

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CÂMPUS DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Lucas Prates Fiuza

CONSTRUÇÃO DE UM FORNO ELÉTRICO INDUTIVO DE BAIXO CUSTO PARA
AQUECIMENTO E FUSÃO DE METAIS

Divinópolis-MG, 2013.

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CÂMPUS DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Lucas Prates Fiuza

CONSTRUÇÃO DE UM FORNO ELÉTRICO INDUTIVO DE BAIXO CUSTO PARA
AQUECIMENTO E FUSÃO DE METAIS

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Eixo de formação: Mecânica e Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos de Oliveira

Divinópolis-MG, 2013.

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CÂMPUS DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Monografia intitulada “Construção de um forno elétrico indutivo de baixo custo para aquecimento e fusão de metais” de autoria do graduando Lucas Prates Fiuza, aprovada pela banca constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. João Carlos de Oliveira - CEFET-MG / Câmpus Divinópolis -
Orientador

Prof. Dr. Cícero Lefort Borges - CEFET-MG / Câmpus Divinópolis

Prof. Dr. Renato de Souza Dâmaso - CEFET-MG / Câmpus Divinópolis

Prof. Msc. Josias Gomes Ribeiro Filho - CEFET-MG / Câmpus Divinópolis

Prof. Dr. Valter Júnior de Souza Leite
Coordenador do Curso de Engenharia Mecatrônica
CEFET-MG / Câmpus Divinópolis

Divinópolis-MG, Agosto de 2013.

Agradecimentos

Agradeço à minha família, por terem investido e acreditado em mim por toda minha vida, em especial minha mãe, que mesmo não estando mais presente me deixou ensinamentos que me dão forças pra superar obstáculos;

Aos professores de toda a vida, com destaque aos professores da graduação, por me mostrar um mundo novo, transmitir conhecimentos e experiências de vida, e por contribuírem com o meu crescimento pessoal e profissional;

Ao meu orientador de TCC, prof. Dr. João Carlos de Oliveira, pelo apoio e pela paciência;

Ao Engenheiro Eduardo Moreira, pela ajuda e esclarecimento de muitas dúvidas durante a execução do projeto;

Aos colegas de curso e colegas de república, pelo companheirismo;

Aos demais que contribuíram nesses mais de cinco anos de Engenharia.

Resumo

O presente Trabalho de Conclusão de Curso trata da construção de um forno elétrico à indução de pequenas dimensões para aquecimento e fundição de metais. O foco deste trabalho consiste no uso de uma tecnologia de baixo custo e de fácil acesso. Mesmo assim, trata-se de um projeto de relativa complexidade, que envolve áreas da Engenharia Mecatrônica como a mecânica estrutural, na montagem da planta, e a eletrônica de potência na montagem dos circuitos alimentadores do forno.

Palavras-chave: Forno à indução, circuito ressonante, chaveamento, IGBT.

Sumário

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrônimos e Notação	xv
Introdução	1
1.1 Relevância.....	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Metodologia	3
1.5 Infra-estrutura	3
1.6 Caracterização da área.....	4
1.7 Organização deste trabalho.....	4
Fundamentação Teórica	6
2.1 Fundição.....	6
2.2 Aquecimento por Indução	7
2.3 Inversores de Frequência.....	9
2.4 Conversores Ressonantes.....	11
Desenvolvimento Mecânico e Estrutural	13
3.1 Projeto e montagem da estrutura	13
3.2 Teste de isolamento da temperatura.....	17
Desenvolvimento Eletrônico.....	19
4.1 Cálculos Preliminares.....	19
4.2 Simulação de um Circuito Ressonante	20
4.3 Esquema elétrico geral	22
4.4 Escolha dos componentes adequados.....	23
4.5 <i>Driver</i> de meia ponte	24
4.6 Montagem do circuito de acionamento.....	24
4.7 Montagem do circuito de Potência.....	27
4.8 Construção dos indutores.....	29
4.9 Obtenção do circuito ressonante	31
4.10 Retificador de Potência.....	31
Experimentos.....	33
5.1 Medição dos sinais no circuito de acionamento	33
5.2 Medição dos sinais no circuito de potência.....	36
5.3 Outros testes realizados	38
Conclusão e Propostas de Continuidade	41
6.1 Resultados	41
6.2 Percepções	42

