equipamento for grande não é possível levá-lo para dentro da usina, na figura 1 pode-se observar o tamanho da janela de entrada da usina.



**Figura 1 - Janela de acesso à parte interna da usina**

A parte interna da usina é composta por tubos verticais, que vão do teto até a caldeira, na caldeira é feita a queima do carvão, são nestes tubos verticais, que consegue-se a maior quantidade de calor usada para transformar a água que está dentro dos tubos em vapor. Este vapor vai mover a hélice da

turbina geradora de energia elétrica. Cada tubo mede aproximadamente 25 metros de comprimento por 50 milímetros de diâmetro. Na figura 2 pode-se observar a distância entre estes tubos, o que mostra como o local é de difícil mobilidade.



**Figura 2 - Espaço entre as colunas de tubos da caldeira**

Outro fator agravante nas caldeiras é que a manutenção precisa ser feita em pontos que podem estar na base da caldeira ou no teto, lembrar que estamos nos referindo a uma altura de 25 metros ou mais. Se o equipamento utilizado for pesado, fica impossível sua utilização, devido ao confinamento existente no local. A figura 3 mostra a altura a qual o equipamento será submetido, quando este for usado nos reparos pontuais da caldeira. Esta foto foi retratada a cerca de 20 metros da base da caldeira.



**Figura 3 - Altura em que os equipamentos serão usados**

A usina precisa ser reparada quando os tubos apresentam desgaste e corrosão em sua superfície. O desgaste é provocado pelo respiro que joga vapor de água na superfície dos tubos para retirar a crosta de cinza acumulada. A corrosão é causada pela acidez da cinza que em contato com a água provoca a oxidação. Mesmo com estes problemas a cinza precisa ser removida, senão a usina perde muito desempenho por a cinza servir como um isolante térmico, se esta cinza não for removida é necessário uma quantidade muito maior de carvão para gerar a mesma quantidade de energia.

Na figura 4 pode-se observar melhor este tipo de corrosão causada pelo vapor dos respiros. A corrosão faz com que o tubo fure após um tempo de uso e este tenha que ser substituído. Um dos objetivos do projeto é também desenvolver um procedimento de soldagem para revestir os tubos com um material em aço inox, o que vai evitar a corrosão dos tubos e aumentar o tempo entre as manutenções.



**Figura 4 - Respiro da caldeira (1), tubos afetados pela corrosão (2) e parte do tubo sem corrosão (3)**

### 3 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.

O desafio para desenvolver o projeto foi aceito pelo LABSOLDA da UFSC. Os primeiros passos para sua realização foram tomados: a definição dos elementos da equipe, suas responsabilidades e o método de trabalho para a conclusão do mesmo.

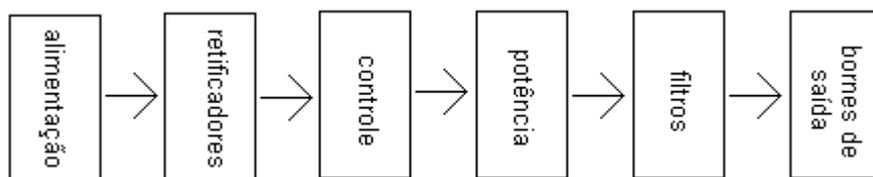
Para realizar um projeto é necessário formar uma equipe disposta a vencer desafios. Esta equipe deve ser dividida e estruturada com pessoas capacitadas e qualificadas para desenvolver as atividades de acordo com o propósito. É importante estruturar a equipe e fazer com que cada pessoa atue na sua área de conhecimento, contribuindo assim da melhor forma possível.

Para o projeto é necessário que a equipe tenha pessoas com conhecimento nos processos de soldagem, esta equipe será formada a fim de que esta desenvolva o melhor processo e método de soldagem para fazer o revestimento dos tubos com o objetivo de aumentar o tempo entre as manutenções e garantir a qualidade do processo. Membros com qualificação na área de automação para desenvolver o manipulador robótico, o qual será usado para fazer o revestimento nos tubos, a grande vantagem de usar um manipulador é a repetitividade, a qualidade e o rendimento do revestimento, uma vez em que o soldador não consegue exercer as três funções ao mesmo tempo por um longo período.

Também precisa-se de pessoas com conhecimento e experiência em eletrônica na parte de hardware e software para o desenvolvimento da fonte de soldagem. Para desenvolver a parte eletrônica do projeto é necessário de um engenheiro eletricista com sólidos conhecimentos em eletrônica de potência, e por um técnico em eletrônica para trabalhar no suporte à pesquisa, sendo que esta função de técnico foi desempenhada por mim e um bom programador para desenvolver o software dedicado a cada processo de soldagem.

Minha participação foi no desenvolvimento da fonte de soldagem com a orientação do Dr. Ms. Eng. Eletricista Raul Gorh Jr. e do Físico e Ms. em Engenharia Mecânica Tiago Vieira da Cunha, sempre que surgiam as dúvidas eram estas pessoas que as sanavam.

O primeiro passo foi estruturar a fonte em forma de fluxograma, para que se pudesse concluir o projeto por partes. Esta ficou de acordo com a figura 5 em forma de fluxograma.



**Figura 5 - Estrutura de funcionamento da fonte**

Devido à dificuldade em fazer a aquisição de temperatura, houve a necessidade de desenvolver um sistema de aquisição de temperatura eficiente com praticidade e leitura em tempo real e por um período de aproximadamente 30 minutos, até que a temperatura a ser medida entre em regime, ou seja, estabilize.

Temos em mãos uma placa que faz a comunicação do sistema de medição de temperatura que faz a comunicação com o notebook pela porta USB. A placa de comunicação (AQX) é um sistema desenvolvido especialmente para ser usada como interface de comunicação entre o computador e um dispositivo eletrônico. Esta placa possui vários canais de entrada analógica, o que facilita a aquisição da leitura de vários canais ao mesmo tempo.



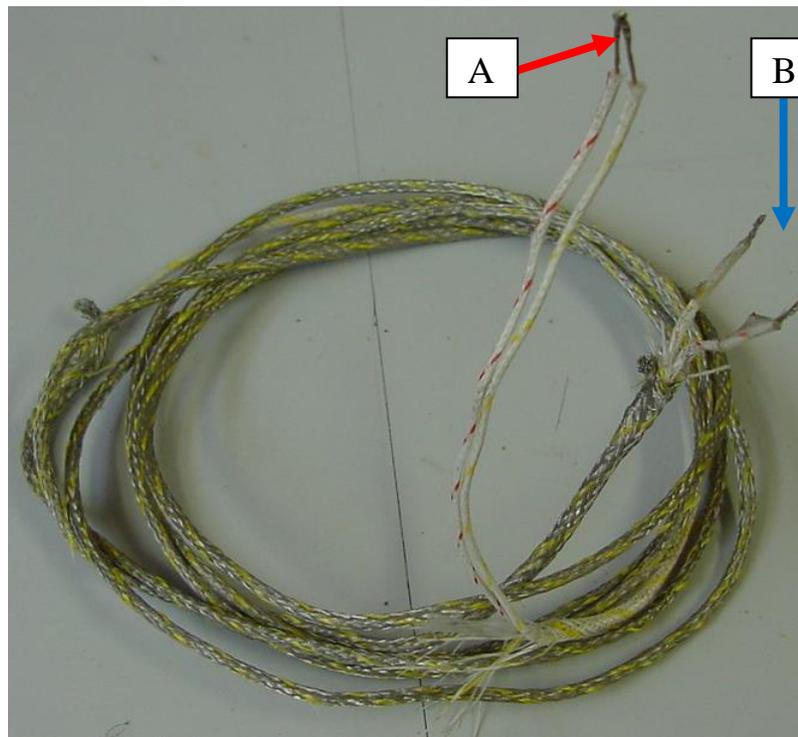
**Figura 6 - Placa de comunicação AQX**

Os termopares ou Par Termoelétrico como também são conhecidos e definidos como sensores de medição de temperatura constituídos de dois condutores metálicos e distintos, puros ou homogêneos.

Quando suas extremidades são submetidas a temperaturas diferentes a composição química dos metais gera uma força eletro-motriz (F.E.M.) da ordem de mV. Este princípio é mundialmente conhecido como efeito Seebeck.

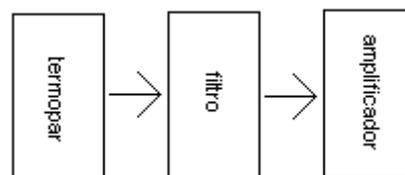
O dispositivo usado para medir a temperatura foi o termopar tipo K, com este termopar é possível fazer medidas desde temperaturas baixas até temperaturas elevadas, cerca de 1200 °C. Um dos grandes problemas do termopar é que este fornece um valor de tensão muito baixo. Para uma medida

mais precisa deve ser elevado o valor da tensão fornecida pelo termopar ele gera uma tensão entre suas extremidades na ordem de 4 mV a cada 100 °C.



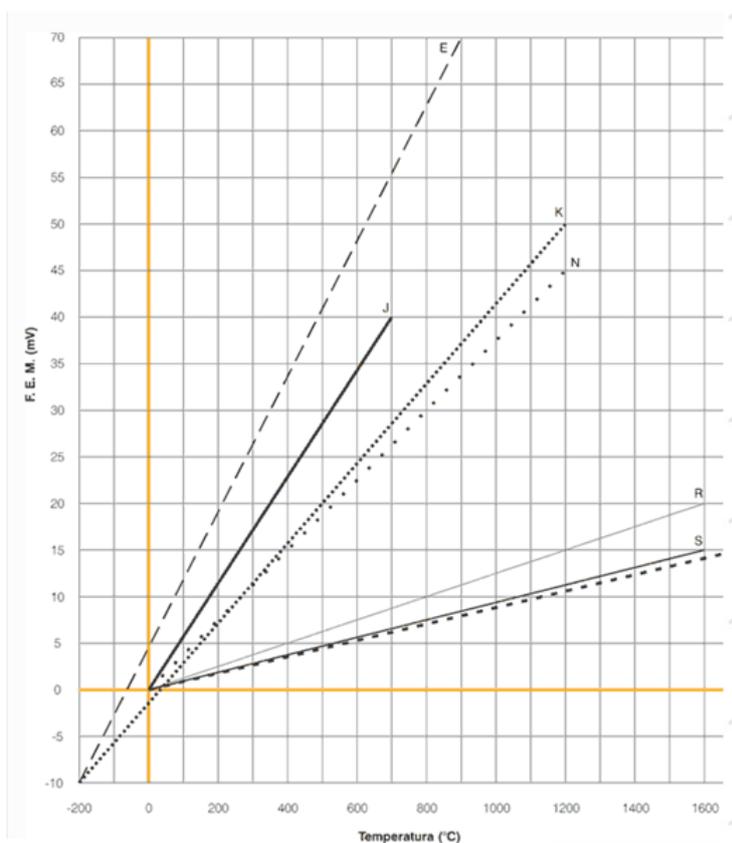
**Figura 7 - Termopar tipo K**

Em uma de suas extremidades o termopar deve ser unidos e soldado, observe o detalhe (A) na figura 7, convencionou-se o nome de junção de medição ou junção quente, e a outra extremidade, detalhe (B) na figura 7 com a extremidade aberta onde se faz as devidas interligações de junção de referência com o circuito eletrônico. O primeiro protótipo do circuito ficou de acordo com a figura 8 em forma de fluxograma.



**Figura 8 - Fluxograma de funcionamento do termopar**

No gráfico 1 pode-se observar a curva de tensão dos termopares. Sendo que o termopar usado para fazer as medições foi o tipo K. Este tem um coeficiente de temperatura negativo. Quando for projetado um amplificador para dar um ganho no sinal, deve-se levar este coeficiente em consideração, o coeficiente equivale a -20 °C.



**Gráfico 1 - Curva dos termopares**

A tensão em milivolts do termopar tipo K pode ser observada na tabela 1, sendo que o termopar tipo K está representado no ítem 0 da tabela 1 e no lado esquerdo da tabela está indicado a temperatura equivalente em graus Celcius.

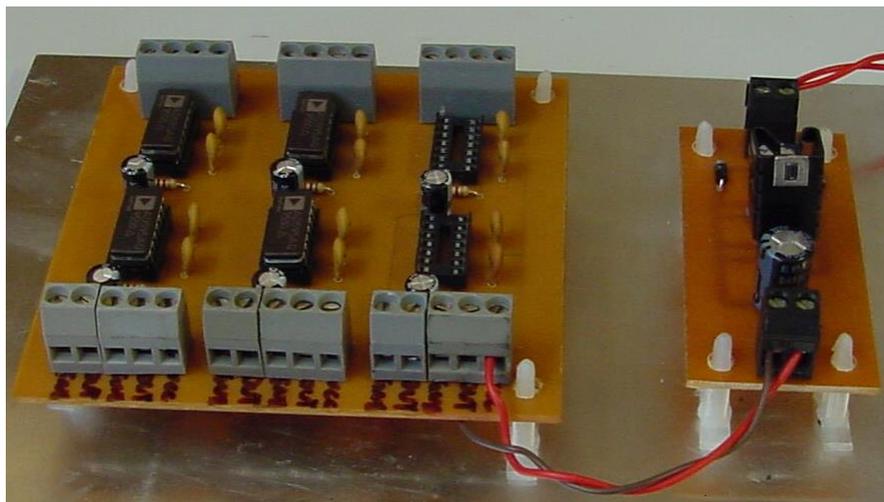
**Tabela 1 - Dados dos termopares em milivolts**

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739

No software usado para fazer a leitura destes dados existem filtros para eliminar ruídos, mas estes não são suficientes para a obtenção dos sinais com

excelente qualidade. A fim de melhorar os gráficos das medições e obter resultados mais precisos, desenvolveu-se um circuito especialmente para fazer a amplificação do valor de tensão do termopar com o intuito de melhorar a qualidade do processo de medição da temperatura. Com o circuito desenvolvido pode-se medir temperatura de até 1200 °C.