6.3	Propostas de continuidade	42
-----	---------------------------------	----

Lista de Figuras

2.1 - Fundição com molde de areia.....	5
2.2 - Representação em corte do indutor com o crisol refratário.....	6
2.3 - Criação de campo magnético para aquecimento indutivo.....	8
2.4 - Exemplo de um inversor de frequência.....	9
2.5 - Limites de operação de componentes semicondutores de potência.....	10
3.1 - Primeiro projeto da planta do projeto.....	13
3.2 - Vista frontal e superior do projeto inicial da planta.....	14
3.3 - Planta construída, em sua versão final.....	14
3.4 - Cadinho de ferro e cadinho refratário.....	15
3.5 - Cadinho auxiliar com bobina de aquecimento.....	16
3.6 - Detalhe da articulação do suporte central.....	16
3.7 - Detalhe do suporte para circuitos eletrônicos.....	17
3.8 - Teste de isolamento da temperatura.....	18
4.1 - Circuito ressonante analisado.....	21
4.2 - Tensão no ramo ressonante.....	21
4.3 - Corrente no ramo ressonante.....	22
4.4 - Esquema elétrico geral do projeto.....	22
4.5 - Diagrama elétrico do circuito de acionamento.....	25
4.6 - Separação da alimentação pelas três fontes.....	25
4.7 - Layout da placa de acionamento.....	26
4.8 - Circuito <i>snubber</i> utilizado.....	26
4.9 - Diagrama elétrico da placa de potência.....	27
4.10 - Layout da placa de potência.....	27
4.11 - Placa de potência.....	28
4.12 - Capacitor de retificação.....	29
4.13 - Indutor de casamento de impedância.....	29
4.14 - Circuito RL montado.....	30
4.15 - Capacitores de retificação com os fios conectados ao circuito.....	32
5.1 - Sinal obtido do gerador de PWM.....	33
5.2 - Sinal corrigido com o buffer CD4050.....	34
5.3 - Sinal obtido na saída do opto-acoplador.....	35
5.4 - Sinal amplificado pelo arranjo totem pole BC337 e BC327.....	35
5.5 - Sinal disponível no gate do IGBT.....	36
5.6 - Tensão medida entre o coletor e o emissor do IGBT.....	37
5.7 - Tensão na bobina de aquecimento.....	38
5.8 - Tensão medida com circuito LC série de capacitância diferente da ideal.....	38

5.9 - Tensão medida retirando o circuito LC série.....	39
5.10 - Atenuação de ruído com a utilização de um circuito <i>snubber</i>	40

Lista de Tabelas

3.1 - Dados das peças utilizadas na planta.....	15
---	----

Lista de Acrônimos e Notação

V: Volt, unidade de tensão elétrica

A: Ampère, unidade de corrente elétrica

F: Farad, unidade de capacitância

H: Henry, unidade de indutância

°C: Grau Celsius, unidade de temperatura

K: Kelvin, unidade de temperatura

m³: Metro cúbico, unidade de volume

mm²: Milímetro quadrado, unidade de área

mm: Milímetro, unidade de comprimento

kg: Quilograma, unidade de massa

": Polegada, unidade de comprimento

Hz: Hertz, unidade de frequência

s: Segundo, unidade de tempo

DC ou CC: Corrente contínua

AC: Corrente alternada

PWM: Pulse Width Modulation, ou Modulação por Largura de Pulso

IGBT: Insulated-gate bipolar transistor, ou Transistor bipolar de porta isolada

MOSFET - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, ou Transistor de Efeito de Campo Metal - Óxido - Semicondutor

Introdução

1.1 Relevância

Em várias disciplinas da graduação de Engenharia Mecatrônica, os alunos se deparam com diversas atividades práticas que envolvem alguma montagem mecânica a ser feita. Há, portanto, a necessidade de fabricação de peças diversas, e os laboratórios do CEFET-MG nem sempre oferecem suporte suficiente aos alunos nesse aspecto. Portanto, surge a questão: Como suprir a demanda por tais processos de fabricação?

A fundição de peças é um processo simples, utilizado para obter peças de geometria com relativa complexidade, difíceis de se obter por processos de fabricação manuais. Um forno à indução pode ser montado a um custo bem acessível, utiliza energia limpa e praticamente não gera resíduos, sendo assim uma ótima opção para fabricação de peças.

Além da fundição, sistemas de aquecimento indutivos podem ser utilizados para outros processos de fabricação, como forjamento, extrusão, e também para tratamentos térmicos e termoquímicos. Segundo a empresa EFD, "a principal vantagem do aquecimento indutivo é a velocidade. Peças podem ser temperadas em minutos ou mesmo em segundos. Alto-fornos típicos levam horas. Também facilita o controle e qualidade da peças, e estações integradas de têmperas necessitam de pouco espaço em uma indústria" (EFD Induction, 2011).

Existem várias formas de se otimizar um processo de aquecimento indutivo, como por exemplo adaptar a parte estrutural de acordo com as necessidades, ou substituir os circuitos eletrônicos para diminuir o desperdício (e os gastos) com energia elétrica. Há também a possibilidade de instalação de sensores de temperatura e implementação de controle, automático ou em tempo real, para aumentar a produtividade e a qualidade das manufaturas e melhorar a relação custo/benefício das mesmas. Tudo isso pode colaborar para o desenvolvimento de

alternativas para baratear a montagem da planta, não se esquecendo da segurança dos operadores.

Um outro motivo relevante para se desenvolver um trabalho desse tipo é que uma planta de um forno indutivo proporciona à uma instituição de ensino superior novas possibilidades na fabricação e tratamento térmico de peças, e também na utilização como planta didática, para as disciplinas dos eixos de Materiais, Elétrica e Controle.

1.2 Motivação

Durante o curso de Engenharia Mecatrônica são vistas algumas disciplinas que estudam materiais, desde sua composição até os processos de fabricação de peças. Em uma delas, Tecnologia de Fabricação Mecânica, foram estudados, em 2011/1, processos de usinagem, fundição e tratamento térmico de peças metálicas. A partir dela surgiu a curiosidade pelo processo de aquecimento indutivo, por parecer fácil de ser implementado e por se tratar de um processo mais limpo. Junto a esta disciplina, foram estudadas nas disciplinas de Circuitos Elétricos e Eletrônica algumas formas de projetar circuitos que tornem possível o aquecimento indutivo. Após tudo isso, bastou uma breve busca na internet por vídeos caseiros de aquecimento indutivo para confirmar o objeto de estudo deste trabalho: a construção de um forno à indução de baixo custo.

Nesta pesquisa foram descobertos alguns projetos similares desenvolvidos por terceiros, como o projeto do Engenheiro Eduardo Moreira [8], que foi utilizado como referência inicial para o desenvolvimento deste trabalho.

Os diferenciais deste projeto estão na "acessibilidade" do mesmo, com a utilização de técnicas e componentes de baixo custo, e na possibilidade de aplicação de controle em tempo real via computador, algo incomum em fornos indutivos destas dimensões.

1.3 Objetivos

O objetivo fundamental do trabalho é desenvolver uma planta de um sistema de aquecimento indutivo, com possibilidade de controle em tempo real de temperatura.

1.4 Metodologia

O desenvolvimento do projeto foi inicialmente idealizado em etapas, descritas a seguir:

- Revisão bibliográfica;
- Cálculos estimativos acerca da potência e capacidade do forno;
- Simulações em computador dos circuitos elétricos de acionamento e de potência;
- Projeto e construção da estrutura da planta;
- Montagem dos circuitos e confecção de placas de circuitos impressos;
- Instalação do aparato elétrico no arranjo mecânico da planta;
- Análise do funcionamento do sistema e realização de ajustes;
- Testes finais.

1.5 Infra-estrutura

Toda a infra-estrutura necessária (espaço físico e equipamentos) para o desenvolvimento do trabalho encontrou-se disponível no CEFET-MG câmpus Divinópolis, como os laboratórios de Circuitos Elétricos e Eletrônicos (319), Sinais e Sistemas (315) e Galpão de Mecânica (517). O material utilizado, como componentes eletrônicos e matéria prima para a construção da estrutura foi em grande parte obtido por iniciativa e recursos próprios.