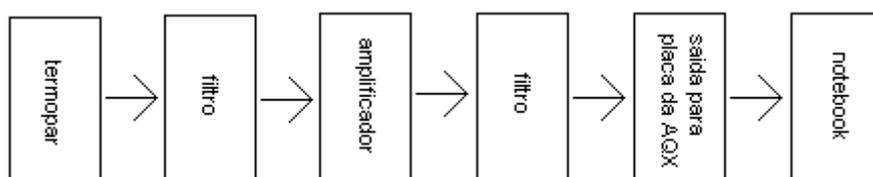
Na figura 9, pode-se observar o primeiro protótipo da placa desenvolvida para fazer o tratamento e a amplificação dos sinais medidos com os termopares.



**Figura 9 - Circuito para amplificar e filtrar o sinal de tensão dos termopares**

O amplificador tem a função de aumentar o valor do sinal de entrada como o próprio nome diz. O objetivo foi elevar o ganho destes sinais em 250 vezes, ou seja, 24 dB em escala logarítmica. Um dos problemas neste tipo de amplificação é que os ruídos também são amplificados, uma das soluções foi aplicar um filtro passa-baixa na entrada do sinal, deixando passar assim apenas o valor da tensão enviada pelo termopar e não dos ruídos decorrentes do meio ao qual este está submetido.

Na figura 10, observa-se a sequência dos diagramas funcionais em que o projeto ficou configurado, com todos os problemas de ruídos eliminados ou grandemente amenizados.



**Figura 10 - Fluxograma do circuito do termopar**

Na figura 11, pode-se observar a interface gráfica do software de aquisição de temperatura, diretamente na tela do notebook, e um osciloscópio, usados para fazer a leitura dos dados.

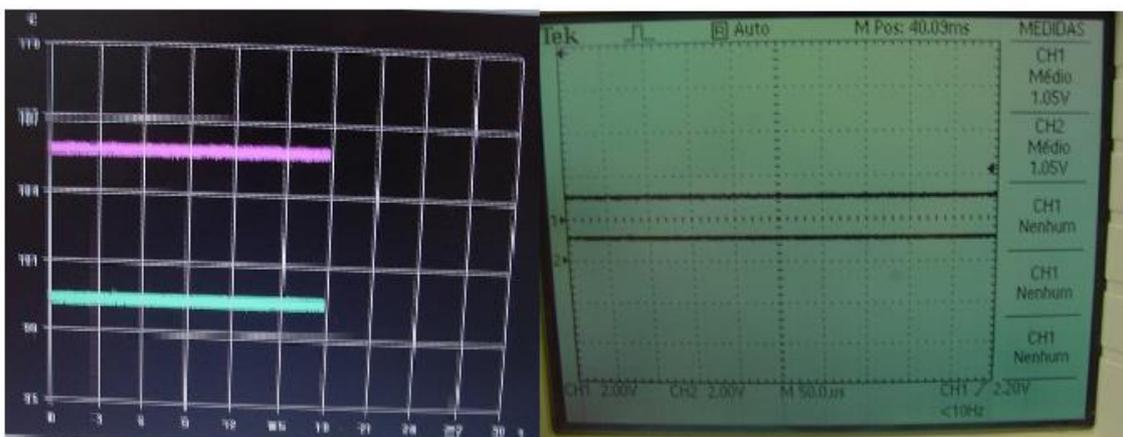
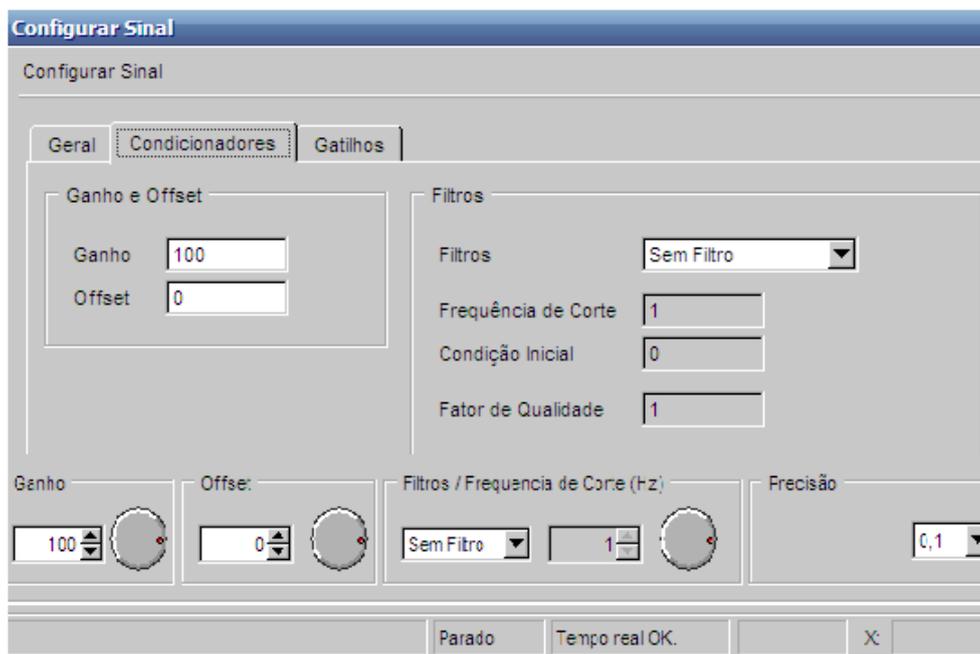


Figura 11 - Tela do notebook e do osciloscópio durante a medição da temperatura

Para fazer a medição de temperatura é necessário configurar o sistema de aquisição de temperatura. Deve-se navegar na janela iniciar do Windows, programas, AQX, aquisição, criar um novo trabalho e fazer as configurações de acordo com a figura 12.

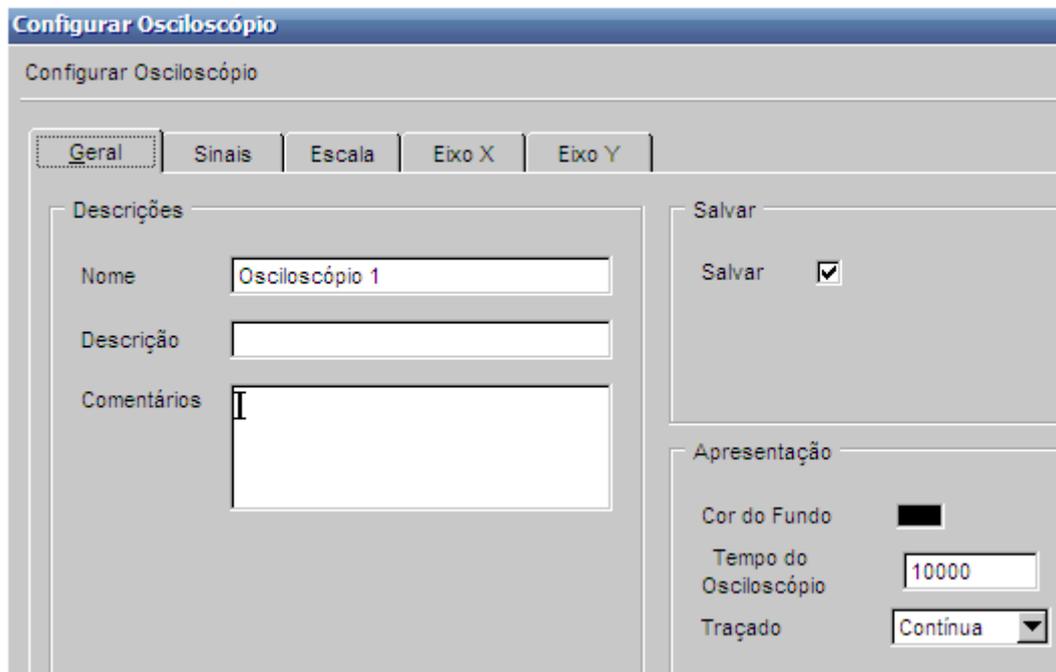
Figura 12 - Configuração do sinal para medição da temperatura

O sinal também precisa de algumas configurações mais apuradas para que seja de mais fácil visualização na interface gráfica. Na figura 13 mais algumas configurações importantes para o sistema de aquisição de temperatura.



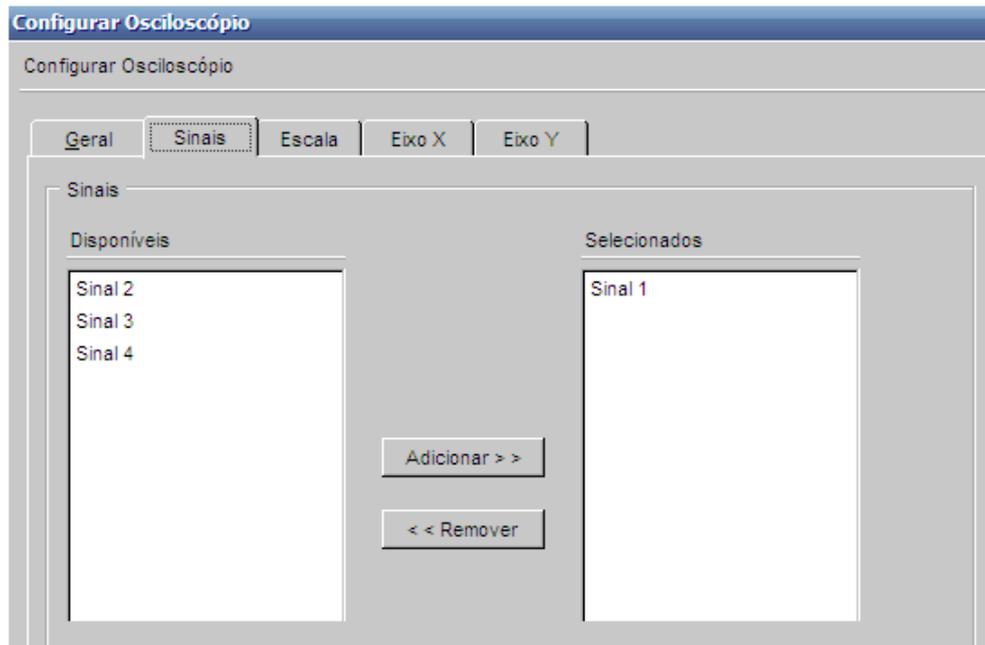
**Figura 13 - Tela de ajuste do sinal de temperatura**

Após realizar as configurações do sinal é necessário configurar a interface gráfica. Na figura 14 os passos de como proceder com a configuração da tela desta.



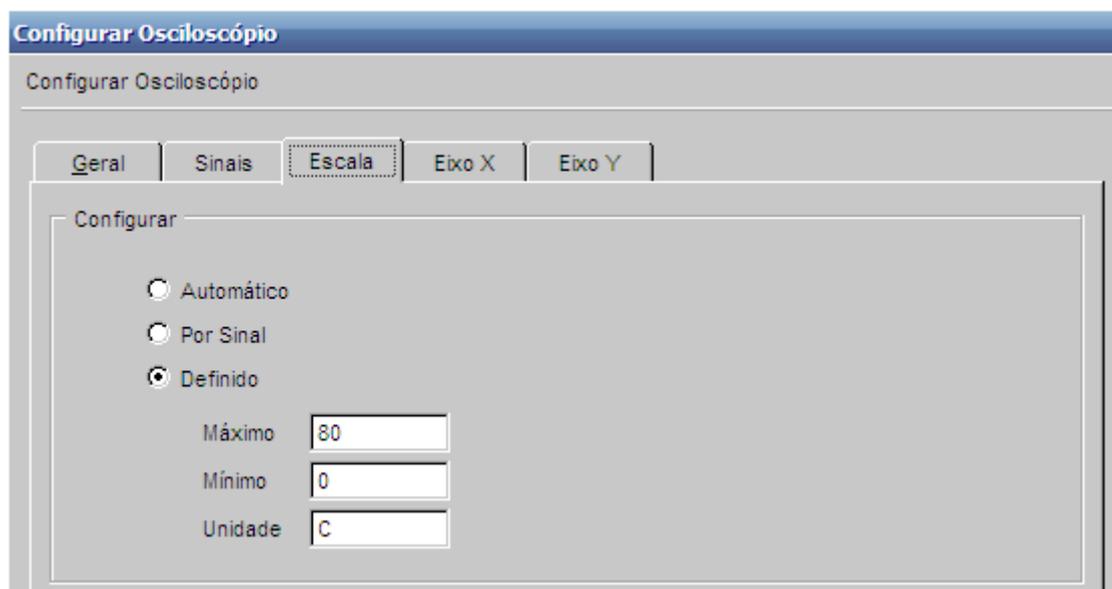
**Figura 14 - Tela de configuração da interface gráfica**

O próximo passo é configurar os sinais de entrada que estão disponíveis, a figura 15 mostra como esta realizar esta etapa.



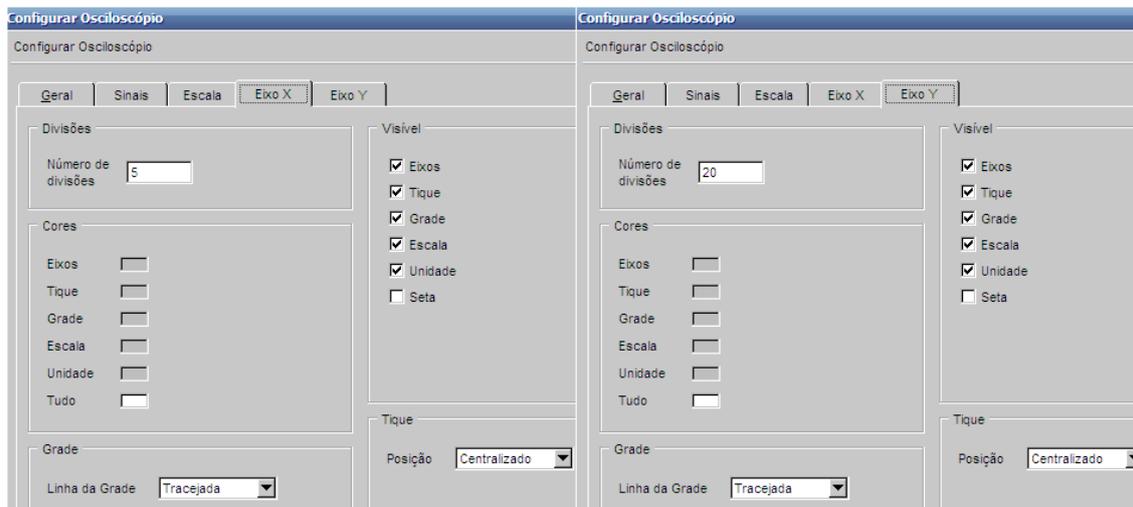
**Figura 15 - Configuração dos sinais de entrada a serem exibidos na interface gráfica**

O próximo passo a ser seguido é configurar os valores limites da interface, na figura 16 este processo pode ser observado.