1.6 Caracterização da área

Existe hoje no mercado vários tipos de fornos industriais indutivos, de grande e médio porte, em sua maioria menores que os alto-fornos. Utilizam técnicas de indução convencional, indução por condutores aquecidos, dentre outras. Todavia, na região Centro-oeste mineira predominam os alto-fornos na indústria siderúrgica, seja pelo seu porte maior ou por se tratar de instalações não muito recentes, quando fornos indutivos eram menos comuns no mercado.

A Eletrônica de Potência utilizada no trabalho já é bastante difundida no mundo. A maioria dos componentes já são utilizados há alguns anos, e há suporte (diversas pesquisas já foram feitas) para praticamente todo tipo de problema que possa ocorrer. Atualmente, a indústria de semicondutores têm avançado rapidamente, possibilitando projetar circuitos para fornos indutivos cada vez mais eficientes e acessíveis.

1.7 Organização deste trabalho

O trabalho é dividido em seis capítulos. Neste, são apresentados os objetivos do trabalho proposto e a motivação para desenvolvê-lo. São apresentados ainda a metodologia adotada, o escopo do trabalho e a caracterização da área na região e no país.

No Capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica dos assuntos relevantes, com o objetivo de agregar uma maior quantidade de informações e facilitar o entendimento do trabalho.

O Capítulo 3 traz detalhadamente como foi o desenvolvimento estrutural do protótipo, bem como os processos de fabricação e montagem utilizados.

No Capítulo 4 é apresentado todo o desenvolvimento eletrônico do forno, as estratégias adotadas, os componentes utilizados e a montagem das placas de circuitos utilizados.

Os experimentos realizados foram descritos e analisados no Capítulo 5.

Finalmente, o Capítulo 6 trata das análises dos resultados finais, conclusões do trabalho e proposições para futuros estudos.

Fundamentação Teórica

2.1 Fundição

Na metalurgia, a fundição é o processo de vaziar metal líquido em um molde, que contém uma cavidade com a forma desejada, e depois permitir que resfrie e solidifique. A parte solidificada é também conhecida como peça fundida, que é ejetada do molde ou tem o molde quebrado para completar o processo.

A fundição é mais frequentemente usada para fazer peças complexas que seriam difíceis (ou mais caras) de serem confeccionadas por outros métodos. Os processos de fundição são conhecidos há milhares de anos, e amplamente utilizados em esculturas, jóias em metais preciosos, armas e ferramentas. As técnicas tradicionais de fundição incluem a fundição por cera perdida, fundição por espuma perdida, fundição em coquilha e fundição em areia. As técnicas ainda são divididas pelo material do molde, tais como areia ou metal, e método de vazamento, como por gravidade, a vácuo ou a baixa pressão. A Figura 2.1 mostra um exemplo de fundição com molde de areia.



Fig. 2.1 - Fundição com molde de areia.

Geralmente são fundidos metais e alguns materiais sintéticos, a exemplos de plásticos e polímeros. O processo de fusão se dá pelo aquecimento da matéria prima até atingir seu ponto de liquefação. Após derretida será escoada ou injetada, numa cavidade normalmente denominada molde. Uma vez resfriada, a matéria prima solidifica-se, tomando a forma em *positivo*. Após fundido e retirado do molde, o componente vai para a usinagem e tratamento térmico (se for o caso).

Dentre as possíveis formas de se fundir materiais, pode-se destacar o forno elétrico à indução, considerado um processo 'limpo' por praticamente não gerar poluentes. Além disso, o aquecimento por indução diminui os problemas de qualidade, aumenta a repetibilidade do processo e possibilita o acionamento ou desligamento imediato do sistema. A implementação de controle com realimentação possibilita ainda um controle preciso da temperatura, inclusive o monitoramento de diferentes partes da peça simultaneamente [2].

2.2 Aquecimento por Indução

Para este Trabalho de Conclusão de Curso foi escolhido um forno à indução do tipo com crisol (ou cadinho), composto por um crisol cilíndrico refratário, destinado a conter o metal a ser aquecido, e por uma bobina, também cilíndrica, externa e co-axial com o mesmo, pela qual será percorrida uma corrente alternada. A Figura 2.2 mostra em corte frontal este arranjo proposto, onde D é o diâmetro do crisol refratário, D_i é o diâmetro interno da bobina de aquecimento e h é a altura em comum entre os dois elementos.

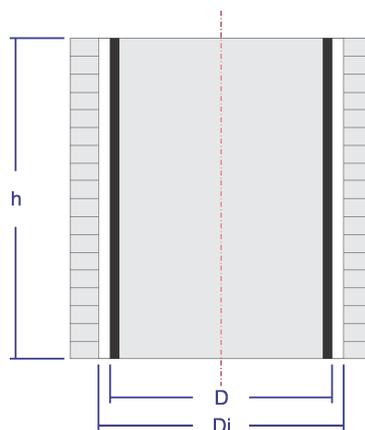


Fig. 2.2 - Representação em corte do indutor com o crisol refratário.

Neste esquema, um circuito gerador envia corrente alternada para a bobina. O conjunto atua como um transformador, sendo a bobina o primário e o condutor contido no crisol o secundário, em curto-circuito. Assim, toda corrente elétrica aplicada na bobina irá induzir uma corrente no secundário. Conseqüentemente, a corrente induzida determinará o aquecimento por efeito Joule [6]. Todavia, o calor produzido por esta corrente elétrica que surge não é capaz de elevar a temperatura a níveis muito altos. O aquecimento por indução se mostra mais eficiente com a utilização do campo magnético criado.

Quando uma corrente elétrica alternada é aplicada à bobina, de acordo com a Lei de Faraday, um campo magnético alternado é criado em seu interior. Se o secundário for um material ferromagnético, a constante troca de polaridade do campo magnético irá agitar as partículas com grande intensidade, provocando assim o aquecimento do material.

Para aproveitar o efeito do campo magnético alternado, e trabalhar com aquecimento de outros materiais, utiliza-se um crisol ferroso, que aquecerá o material desejado, inserido nele, por condução térmica. A Figura 2.3 esquematiza o funcionamento do aquecimento indutivo, com a criação de um campo magnético. I_g é a corrente na bobina em um dado instante, I_f é a corrente elétrica induzida no secundário, e ϕ_m é o campo magnético resultante [3].

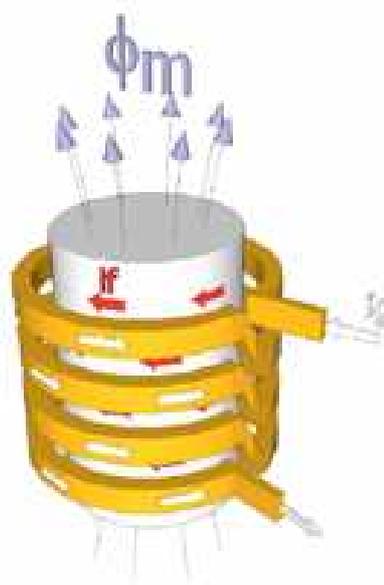


Fig. 2.3 - Criação de campo magnético para aquecimento indutivo.

2.3 Inversores de Frequência

Os fornos à indução são equipados com um circuito elétrico capaz de fornecer à bobina de aquecimento corrente alternada com características específicas. Uma das estratégias utilizadas é usar um circuito LC e alimentá-lo com o auxílio de um inversor de frequência.

Um inversor de frequência é um dispositivo capaz de gerar tensão (monofásica ou trifásica) e frequências ajustáveis, a partir da tensão da rede. A **Figura 2.4** mostra um exemplo de inversor de frequência monofásico, alimentando um motor. Os diodos retificadores, situados no circuito de entrada do inversor, retificam a tensão da rede de entrada. A tensão DC resultante é filtrada por um capacitor e utilizada como entrada para a seção inversora.