**Figura 16 - Configuração dos limites da escala a ser exibida**

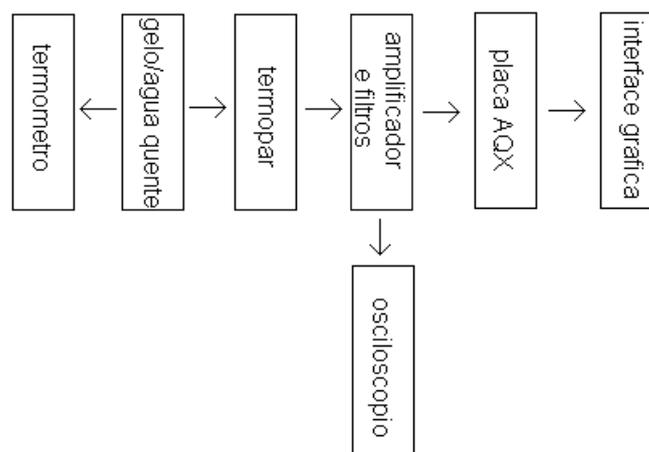
Logo em seguida é indispensável a configuração dos eixos das coordenadas cartesianas X e Y (interface gráfica ser exibida no notebook), na figura 17 está disposto este recurso.



**Figura 17 - Configuração das coordenadas X e Y**

Como pode ser observado na figura 11, o valor medido no osciloscópio e no notebook são um pouco diferentes, para fazer com que eles sejam apresentados a mesma medição é necessário fazer uma calibração do software. O procedimento deve ser feito em várias etapas e com vários termopares e todos devem apresentar o mesmo valor no fim da calibração.

Para fazer a calibração são usados gelo (a temperatura está a 0°C) e água fervendo que é de 100°C. Entre estes valores é necessário fazer mais uns cinco níveis de calibração a fim de certificar-se que os valores apresentados sejam os corretos. Após este procedimento ter sido realizado o sistema está pronto para ser usado. Na figura 18 está descrita em forma de fluxograma os passos a serem usados para a calibração do sistema de aquisição de temperatura.



**Figura 18 - Fluxograma de calibração do sistema de aquisição de temperatura**

## 4 DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA DE POTÊNCIA DA FONTE DE SOLDAGEM

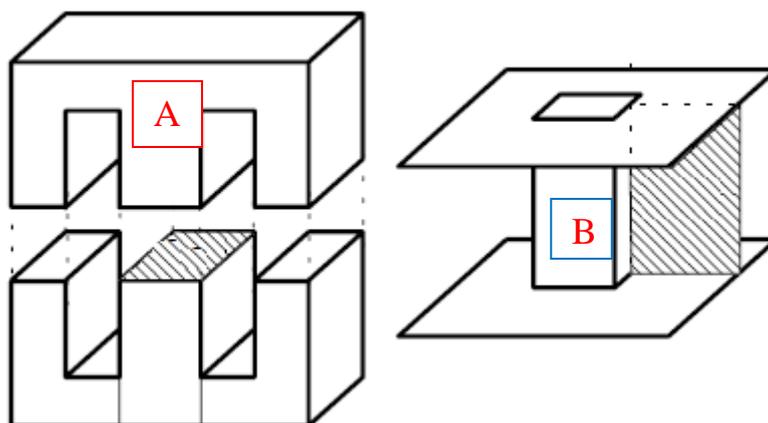
### 4.1 Desenvolvimento do Transformador

Toda fonte de soldagem necessita de um transformador abaixador de tensão, mas quando usa-se um transformador convencional para uma fonte com grande capacidade de corrente, este fica muito grande. Para fazer uma fonte de soldagem compacta necessita-se de um transformador pequeno.

Existe uma técnica que pode ser aplicada para a redução do tamanho do transformador. Uma maneira de reduzir o tamanho deste transformador é elevar esta frequência, mas para isto, é necessário transformar a tensão da alimentação da fonte em corrente contínua e depois transformar em alternada novamente. Quando esta técnica é usada, deve-se tomar alguns cuidados com relação ao projeto do transformador.

Entre os problemas que podem acontecer aplicando esta técnica, citam-se os seguintes:

- Quando a frequência for maior do que 1KHz, ou seja, mais de mil vezes por segundo em que o evento se repete, o núcleo do transformador deve ser substituído por um de um material que trabalhe com frequência elevadas com as mínimas perdas, para esta fonte a frequência de acionamento é de 20 kHz, a figura 19 mostra como é o modelo de um núcleo do transformador usado para o projeto.



**Figura 19 - Núcleo do transformador (A) e carretel do transformador (B)**

- As duas partes do núcleo do transformador (figura 19 A) devem ficar afastadas cerca de 1 mm um do outro pelo fato de que se estes ficarem muito unidos pode ocorrer uma perda da circulação do fluxo magnético.

A figura 19 B mostra a parte onde o fio vai ser enrolado para que seja constituído o transformador.

O fluxo magnético dos núcleos de transformadores mais usados pode ser observado no gráfico 2, sendo que para o projeto o tipo de núcleo usado é o de ferro-níquel (ferrite).

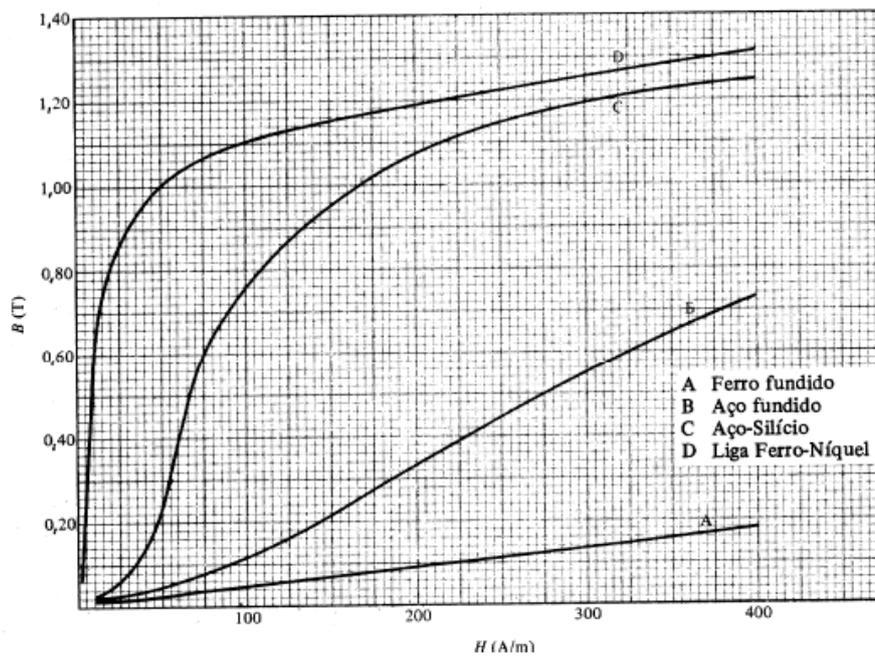


Gráfico 2 - Curva característica dos tipos de núcleo de transformador

- Outro detalhe é que quanto maior for a frequência de acionamento corrente tende a circular pela superfície do condutor do qual o enrolamento do transformador é feito. Este efeito é conhecido como efeito skin (efeito pelicular), para resolver isto usou-se uma lamina de cobre como condutor ao invés de um condutor circular. Na figura 20 pode-se observar este efeito.

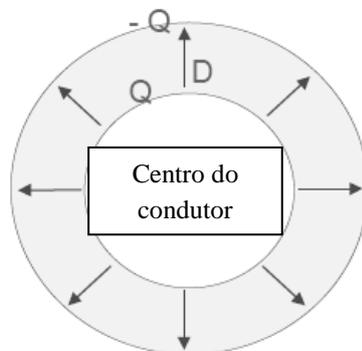


Figura 20 - Efeito da corrente em alta frequência circulando por um condutor

Para se ter uma idéia do tamanho de um transformador convencional e de um transformador especial com a mesma capacidade de condução de corrente observa-se a figura 21. O transformador da fonte convencional pesa 48Kg e tem capacidade de condução de corrente de 200 A e o da fonte inversora pesa 1,2 Kg e tem a mesma capacidade de condução de corrente.

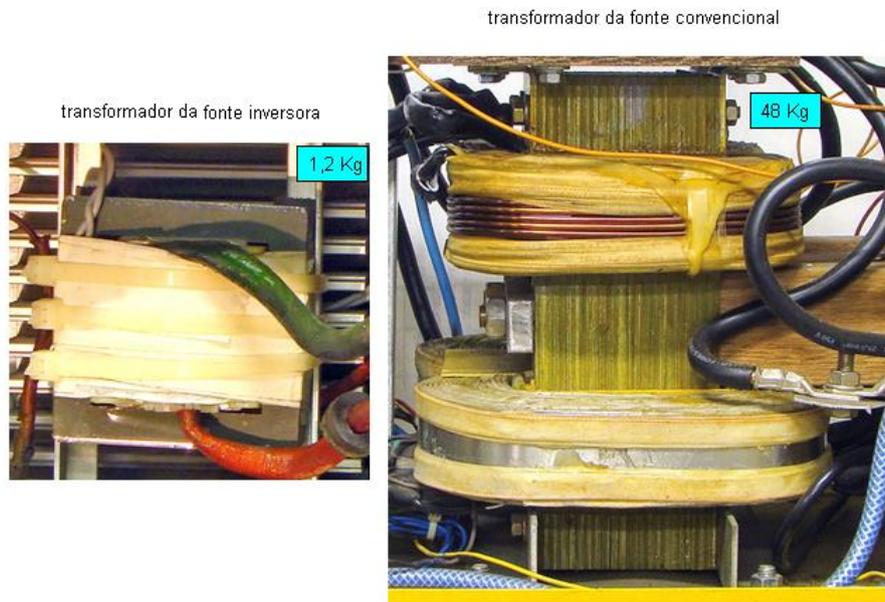


Figura 21, transformadores usados nas fontes de soldagem

## 4.2 Desenvolvimento da Estrutura de Potência

A estrutura de potência da fonte é composta por várias partes, uma delas é a do sistema de acionamento da corrente de saída. Para fazer este acionamento usou-se o componente eletrônico IGBT - Transistor Bipolar com Gatilho Isolado. O IGBT é um componente com características de um transistor bipolar no seu modo de condução, mas com uma grande vantagem de ser acionado por um valor de tensão no gatilho e não por corrente como um transistor bipolar comum, ele também é usado para circuitos com tensões mais elevadas.

Estes componentes são usados para circuitos com grande circulação de energia e também para circuitos acionados por frequência de centenas de Kilo-Hertz, com o avanço da tecnologia estes componentes podem ser encontrados em diversos tipos de encapsulamentos e capacidade de condução de corrente.

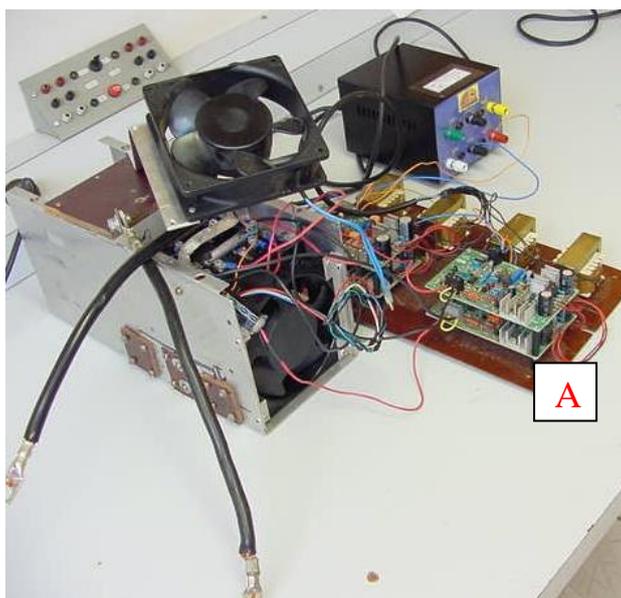
Para este tipo de componente deve-se tomar alguns cuidados quanto ao seu uso. Um dos problemas dele é a capacitância que este possui em seu gatilho que em alguns casos pode se tornar um problema por fazer o IGBT

continuar em condução por um pequeno período após ter sido desativado. Sempre deve ser colocado um resistor de valor mais elevado entre seu Gate e a referência (GND) a fim de evitar os efeitos causados por alguma corrente parasita do circuito, este resistor também serve para proteger o circuito para que não haja disparo acidental por algum ruído ocasionado pelo circuito. Este componente também requer um tipo de acionamento com fonte simétrica, ou seja, um acionamento com um valor de tensão positivo e um valor de tensão negativo é usado para desligá-lo.

Também deve se feito um circuito para proteger os IGBTs dos danos que fonte pode provocar como por exemplo pela indutância de saída. Quando se aciona uma chave com corrente circulando, um arco voltaico é gerado entre os terminais do ponto que esta sendo acionado. A proteção dos IGBTs é feita com um capacitor de 47nF entre o Coletor e o Emissor do componente, ainda deve-se colocar um capacitor de 220uF 200V entre o Coletor e o Emissor do IGBTs das extremidades quando se faz o acionamento destes em serie .