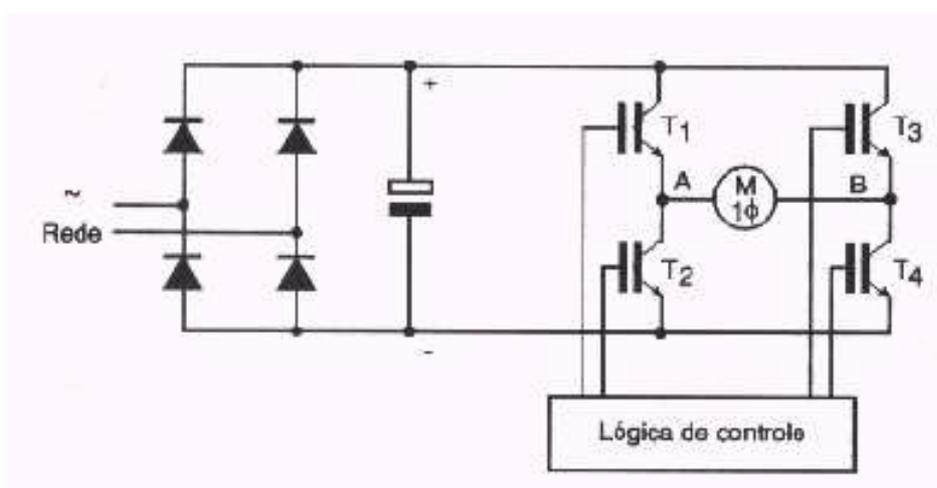


Fig. 2.4 - Exemplo de um inversor de frequência.

Na seção inversora, a tensão retificada DC é novamente convertida em alternada. Os transistores, através de uma lógica de controle, chaveiam várias vezes por ciclo, gerando um trem de pulsos com largura variável senoidalmente (PWM). Esta saída de tensão pulsada, sendo aplicada em um motor (carga indutiva), irá gerar uma forma de onda de corrente bem próxima da senoidal através do enrolamento do motor. Ao inverter-se o sentido de corrente, a tensão na carga (motor) passa a ser alternada, mesmo estando conectada a uma fonte DC. Caso seja aumentada a frequência de chaveamento desses transistores, também aumentaremos a velocidade de rotação do motor, e vice-versa [7].

Para realizar o chaveamento, uma boa opção de transistor é o IGBT, pois ele oferece a grande facilidade de controlar potências elevadas utilizando tensão para o disparo. Além de apresentar esta facilidade de acionamento (igual a um

MOSFET), possui pequenas perdas em condução, assim como os TBP (Transistores Bipolares de Potência). Uma desvantagem é a baixa velocidade de comutação, se comparado a um MOSFET, devida às capacitâncias de porta (*Gate*) que aumentam com a intensidade de corrente que deve ser controlada. No entanto, nos últimos anos os IGBTs têm apresentado maiores velocidades de comutação, permitindo a sua operação em frequências de dezenas de kHz, nos componentes para correntes na faixa de dezenas e até centenas de Ampères. O IGBT é um componente que se torna cada vez mais recomendado para comutação de carga de alta corrente em regime de alta velocidade [4].

O gráfico da Figura 2.5 apresenta uma comparação entre os principais dispositivos semicondutores de potência quanto às suas características de tensão, corrente e frequência de operação. Pode ser observado que os IGBTs possuem uma capacidade de suportar maiores tensões e podem operar em mais altas frequências que os transistores bipolares de potência, além de suportarem maiores tensões e correntes que os MOSFETs de potência [5].