Todos os IGBTs devem ser ligados em série para fazer o teste do dissipador e da temperatura máxima permitida e calculada para o circuito. Os terminais da fonte de corrente devem ficar da seguinte forma: o borne positivo (+) deve ficar conectado no Coletor do IGBT da extremidade e o borne negativo (-) no Emissor da outra extremidade e uma resistência de alta dissipação ligada em série com o circuito para proteção que em caso de problemas de configuração da fonte de soldagem a integridade dos IGBTs é garantida.

A figura 22 (A) mostra o circuito usado para fazer o acionamento, cada IGBT precisa de um Comando de Gate individual (circuito que faz o IGBT conduzir ou não).



**Figura 22 - Comando de gate dos IGBTs**

Todos os circuitos de potência que circulam uma grande corrente precisam de um meio para dissipar o calor causado pelo efeito da circulação dos elétrons. O fabricante do componente disponibiliza o manual do componente para que se possa analisar e escolher o que vai se adequar ao projeto. Após escolher o componente é preciso fazer um estudo e analisar se este vai satisfazer a necessidade ao qual este foi escolhido pelos seus dados técnicos.

A temperatura ambiente deve ser levada em consideração para o cálculo do circuito a ser projetado e deve ser acrescido mais 20° C para garantir robustez da parte de potência e também evitar que se estes equipamentos forem usados em regiões muito quentes eles sofram danos por estarem mal dimensionados. Para cada ensaio deve-se calcular a temperatura com os dados obtidos através do datasheet, depois colocar em prática e com os valores obtidos durante o ensaio re-calcular para saber se o circuito se comporta conforme o esperado, sempre se faz 4 ensaios ou mais para validar a estrutura e os resultados obtidos devem ser idênticos em todos os experimentos.

Outro fator é ficar atento ao datasheet para saber com qual curva de acionamento e que forma de acionamento está sendo utilizada, pois, para cada forma de acionamento existe uma curva térmica. Já com o sistema de acionamento pronto é chegada a hora de começar a fazer os testes com o componente a fim de validá-lo para projeto. O próximo passo a ser seguido é fixar os IGBTs no dissipador e fazer a conexão para que estes fiquem ligados em série.

Um dos melhores materiais usados para dissipar calor é o alumínio. Todos os materiais quando aquecidos sofrem uma dilatação, isto deve ser levado em consideração quando a temperatura passa dos 60° C. Como no dissipador a ser usado estes valores de temperatura serão ultrapassados, é interessante se preocupar com este fato. A fórmula usada para calcular a dilatação linear do dissipador é a seguinte:

$$L = L_0 * (1 + \alpha * \Delta T), \text{ sendo que:}$$

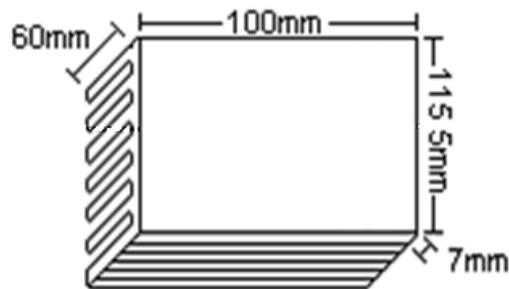
L = comprimento final do dissipador depois de submetido à temperatura final;

L<sub>0</sub> = comprimento inicial antes do aquecimento a temperatura ambiente;

$\alpha$  = coeficiente de dilatação linear do alumínio;

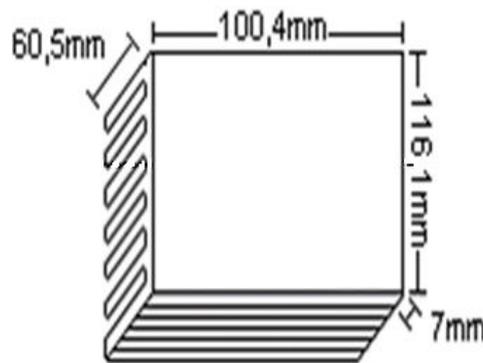
$\Delta T$  = variação da temperatura (temperatura final menos temperatura ambiente).

Na figura 23 pode ser observado o dissipador onde os IGBTs serão fixados e suas respectivas dimensões, sendo que será feito o cálculo de dilatação linear máxima do alumínio.



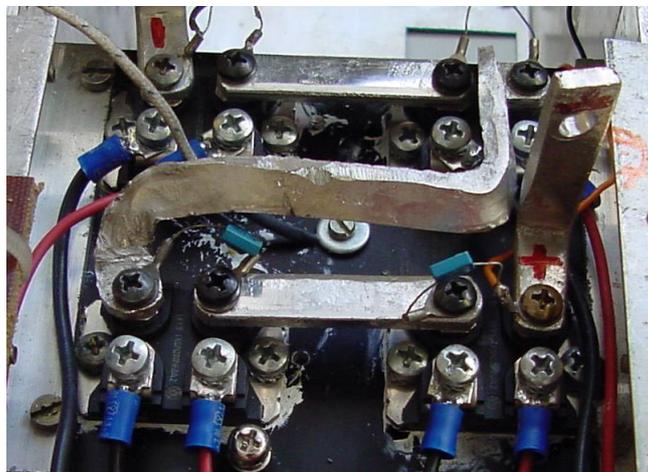
**Figura 23 - Dissipador usado nos experimentos**

A dilatação final máxima que este dissipador vai atingir é observada na figura 24 quando este for submetido a uma temperatura de 120° C.



**Figura 24 - Dissipador após sofrer o aquecimento.**

Após os IGBTs e termopares estarem fixados no dissipador é hora de começar a fazer os ensaios da estrutura de potência a ser desenvolvida. A figura 25 mostra a estrutura de potência montada e pronta para ser testada.



**Figura 25 - Estrutura de potência ser testada**

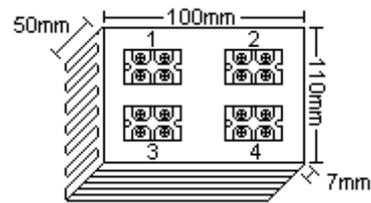
A fonte de corrente usada para fazer os testes é uma fonte de soldagem Digitec 450, esta fonte foi desenvolvida também no laboratório há alguns anos. A fonte Digitec 450 é uma fonte digital que possui como interface homem x máquina (IHM) um teclado com display que exibe as informações ajustadas e as informações do funcionamento desta. Na figura 26 pode ser observada esta fonte.



**Figura 26 - Fonte de corrente Digitec 450**

Para fazer os ensaios é necessário ajustar alguns parâmetros da fonte, o primeiro passo é ligar a fonte, selecionar a opção eletrodo revestido, em seguida o botão configurar, setar o parâmetro da tensão de curto-circuito ( $U_{cc}$ ) para 0 V e a corrente de curto circuito ( $I_{cc}$ ) para 30 A. os ensaios de corrente devem seguir os seguintes valores ajustes de corrente: 50 A, 80 A, 100 A, 110 A, 115 A, 120 A.

O circuito a ser testado é o da figura 25, os dados e as fórmulas a seguir foram levantados com os 04 IGBTs alocados no dissipador ligados em série de acordo com a figura 27.



**Figura 27 - Circuito a ser testado com 4 IGBTs**

É necessário relembrar alguns conceitos antes de desenvolver qualquer tipo de cálculo para esta estrutura.

$$P = V \times I$$

$$\Delta T_h = V \times I \times R_{th}$$

$$T_k = T_j - \Delta T_h$$

$$T_j - P \times (R_{thjc} + R_{thck}) - T_k = 0, \text{ substituindo a equação,}$$

$$T_k = T_j - P \times (R_{thjc} + R_{thck})$$

Onde:

**P:** Potência em (W);

**I:** Corrente (A);

**V:** tensão (V);

**$\Delta T_h$ :** Variação da temperatura que está gerada no circuito ( $^{\circ}\text{C}$ );

**$R_{th}$ :** Resistência do circuito ( $R_{thjc}$  e  $R_{thck}$ ) (K/W);

**$T_j$ :** Temperatura máxima da junção ( $^{\circ}\text{C}$ );

**$R_{thjc}$ :** Resistência entre cápsula e a junção, ver datasheet (K/W);

**$R_{thck}$ :** Resistência entre a junção e o dissipador, ver datasheet (K/W);

**$T_k$ :** Temperatura máxima no dissipador, temperatura que o IGBT suporta. ( $^{\circ}\text{C}$ );

**$^{\circ}\text{C diss}$ :** temperatura em que o dissipador estabilizou;

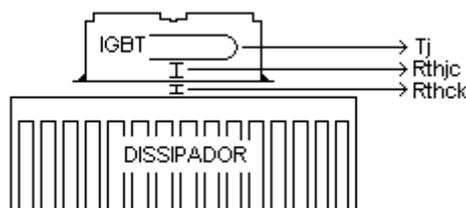
**$^{\circ}\text{C amb}$ :** temperatura ambiente;

**VGE:** 15Vcc, seguir esta curva para calcular as temperaturas;

**VCE:** tensão entre coletor e emissor.

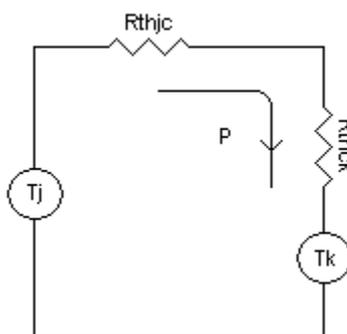
Na figura 28 está representado o circuito de onde deduziu-se o equacionamento para fazer os cálculos térmicos dos IGBTs. Quando se

trabalha com temperatura os cálculos são baseados em um circuito elétrico, pois, o seu comportamento é semelhante.



**Figura 28 - Dedução do cálculo térmico do componente**

O comportamento térmico deve ser analisado da seguinte forma para os cálculos conforme representado na figura 29.



**Figura 29 - Comportamento térmico do componente a ser testado**

Depois de tantas informações e procedimentos chegou o momento de calcular o efeito térmico dos componentes nos ensaios. A seguir temos as informações obtidas no datasheet (manual do componente) e os seus respectivos cálculos e os dados obtidos com os ensaios. Os ensaios foram realizados sem usar um ventilador para resfriar o dissipador, ou seja, por ventilação natural.

Dados do datasheet				Dados obtidos dos ensaios			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)	I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
50 A	1,1 V	25 °C	55 W	51 A	1,09 V	22 °C	54,5 W
$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$ $T_k = 150 - 55 \cdot (0,17 + 0,05)$ $T_k = 150 - 12,1$ $T_k = 137,9^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C diss} = (< T_k)$				$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$ $T_k = 150 - 54,5 \cdot (0,17 + 0,05)$ $T_k = 150 - 11,99$ $T_k = 138,01^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C diss} = 57^{\circ}\text{C}$			

## Dados do datasheet

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
80 A	1,18 V	25 °C	94,4 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 94,4 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 20,77$$

$$T_k = 129,23^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

## Dados obtidos dos ensaios

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
82 A	1,2 V	22 °C	98,4 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 98,4 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 21,65$$

$$T_k = 128,35^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 80^\circ\text{C}$$

## Dados do datasheet

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
100 A	1,26 V	25 °C	126 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 126 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 27,72$$

$$T_k = 122,28^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

## Dados obtidos dos ensaios

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
103 A	1,25 V	22 °C	128,75 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 128,75 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 28,33$$

$$T_k = 121,67^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 96^\circ\text{C}$$

## Dados do datasheet

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
110 A	1,3 V	25 °C	143 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 143 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 31,46$$

$$T_k = 118,54^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

## Dados obtidos dos ensaios

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
113 A	1,28 V	22 °C	144,64 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 144,64 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 31,82$$

$$T_k = 118,18^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 105^\circ\text{C}$$

## Dados do datasheet

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
115 A	1,31 V	25 °C	150,65 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 150,65 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 33,14$$

$$T_k = 116,85^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

## Dados obtidos dos ensaios

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
115 A	1,29 V	22 °C	148,35 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 148,35 \cdot (0,17 + 0,05)$$

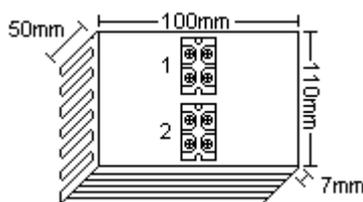
$$T_k = 150 - 32,64$$

$$T_k = 117,36^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 109^\circ\text{C}$$

Dados do datasheet				Dados obtidos dos ensaios			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)	I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
120 A	1,35 V	25 °C	162 W	120 A	1,35 V	22 °C	162 W
$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$ $T_k = 150 - 162 \cdot (0,17 + 0,05)$ $T_k = 150 - 35,64$ $T_k = 114,36^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C diss} = (< T_k)$				$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$ $T_k = 150 - 162 \cdot (0,17 + 0,05)$ $T_k = 150 - 35,64$ $T_k = 114,36^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C diss} = 112^\circ\text{C}$			

A fim de buscar os melhores resultados nos ensaios da estrutura de potência dos IGBTs, novos ensaios foram realizados agora com dois IGBTs em outra posição e sem ventilação forçada (ventilador no dissipador, sem uso de ventilador), estes ficaram posicionados no dissipador de acordo com a figura 30.



**Figura 30 - Ensaios com os IGBTs em outra forma de posicionamento**

Os resultados obtidos podem ser observados nos cálculos abaixo, sendo que a temperatura ambiente teve alteração para 25° C.

Dados do datasheet				Dados obtidos dos ensaios			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)	I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
50 A	1,1 V	25 °C	55 W	50 A	1,1 V	25 °C	55,5 W
$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$ $T_k = 150 - 55 \cdot (0,17 + 0,05)$ $T_k = 150 - 12,1$ $T_k = 137,9^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C diss} = (< T_k)$				$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$ $T_k = 150 - 55,5 \cdot (0,17 + 0,05)$ $T_k = 150 - 12,21$ $T_k = 137,79^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C diss} = 44^\circ\text{C}$			
Dados do datasheet				Dados obtidos dos ensaios			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)	I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
80 A	1,18 V	25 °C	94,4 W	80 A	1,2 V	25 °C	96 W
$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$ $T_k = 150 - 94,4 \cdot (0,17 + 0,05)$ $T_k = 150 - 20,77$ $T_k = 129,23^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C diss} = (< T_k)$				$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$ $T_k = 150 - 96 \cdot (0,17 + 0,05)$ $T_k = 150 - 21,12$ $T_k = 128,88^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C diss} = 60^\circ\text{C}$			

## Dados do datasheet

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
100 A	1,26 V	25 °C	126 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 126 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 27,72$$

$$T_k = 122,28^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

## Dados obtidos dos ensaios

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
100 A	1,26 V	25 °C	126 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 126 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 27,72$$

$$T_k = 122,28^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 75^\circ\text{C}$$

## Dados do datasheet

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
110 A	1,3 V	25 °C	143 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 143 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 31,46$$

$$T_k = 118,54^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

## Dados obtidos dos ensaios

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
110 A	1,3 V	25 °C	143 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 143 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 31,46$$

$$T_k = 118,18^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 85^\circ\text{C}$$

## Dados do datasheet

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
120 A	1,33 V	25 °C	162 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 162 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 35,64$$

$$T_k = 114,36^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

## Dados obtidos dos ensaios

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
120 A	1,33 V	25 °C	159,6 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 159,6 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 35,11$$

$$T_k = 114,89^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 93^\circ\text{C}$$

## Dados do datasheet

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
130 A	1,37 V	25 °C	178,1 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 178,1 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 39,18$$

$$T_k = 110,82^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

## Dados obtidos dos ensaios

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
130 A	1,37 V	25 °C	178,1 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 178,1 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 39,18$$

$$T_k = 110,82^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 100^\circ\text{C}$$

Dados do datasheet				Dados obtidos dos ensaios			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)	I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
140 A	1,38 V	25 °C	193,2 W	144 A	1,39 V	25 °C	200,16 W
$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$ $T_k = 150 - 193,2 \cdot (0,17 + 0,05)$ $T_k = 150 - 45,50$ $T_k = 107,5^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C diss} = (< T_k)$				$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$ $T_k = 150 - 200,16 \cdot (0,17 + 0,05)$ $T_k = 150 - 44,03$ $T_k = 105,97^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C diss} = 105^\circ\text{C}$			

Como não se atingiu a corrente necessária para a estrutura de potência ao qual se deseja para o projeto sem fazer uma ventilação forçada, os ensaios serão repetidos agora usando um ventilador para fazer o resfriamento da mesma na figura 31 (A), tem um ventilador que será usado para resfriar o barramento que interliga os IGBTs e um ventilador abaixo figura 31 (B) para fazer o resfriamento do dissipador, este ventilador B é que será usado quando o projeto for finalizado, pois, este ventilador tem a função de formar um túnel de vento para o resfriamento do dissipador.

O ventilador A tem a função apenas de esfriar o barramento e não interfere muito na temperatura do dissipador, mas neste momento será ligado o ventilador A. Os ensaios devem ser realizados nas piores condições possíveis de operação, o projeto precisa ser robusto e não pode haver falhas.

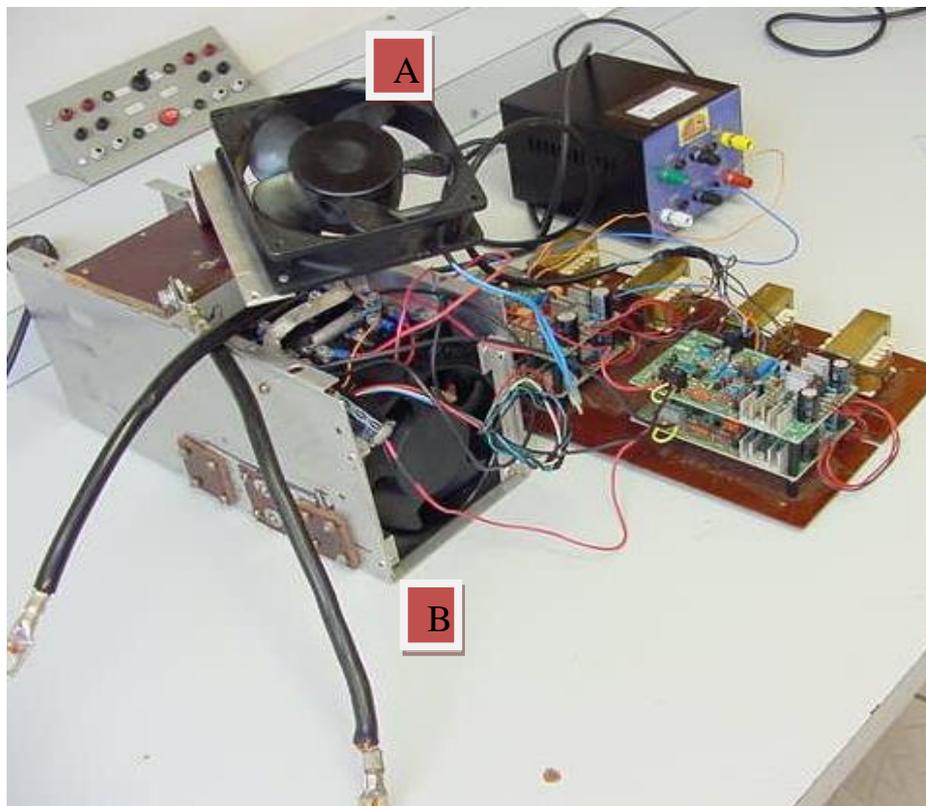


Figura 31 - Estrutura de potencia com dois ventiladores

Os ensaios serão realizados à partir de uma corrente mais elevada, que foi o limite usando a ventilação forçada no barramento dos IGBTs e agora será ligado também o ventilador B da figura 31.

Dados do datasheet				Dados obtidos dos ensaios			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)	I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
150 A	1,44 V	25 °C	216 W	154 A	1,45 V	22 °C	223,3 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 216 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 47,52$$

$$T_k = 102,48^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 223,3 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 49,12$$

$$T_k = 100,8^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 89^\circ\text{C}$$

Dados do datasheet				Dados obtidos dos ensaios			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)	I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
160 A	1,48 V	25 °C	236,8 W	164 A	1,5 V	22 °C	246 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 236,8 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 52,09$$

$$T_k = 97,91^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

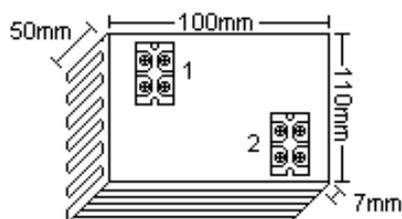
$$T_k = 150 - 246 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 54,12$$

$$T_k = 95,88^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 92^\circ\text{C}$$

Os dados levantados foram satisfatórios em algumas partes, mas a fim de melhorar o desempenho do sistema de dissipação térmica posicionou-se os IGBTs de forma diferente no dissipador. A configuração ficou de acordo com a figura 32, sendo que o sistema ainda assim continuou sendo resfriado com o ventilador (A) da figura 31. A figura 32 mostra o posicionamento dos IGBTs no dissipador.



**Figura 32 - Dissipador com os IGBTs em outra configuração**

## Dados do datasheet

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
50 A	1,1 V	25 °C	55 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 55 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 12,1$$

$$T_k = 137,9^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

## Dados obtidos dos ensaios

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
50 A	1,1 V	25 °C	55,5 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 55,5 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 12,21$$

$$T_k = 137,79^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 44^\circ\text{C}$$

## Dados do datasheet

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
80 A	1,18 V	25 °C	94,4 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 94,4 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 20,77$$

$$T_k = 129,23^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

## Dados obtidos dos ensaios

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
80 A	1,22 V	25 °C	97,6 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 97,6 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 21,47$$

$$T_k = 128,53^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 57^\circ\text{C}$$

## Dados do datasheet

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
100 A	1,26 V	25 °C	126 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 126 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 27,72$$

$$T_k = 122,28^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

## Dados obtidos dos ensaios

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
100 A	1,29 V	25 °C	129 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 129 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 28,38$$

$$T_k = 121,22^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 68^\circ\text{C}$$

## Dados do datasheet

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
110 A	1,3 V	25 °C	143 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 143 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 31,46$$

$$T_k = 118,54^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

## Dados obtidos dos ensaios

I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
111 A	1,32 V	25 °C	146,52 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 146,52 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 32,23$$

$$T_k = 117,77^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 72^\circ\text{C}$$

Dados do datasheet			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
120 A	1,33 V	25 °C	162 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 162 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 35,64$$

$$T_k = 114,36^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

Dados obtidos dos ensaios			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
123 A	1,36 V	22 °C	167,28 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 167,28 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 36,8$$

$$T_k = 113,2^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 79^\circ\text{C}$$

Dados do datasheet			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
130 A	1,37 V	25 °C	178,1 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 178,1 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 39,18$$

$$T_k = 110,82^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

Dados obtidos dos ensaios			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
130 A	1,4 V	22 °C	182 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 182 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 40,04$$

$$T_k = 109,96^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 87^\circ\text{C}$$

Dados do datasheet			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
140 A	1,38 V	25 °C	193,2 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 193,2 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 45,50$$

$$T_k = 107,5^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

Dados obtidos dos ensaios			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
144 A	1,44 V	22 °C	207,36 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 207,36 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 45,62$$

$$T_k = 104,38^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 98^\circ\text{C}$$

Usando-se os dois ventiladores ligados na configuração vista na figura 32, obtemos um desempenho melhor e resultados mais expressivos, conforme observado nos cálculos abaixo, isto, partindo da corrente máxima usada anteriormente nos outros ensaios.

Dados do datasheet			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
150 A	1,44 V	25 °C	216 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 216 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 47,52$$

$$T_k = 102,48,36^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

Dados obtidos dos ensaios			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
154 A	1,49 V	22 °C	229,46 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 229,46 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 50,48$$

$$T_k = 99,52^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 84^\circ\text{C}$$

Dados do datasheet			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
160 A	1,48 V	25 °C	236,8 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 236,8 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 52,09$$

$$T_k = 97,91^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

Dados obtidos dos ensaios			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
165 A	1,54 V	22 °C	252,56 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 252,56 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 55,56$$

$$T_k = 94,43^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 88^\circ\text{C}$$

Dados do datasheet			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
170 A	1,55 V	25 °C	263,5 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 263,5 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 57,97$$

$$T_k = 92,03^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = (< T_k)$$

Dados obtidos dos ensaios			
I (A)	Vce (V)	°C amb.	Potencia (W)
170 A	1,6 V	22 °C	272 W

$$T_k = T_j - P \cdot (R_{thjc} + R_{thck})$$

$$T_k = 150 - 272 \cdot (0,17 + 0,05)$$

$$T_k = 150 - 59,84$$

$$T_k = 90,16^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{C diss} = 91^\circ\text{C}$$

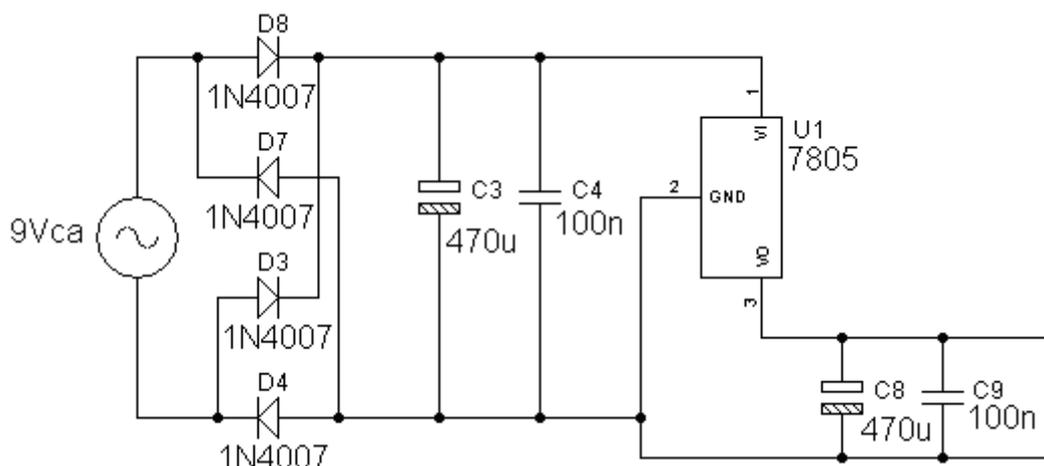
Após levantar todos estes dados está concluída a parte dos ensaios com os IGBTs e suas limitações quanto à temperatura. Se aumentarmos o tamanho do dissipador, com certeza se conseguirá atingir correntes maiores, mas temos que ficar atentos quanto à temperatura no barramento de conexão entre os IGBTs.

Dependendo do tamanho do dissipador o equipamento pode se tornar muito grande, uma das soluções é colocar mais IGBTs para fazer o acionamento, pois, com 4 destes (figura 27) foi possível atingir uma potência maior do que no circuito da figura 32 que foi usado apenas dois IGBTs.

## 5 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Todos os circuitos eletrônicos precisam de uma fonte de alimentação para que funcionem. Os circuitos eletrônicos usam fontes de alimentação com saída DC (tensão em corrente contínua 0V e +Vcc para alimentação de circuitos TTL) e fontes de alimentação simétrica (+Vcc, 0V e -Vcc) para circuitos CMOS.

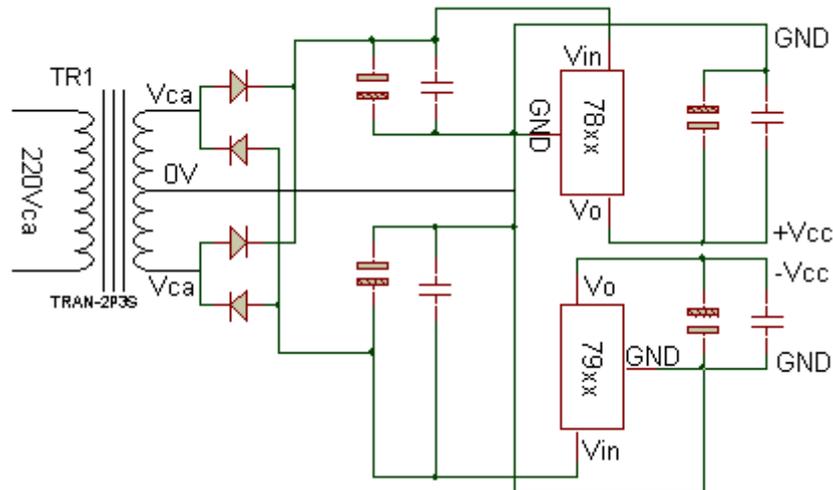
Na figura 33 temos um exemplo de como é feita uma fonte de alimentação com corrente contínua para a alimentação de circuito TTL.