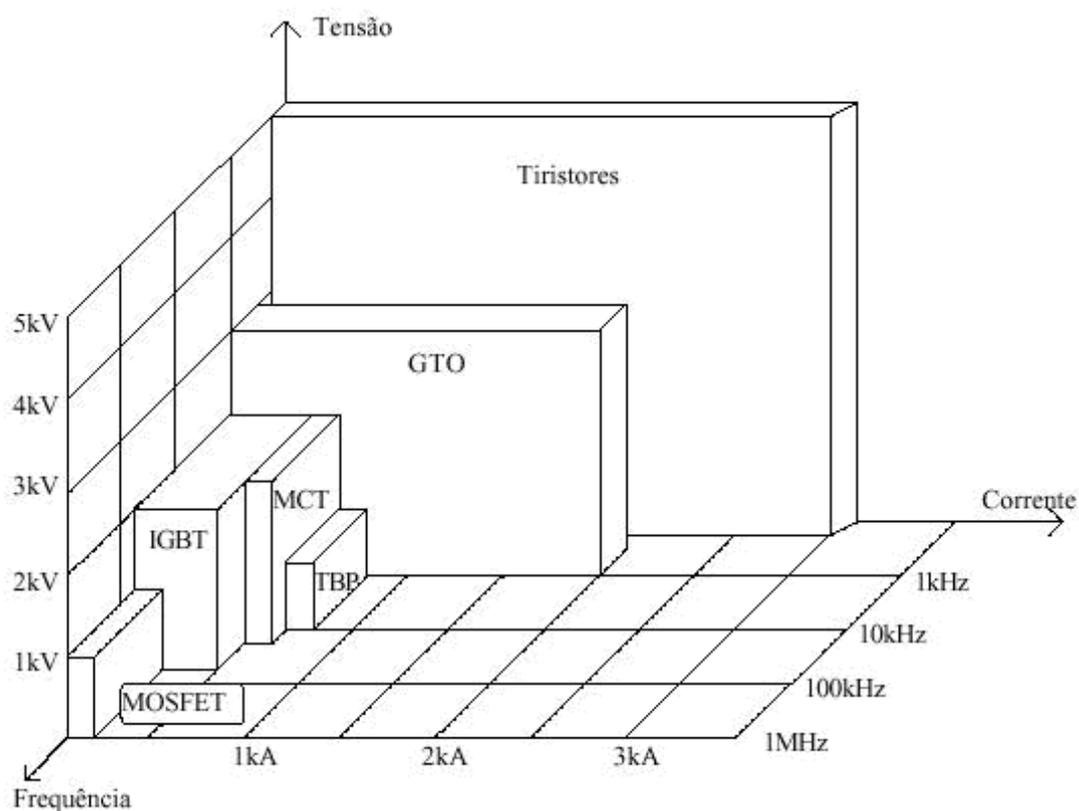


Fig. 2.5 - Limites de operação de componentes semicondutores de potência.

2.4 Conversores Ressonantes

Nos circuitos de chaveamento ressonante, a comutação ocorre quando a tensão e/ou corrente é zero, evitando, assim, as transições simultâneas dos dois parâmetros, eliminando as perdas por chaveamento. O inversor ressonante em série é uma aplicação de conversores ressonantes. Nele, um indutor e um capacitor são ligados em série com um resistor de carga. As chaves produzem uma tensão em onda quadrada e a combinação LC é escolhida de modo que a frequência ressonante seja a mesma da frequência de chaveamento.

As amplitudes da tensão de entrada e de saída são relacionadas por:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + ((\omega L / R) - (1 / \omega RC))^2}} \quad (1)$$

Onde L, R e C são a indutância, resistência e capacitância do circuito. A frequência, em radianos por segundo, é simbolizada por ω , a tensão de entrada é V_i e a tensão de saída é V_o . A ressonância ocorre na frequência.

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Na ressonância, as impedâncias da indutância e da capacitância se cancelam, e a carga aparece como uma resistência. Se a ponte na saída é uma onda quadrada de frequência f_0 , a combinação LC age como um filtro, deixando passar a frequência fundamental e atenuando as harmônicas. Se a atenuação for eficiente, a tensão no resistor de carga é essencialmente uma senoide na frequência fundamental da onda quadrada.

Se a frequência da tensão na carga não for crítica, a amplitude da frequência fundamental pode ser controlada pelo deslocamento da frequência de chaveamento fora da ressonância. A potência absorvida pelo resistor de carga é então controlada pela frequência de chaveamento. O aquecimento por indução é uma aplicação. Frequências mais altas de chaveamento deslocam as harmônicas de onda quadrada para cima, aumentando a eficiência dos filtros para removê-las. Deslocando a frequência abaixo da ressonância, as harmônicas mudam, em particular a terceira harmônica, mais próximo da ressonância e aumenta suas amplitudes na saída [4].

Desenvolvimento Mecânico e Estrutural

3.1 Projeto e montagem da estrutura

O projeto mecânico iniciou-se a partir das definições de capacidade máxima de fundição do forno e temperatura de operação. Com isso, foi desenvolvido o primeiro projeto da planta, que consistia em uma plataforma de madeira (a), dois suportes para mancal (b), dois mancais (c), um suporte central para o cadinho (d), uma proteção refratária (e), um cadinho de ferro (f), um suporte para circuitos eletrônicos (g) e uma manivela (h), como mostra a Figura 3.1.