**Figura 33 - Fonte de alimentação**

A fonte da figura 33 funciona da seguinte forma: tem um transformador abaixador de tensão que converte a tensão da rede elétrica de 220Vca para 9Vca tem uma ponte de diodos retificadores (1N4007) que transforma a tensão de corrente alternada para contínua; o capacitor (C3) usado para fazer a correção do reape, ou seja, deixar a tensão linear, o capacitor é um dispositivo usado para acumular energia; o capacitor (C4) é usado para eliminar ruídos provenientes da rede elétrica; o circuito integrado 7805 (U1) é usado para regular a tensão de saída em Vcc; o capacitor (C8) é para garantir a estabilidade da tensão de saída em caso de algum pico de corrente por um curto período de tempo e o capacitor (C9) é usado para filtro (eliminar ruídos provocados por correntes parasitas).

Na figura 34 está o exemplo de uma fonte simétrica, sendo que todos os componentes existentes na fonte da figura 33 exercem o mesmo efeito para a fonte simétrica.



**Figura 34 - Fonte de alimentação simétrica**

Para calcularmos o valor do capacitor para a fonte a fim de eliminar o reapele ou deixá-lo com o menor valor possível, deve-se seguir o seguinte passo:

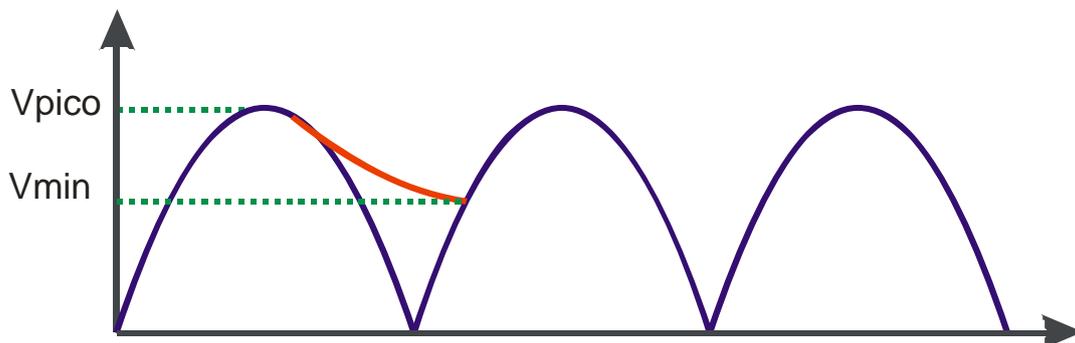
$$C = (T / 0,7 * V) * I \quad \text{onde: } T = 1 / F = 1 / 120 = 0,0084s$$

$F = 120\text{Hz}$  devido a retificação em onda completa

$$V = V_{\text{pico}} - V_{\text{min}}$$

Onde,  $C$  = capacitor;  $F$  = frequência;  $V$  = tensão de reapele;  $I$  = corrente consumida pelo circuito e  $0,7$  = o achatamento que ocorre devido que o diodo tem uma perda de  $0,7\text{V}$  até que entre em condução.

Na figura 35 pode-se observar a forma de onda depois de passar pelos diodos de retificação e o reapele máximo que se quer para este.



**Figura 35 - Correção do reapele por capacitor**

Geralmente um regulador precisa de uma tensão mínima de  $3\text{V}$  maior na entrada do que na saída para seu correto funcionamento, como é o caso dos reguladores lineares 78xx.

## 6 PROTEÇÕES DA FONTE DE SOLDAGEM

Quando se trabalha com eletrônica de potência existe um conceito que devem ser levado em consideração “potência sem controle não serve para nada”. Quando se desenvolve algum equipamento alguns desse nível, alguns cuidados devem ser tomados com relação a parte de controle, o primeiro passo é que se deve fazer um circuito de partida suave para evitar o pico de corrente quando a fonte for ligada, projetar um sistema de proteção com relação ao limite de corrente do equipamento, proteção térmica do transformador e da estrutura de potência.

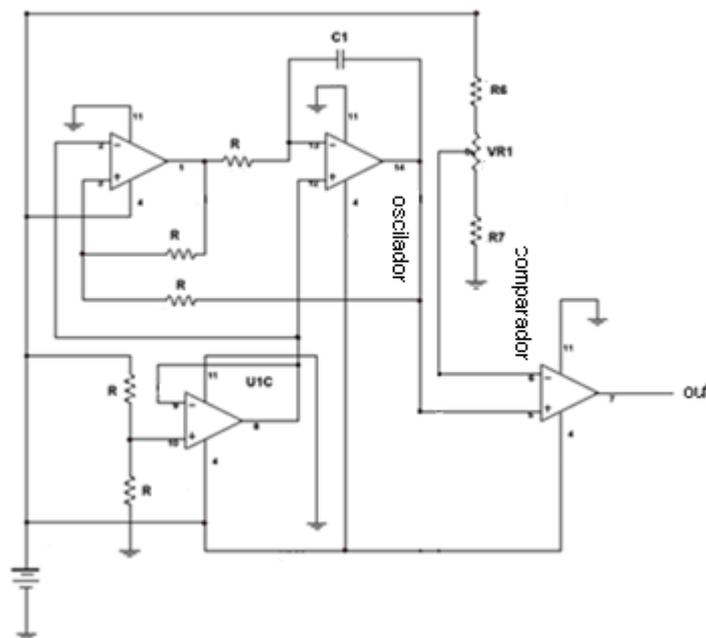
A proteção da corrente de partida é usada quando a fonte é ligada. Esta é feita da seguinte forma: coloca-se um indutor em série com os capacitores da ponte retificadora e quando estes atingirem um certo valor de tensão o indutor que está em série com o banco de capacitores é desligado e a tensão da rede passa ficar direto em cima dos capacitores.

A proteção de corrente limite da fonte é feita através da leitura da corrente de saída da fonte, se esta ultrapassar os 350 A, a proteção de sobre corrente atua desligando o circuito de potência. Para fazer a leitura da corrente é usado um sensor de efeito Hall, ou seja, um sensor de efeito de passagem. Este sensor faz a leitura da corrente de saída da fonte através do campo magnético gerado pela corrente que atravessa o condutor. O sensor hall transforma este campo magnético em uma corrente proporcional, esta corrente é transformada em valor de tensão correspondente. Se este valor for suficiente para disparar a proteção, a fonte fica sem saída de corrente a potência é desativada. Para fazer esta voltar a funcionar é necessário desligar e religar a fonte.

A proteção térmica é feita com um semicondutor chamado de NTC (coeficiente de temperatura negativo). Este dispositivo funciona da seguinte forma: quando ele é submetido à temperatura a sua resistência diminui de acordo com o aumento da temperatura, sendo assim seu coeficiente de temperatura negativo. Os NTC são colocados no dissipador, no meio do transformador. A proteção funciona através de um comparador que monitora o valor da temperatura, se o valor da temperatura exceder o limite tolerado, automaticamente a parte de potência da fonte é desativada, sendo possível esta ser religada quando a temperatura voltar a se estabilizar.

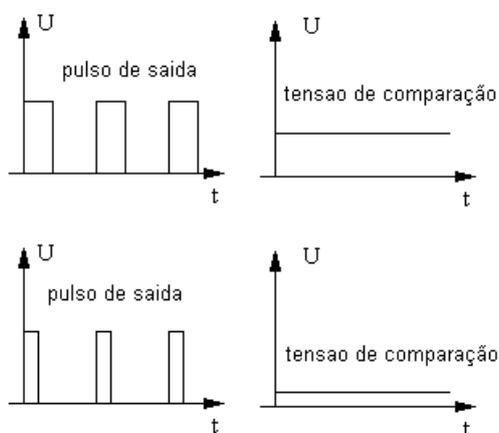
## 7 CIRCUITO PWM

O acionamento da parte de potência é feito por um circuito PWM - Modulação por Largura de Pulso, ou seja, com uma frequência fixa e o que varia é o tempo em que o circuito fica acionado (nível lógico alto). Na figura 36 mostra como é um circuito PWM construído com AMPOP - Amplificadores Operacionais.



**Figura 36 - Circuito PWM**

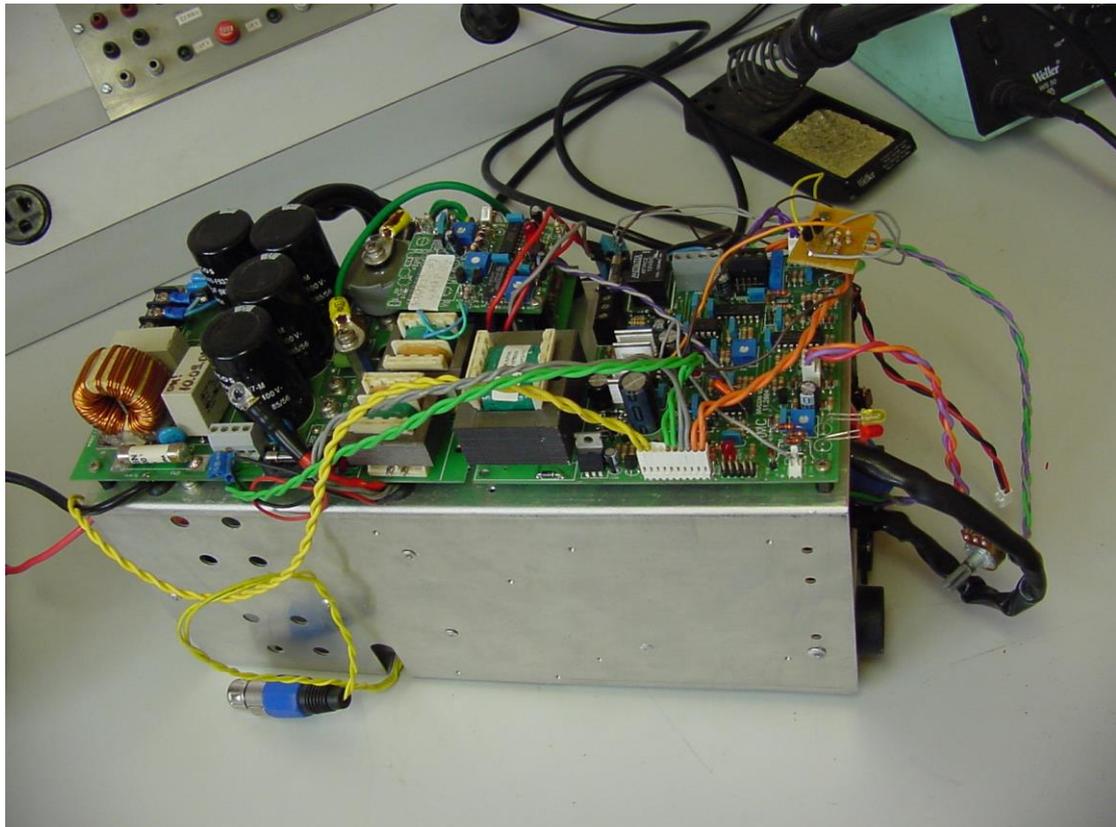
A figura 37 mostra a forma de saída da largura de pulso de acordo com uma tensão de referência que serve para fazer o controle de corrente da fonte de soldagem.



**Figura 37 - Forma de onda do circuito PWM**

## 8 DESENVOLVIMENTO DA FONTE

Após a parte de controle estar concluída e a parte de potência também é necessário uni-las e deixá-las em plena operação. Na figura 38 é possível observar como ficou o módulo de corrente pronto para ser usado. Este módulo de corrente tem capacidade de fornecer 160 A, sendo que, se usados dois módulos iguais, esta corrente será dobrada.

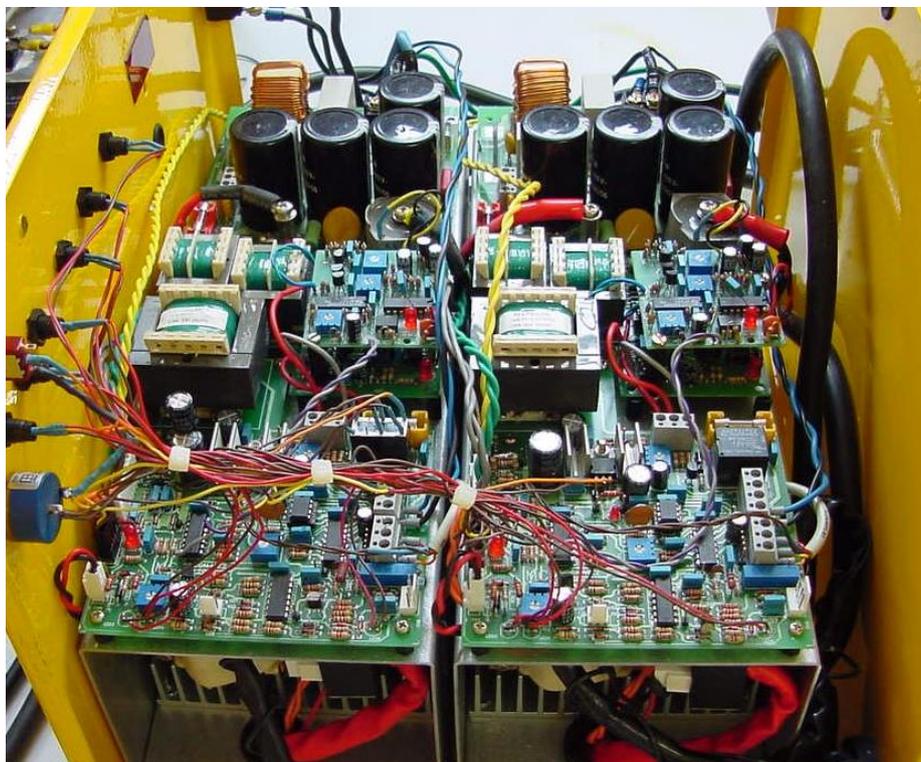


**Figura 38 - Módulo de corrente concluído**

Após o circuito de uma fonte funcionar é preciso colocar os dois módulos para operarem em paralelo. Quando se trabalha com alta frequência, sempre se deve ter um cuidado especial para evitar acidentes, pois, fazer o controle de estruturas de potência requer cuidados especiais.

O primeiro passo é colocar os módulos num gabinete, depois disso é fazer a conexão elétrica entre estes, certificar-se de que tudo está conectado corretamente e depois ligar para ver se está operando. Ocorreram alguns problemas de acionamento com os módulos conectados em paralelo, o chaveamento de um módulo de corrente interferia no outro, isto, se deve ao fato, de estas estarem fora de sincronismo. O ajuste deste parâmetro é feito através de um resistor variável (Trimpot) existente no circuito de controle.

Depois que o problema de interferência foi solucionado, a grande dificuldade está em fazer o acionamento dos módulos em paralelo e fazer o controle dos mesmos. Na figura 39 disposto como ficou a colocação dos módulos no gabinete com o controle analógico.



**Figura 39 - Módulos de corrente em paralelo**

Inicialmente uso-se um potenciômetro para ajustar a corrente, mas isto serve apenas para os primeiros ensaios. Estes ensaios servem para levantarmos os dados iniciais sobre a limitação de seu uso.

Na tabela 2, temos o resultado dos primeiros dados levantados durante a soldagem com a nova fonte. Os dados foram obtidos com soldagem em eletrodo, por ser um processo de soldagem simples, estes dados são de extrema importância para o andamento do projeto. Através dos dados é que será possível avaliar se o projeto é viável ou se devemos dar outro rumo as pesquisas.

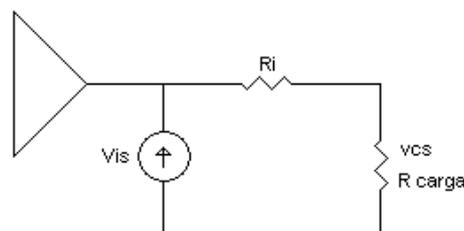
**Tabela 2 - Dados levantados no primeiro ensaio com os módulos em paralelo**

Tensão de referência	Escala	Tensão de arco	Corrente de soldagem
2 V	1 X 80	24 V	160 A
3 V	1 X 80	34 V	220 A
4V	1 X 80	36 V	270 A

Os dados obtidos são satisfatórios. A partir da análise destes dados concluiu-se que o projeto pode ser levado adiante. A tensão de arco obtida com os valores de corrente elevados, foi o passo ponto fundamental para que o projeto continuasse em desenvolvimento, pois, a tensão necessária para um dos processos de soldagem a ser usado necessita de 30 Volts de tensão de arco.

Durante os testes, perceberam-se alguns problemas com o sensor hall (sensor de efeito de passagem, ou seja, este lê corrente através do campo magnético gerado pela circulação da corrente no cabo de energia usado para a soldagem). Muitas dificuldades surgiram para a obtenção de informações sobre as características dos sensores de corrente que satisfizessem as necessidades do projeto, o fabricante não disponibilizava alguns detalhes específicos que deveriam ser levados em consideração para a solução dos problemas.

Mas depois de muitos ensaios e testes conseguiu-se levantaram os dados de interesse. Com isso foi possível a continuidade do projeto, na figura 40 o circuito deduzido de funcionamento do sensor hall, que até então era encarado como uma caixa preta.



**Figura 40 - Princípio de funcionamento do sensor hall**

Na tabela 3, estão os dados obtidos durante os ensaios realizados para descobrir a impedância do valor da corrente de saída do sensor.

**Tabela 3 - Dados ensaiados para achar a impedância de saída do circuito da figura 40**

I fonte (Re2)	R carga (Re1)	Vcs
50A	480R	11,8V
100A	200R	9,5V
200A	56R	5,5V

$$V_{is} - R_i \times I_1 - R_{ei} \times I_1 = 0$$

$$- V_{is} + R_i \times I_1 + R_{ei} \times I_1 = 0$$

Retornando

$$V_{is} = 80 \times 25 \text{ mA} + 480 \times 25 \text{ mA} \neq 0$$

$$V_{is} = 2 + 12$$

$$V_{is} = 14 \text{ V ( } V_{\text{sat}} \text{ do ampop )}$$

Os cálculos a seguir são referentes ao ensaio realizado para descobrir a impedância de saída do sensor Hall.

$$R_i ( I_2 - I_1 ) = - R_{e2} \times I_2 + R_{e1} \times I_1$$

$$R_i = \frac{R_{e1} \times I_1 - R_{e2} \times I_2}{I_2 - I_1}$$

$$I_2 - I_1$$

$$R_i = \frac{480 \times 50 - 200 \times 100}{100 - 50}$$

$$100 - 50$$

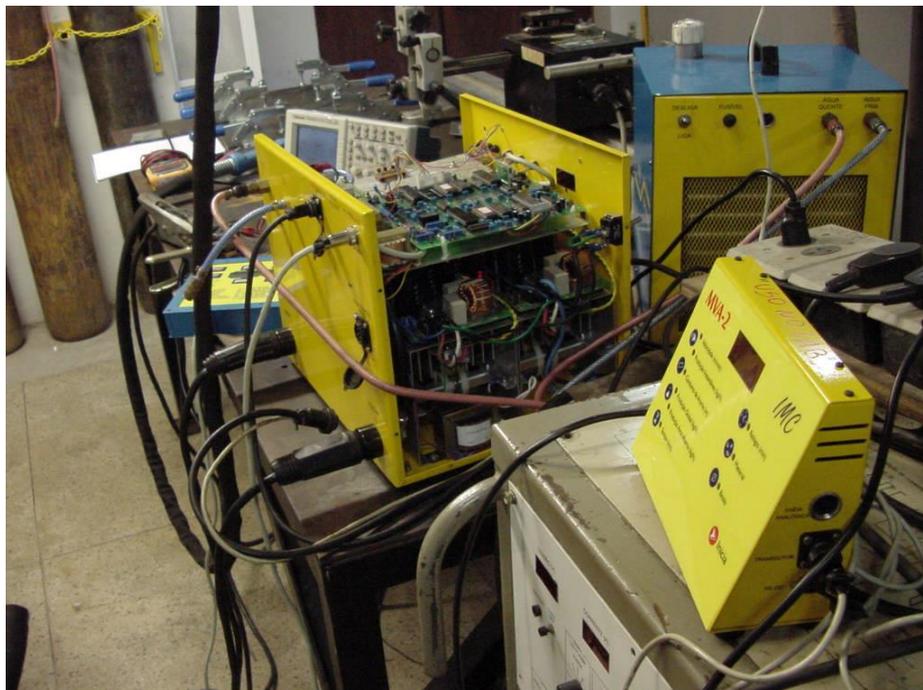
$$R_i = 80 \text{ R}$$

É necessário saber a impedância de saída do sensor, porque temos que limitar alguns circuitos da fonte de soldagem, projetar um filtro para eliminar os ruídos e estes filtros podem influenciar no valor da corrente de saída da fonte se estes não forem bem dimensionados. Conforme os dados calculados anteriormente, a resistência de carga (R carga) começa a influenciar no circuito se aumentar seu valor da corrente.

## 9 APERFEIÇOAMENTO DO PROJETO

O principal objetivo é ter uma fonte multifuncional. Com os dados obtidos de acordo com a tabela 2, é possível colocar uma placa microcontrolada (placa digital com softwares para vários processos de soldagem ao qual é o objetivo do projeto).

Na figura 41, temos a fonte de soldagem com a placa microcontrolada acoplada e o sistema todo interligado e preparado para ser controlado pelo microcontrolador. Como pode-se observar a fonte está em uma bancada de testes. Iniciando-se os ensaios para que esta seja calibrada. Nos primeiros testes houve uma diferença da corrente de saída com relação a ajustada no display do teclado. Um detalhe importante que deve ser levado em consideração é a calibração da máquina é que os cabos de saída devem estar bem esticados, se deixados enrolados, a calibração não ficará correta, pois, o campo magnético gerado se torna muito grande e vai afetar os instrumentos de calibração que estão próximos, além disso, com o cabo longo uma indutância grande é gerada pelo cabo.



**Figura 41 - Fonte de soldagem com os módulos em paralelo controlados por um sistema microcontrolado**

Com esta fonte é possível realizar os seguintes processos de soldagem:

- Plasma, (processo de soldagem que se usa o calor do arco que pode atingir até 20.000 °C e o eletrodo não é consumido pelo processo de soldagem e para manter os dois arcos (principal e o piloto) é usado um gás);
- MIG, adição de Metal com gás inerte, neste processo o eletrodo é consumível e para manter o arco é usado gás;
- Eletrodo Revestido;
- TIG, soldagem com um eletrodo não consumível e com gás inerte.

Através de um teclado (interface IHM), configura-se a fonte tanto no ajuste da corrente, quanto da tensão e da velocidade de arame (a tensão e velocidade de arame são para o processo MIG).

Nos primeiros ensaios para o processo MIG, usou-se um cabeçote STA20D, que é o padrão utilizado nas fontes de soldagem do LABSOLDA e IMC - Soldagem (fabricante), porém este cabeçote é muito pesado. A solução para o projeto é colocar um cabeçote da fonte de soldagem Larry, que por sua vez é compacto e leve, ideal para ambientes em que se requer uma mudança constante de lugar. Na figura 42 detalha o cabeçote de alimentação de arame.



**Figura 42 - Cabeçote de soldagem MIG STA20D**

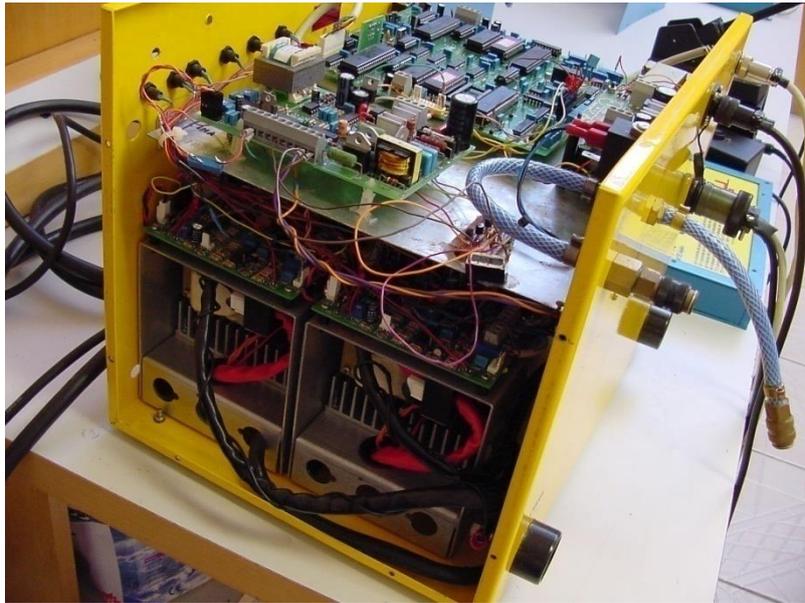
Como os primeiros ensaios foram promissores, precisa-se desenvolver um novo sistema de acionamento da estrutura de potência. A placa microcontrolada manda sinal digital, mas não é o suficiente para acionar a estrutura de potência que requer uma corrente maior do que o microcontrolador pode oferecer. No entanto é preciso desenvolver um sistema eletrônico para acionar esta estrutura. De um sinal TTL temos que fazer o acionamento de um circuito CMOS. Após desenvolver o circuito e acoplar na fonte, precisa-se aprimorar o sistema do cabeçote alimentador de arame.

A figura 43 mostra o cabeçote da fonte de soldagem Larry que será implementado na nova fonte. É necessário desenvolver um sistema de acionamento para a placa do cabeçote alimentador de arame, se a fonte estiver programada para 4 toques o cabeçote não era acionado, agora se torna indispensável o desenvolvimento de um circuito para habilitá-lo também neste tipo de acionamento, independentemente de estar em 4 toques ou 2 toques.



**Figura 43 - Cabeçote alimentador de arame da fonte de soldagem Larry**

Na figura 44 observa-se todas as placas de circuito eletrônico acopladas na fonte de soldagem que agora por sua vez está completa. O próximo passo consiste em fazer a calibração completa da nova fonte e começar a fazer os ensaios definitivos antes de ir para a usina fazer as demonstrações.



**Figura 44, fonte de soldagem completa**

A fonte precisa ser calibrada, para tanto a calibração será realizada em dois processos de soldagem com uma resistência de alta potência sendo usada como carga. Houve uma diferença entre a corrente ajustada e a medida, isto vale para correntes baixas e correntes mais elevadas. Mas não é uma falha de ajuste da máquina, mas sim devido à estrutura de potência da fonte. Na equação a seguir, podemos visualizar esta diferença.

$$\sqrt{I_{cc}^2 + I_{ef}^2}, \text{ onde: } I_{cc} = \text{corrente de curto circuito}$$

$I_{ef}$  = uma constante

Isto significa que quanto menor o valor da corrente, maior é o erro, a corrente fica um pouco acima do valor ajustado por conta da indutância de saída da fonte, o indutor de saída tem a função de acumular energia. Estes dados são visíveis nos cálculos realizados anteriormente, onde o valor medido apresentado é o eficaz. Para fazer a calibração, a fonte deve estar ligada por 30 minutos antes da aquisição dos dados, isto é importante para que o sistema entre em equilíbrio total, isto significa, que a máquina precisa estar com todo o sistema em temperatura de operação uniforme.

Na tabela 3 os dados levantados da calibração da fonte.

**Tabela 4 - Ensaios realizados com a fonte para que fosse realizado a calibração**

Eletrodo revestido		Plasma		Tensão de referencia	
Ajustado	Medido	Ajustado	Medido	Eletrodo	Plasma
25 A	33 A	25 A	35 A	0,29 V	0,29 V
50 A	55 A	50 A	57 A	0,59 V	0,59 V
75 A	79 A	75 A	81 A	0,88 V	0,88 V
100 A	105 A	100 A	107 A	1,18 V	1,18 V
125 A	131 A	125 A	132 A	1,48 V	1,48 V
150 A	155 A	150 A	155 A	1,77 V	1,77 V
175 A	177 A	175 A	177 A	2,07 V	2,07 V
200 A	202 A	200 A	201 A	2,36 V	2,35 V
225 A	224 A	225 A	224 A	2,65 V	2,64 V
250 A	247 A	250 A	246 A	2,93 V	2,93 V
275 A	270 A	275 A	270 A	3,22 V	3,22 V
300 A	294 A	300 A	293 A	3,51 V	3,51 V
320 A	314 A	320 A	313 A	3,73 V	3,73 V

Na figura 45 temos o esquema elétrico de conexão entre os módulos de corrente, o sistema de controle e do cabeçote alimentador de arame após todas as considerações necessárias para seu funcionamento.

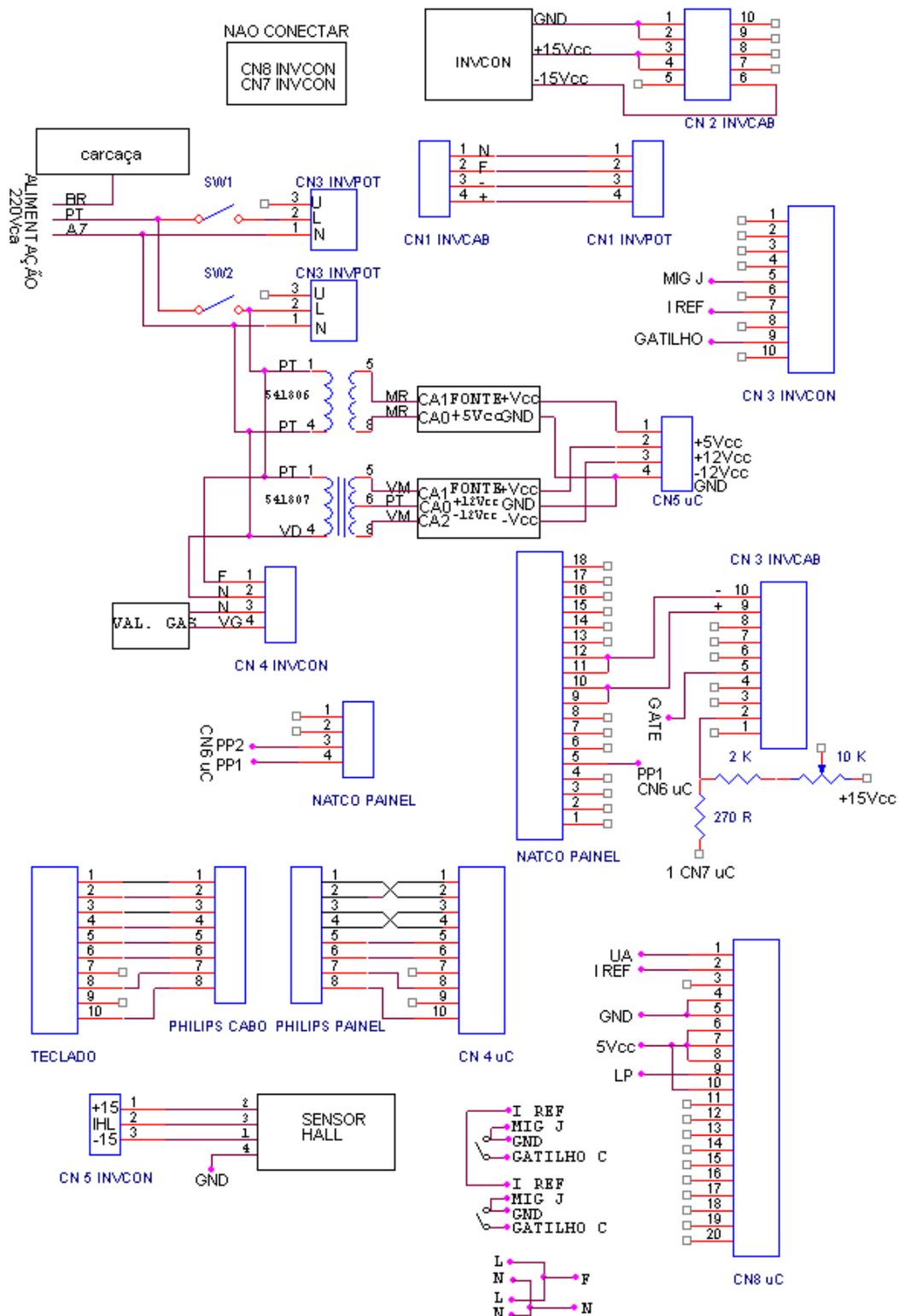
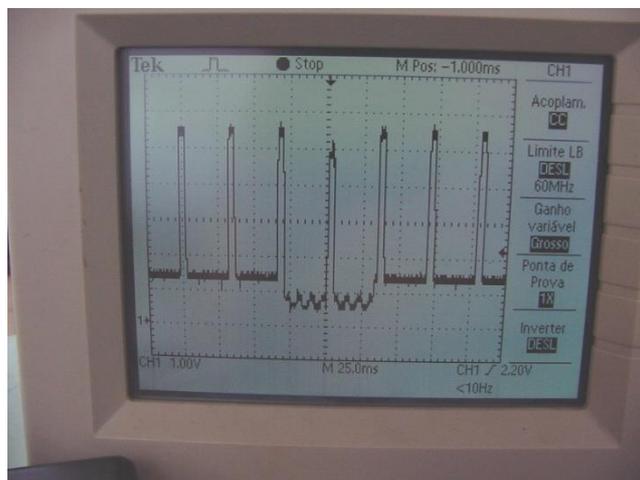


Figura 45 - Esquema elétrico de conexão dos módulos

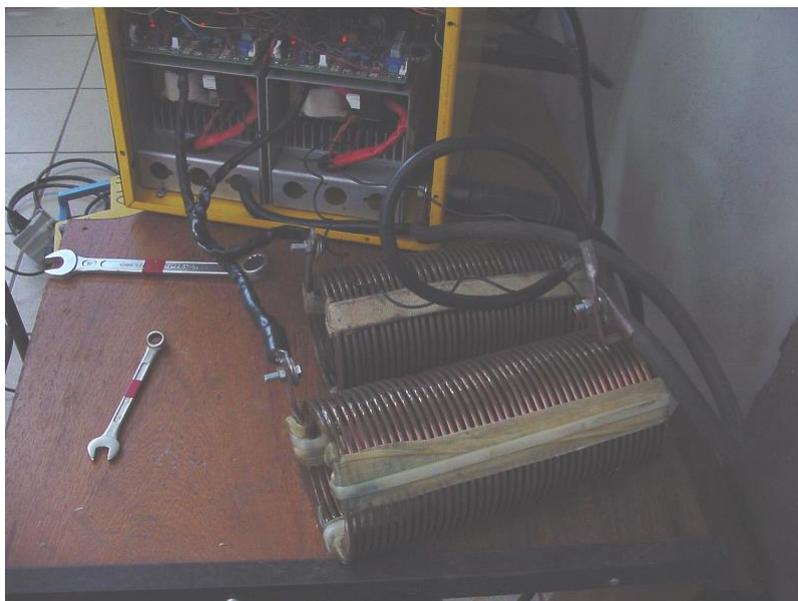
Para a soldagem de alguns processo onde se trabalha com o limite da fonte, alguns problemas surgiram com relação a corrente de saída sofrer algumas oscilações, o fato se deve por não se conseguir fazer o sincronismo perfeito entre os dois módulos, a diferença do sincronismo é de dois nano

segundos e também por a indutância de saída da fonte ser pequena para uma grande circulação de energia. Na figura 46 pode-se observar a oscilação da corrente de saída na tela do osciloscópio.



**Figura 46, oscilação da corrente de saída**

Para resolver o problema, a solução é colocar um indutor de saída com grande indutância. Na figura 47 pode-se observar este indutor ligado na saída de cada um dos módulos de corrente.



**Figura 47 - Indutor conectado na saída da fonte de soldagem**

Após solucionar todos os problemas que surgiram durante o desenvolvimento da fonte, concluiu-se o projeto com sucesso e dentro do prazo estabelecido, a fonte foi testada em laboratório nas mais adversas condições de trabalho para que fosse comprovada sua robustez e eficiência. Na figura 48 observa-se a fonte após finalizada.



**Figura 48 - Fonte completa após finalizado o projeto**

Com o intuito de validar o novo equipamento e testá-lo ao qual propósito foi desenvolvido é necessário ir até usina e soldar. Os ensaios serão realizados na usina termelétrica Jorge Lacerda, situada em Capivari de Baixo – Santa Catarina. A figura 49 mostra o momento em que estava me preparando para começar os testes em campo, dentro da usina.



**Figura 49 - Comprovação do trabalho realizado em campo**

Durante a soldagem alguns problemas surgiram quanto a tensão de alimentação da fonte, pois, na rede de energia elétrica na usina estava

chegando apenas 180 Vca, a fonte foi prjetada para operar em 220Vca, mas a fonte trabalhou normalmente sem problemas durante todo o tempo em que ficamos fazendo a soldagem dentro da caldeira 7 do complexo termelétrico Jorge Lacerda. Na figura 50 está a comprovação direta e efetiva durante os ensaios realizados.



**Figura 50 - Comprovação da atuação direta no projeto**

## 10 CONCLUSÃO

Quando se trata de desenvolvimento de novas tecnologias e equipamentos o caminho a ser seguido é longo e difícil, muitas vezes nos deparamos com situações sem saídas, a melhor maneira é retornar ao início e tentar outro caminho.

O LABSOLDA – UFSC é o laboratório mais renomado nacionalmente e um dos mais respeitados no mundo na área de desenvolvimento tecnológico relacionado à soldagem. O Labsolda é constituído por uma equipe que sempre está em busca de novos desafios tecnológicos.

Um dos maiores problemas encontrados ao se trabalhar com eletrônica de potência está em fazer o controle desta, pois, de nada adianta ter um equipamento com muita potência e não se obter controle sobre esta.

Quando se trabalha com cálculos térmicos aplicados a eletrônica, o cálculo para este pode ser considerado o mesmo do cálculo aplicado a uma análise de circuitos elétricos, mas nesse caso o que circula é o calor e não a corrente como nos circuito eletrônicos.

A fonte apesar de ter ficado compacta ainda é um pouco grande para as condições de trabalho ao qual foi submetida, ainda pode ser melhorado o layout do gabinete tornando-o mais estreito e mais longo.

## REFERÊNCIAS

TEXAS INSTRUMENTS. Power Supply Control Products (PS). Data Book. Texas Instruments, U.S.A., 11/99.

MOTOROLA. Motorola Communications Device Data. Motorola Literature Distribution, 1995.

TEXAS INSTRUMENTS. Interface Products (IF). Data Book. Texas Instruments, U.S.A., 11/99.

TEXAS INSTRUMENTS. Portable Products (PP). Data Book. Texas Instruments, U.S.A., 11/99.

TEXAS INSTRUMENTS. Amplifiers and Comparators. Data Book. Texas Instruments, U.S.A., 11/99.

BARBI, Ivo. Eletrônica de Potência : Projetos de Fontes Chaveadas / Ivo Barbi. – 2. ed. – Florianópolis : Ed. do autor, 2007.

BASTOS, João Pedro Assumpção. Eletromagnetismo para engenharia : estática e quase estática / João Pedro Assumpção Bastos. – Florianópolis : Ed. da UFSC, 2004.

MALVINO, Albert Paul. Eletrônica : Volume 1 / Albert Paul Malvino. Tradução: Romeu Abdo. Revisão Técnica: Antônio Pertence Júnior. – 4ª ed. São Paulo : Pearson Education do Brasil, 1997.

<http://www.mspc.eng.br/termo/trmc1.asp>. Acesso em 20/03/2009, 10h00min.

[http://www.labspost.ufsc.br/Jacqueline\\_Rolim/Materiais\\_isolantes-cap4a.doc](http://www.labspost.ufsc.br/Jacqueline_Rolim/Materiais_isolantes-cap4a.doc) (material para apresentação em seminários). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Acesso em 10/11/2008, 08h00min.

[www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG), Dispositivos Optoeletrônicos. Acesso em 05/05/2008, 08h30min.

<http://www2.eletronica.org/hack-s-dicas/regulador-lm7805/>, Reguladores de Tensão Linear. Acesso em 11/06/2008, 16h40min.

[http://www.lsi.usp.br/~roseli/www/psi2307\\_2004-Teoria-7-AmpOp.pdf](http://www.lsi.usp.br/~roseli/www/psi2307_2004-Teoria-7-AmpOp.pdf), Amplificadores Operacionais. Acesso em 10/12/2008 15h05min.

MARQUES, Jeferson Luiz Brun e BRAZ, Gustavo Prado. Eletrônica Aplicada – EEL 7300. Florianópolis : Ed. do autor setembro de 2002.

<http://inf.unisul.br/~anderson/Comparadores.pdf>. Apostila Sobre Comparadores. Acesso em 15/11/2008, 07h30min.

[http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/208/62529\\_DS.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/208/62529_DS.pdf). Acesso em 15/11/2008, 08h17min.

[http://www.mspc.eng.br/fldetc/temperat\\_120.shtml](http://www.mspc.eng.br/fldetc/temperat_120.shtml). Sensores de Temperatura. Acesso em 13/09/2008, 11h05min.

<http://www.ussensor.com>. Sensores de Temperatura. Acesso em 13/09/2008, 11h30min.