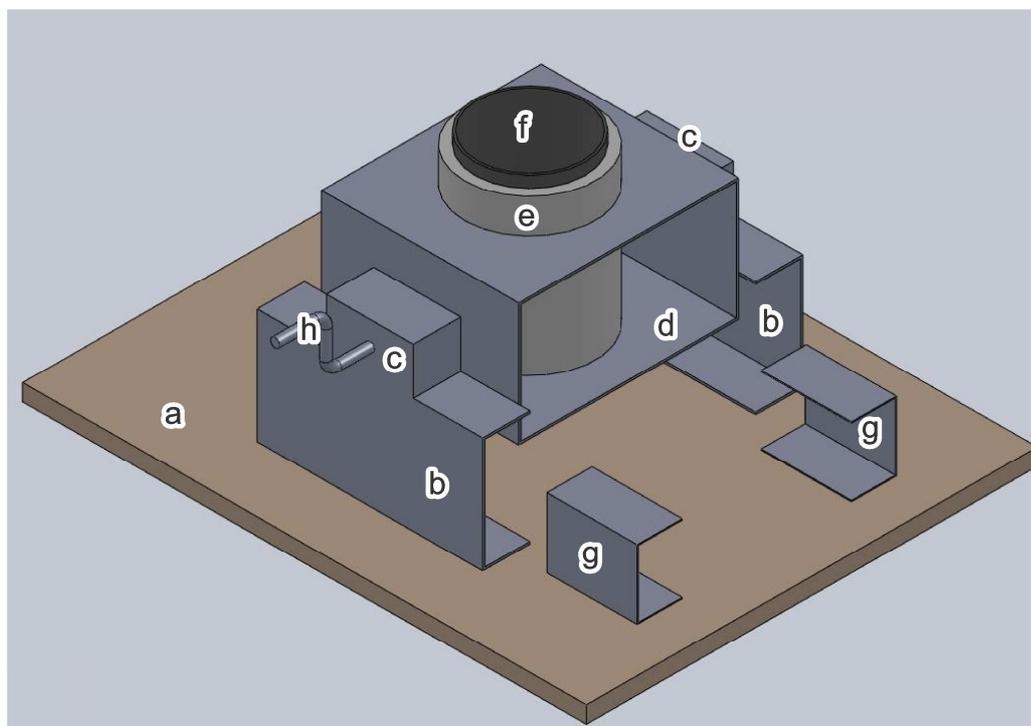


Fig. 3.1 - Primeiro projeto da planta do forno.

A Figura 3.2 mostra as vistas frontal e superior da planta.

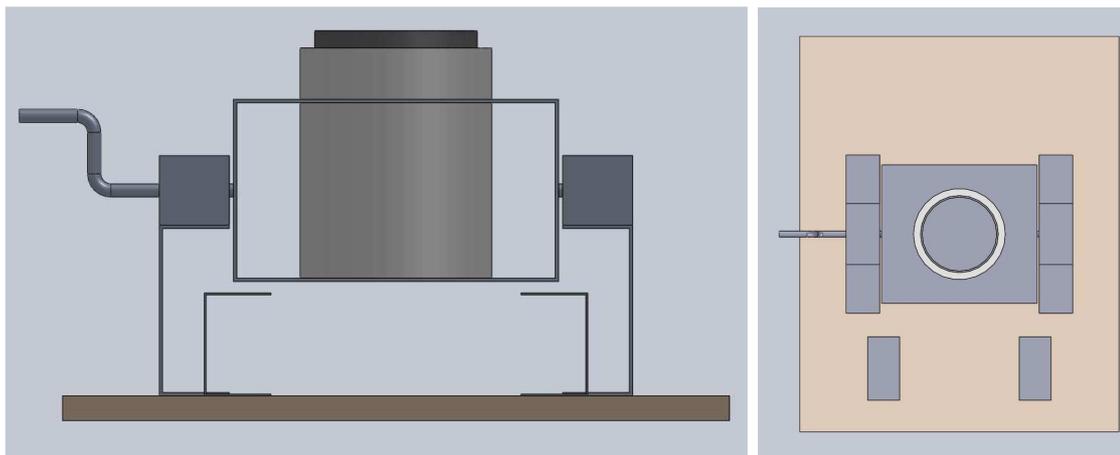


Fig. 3.2 - Vista frontal e superior do projeto inicial da planta.

Após análise detalhada de cada parte, o projeto estrutural foi atualizado algumas vezes, mas sempre mantendo sua estrutura original. A etapa de usinagem e montagem contou com a ajuda do torneiro mecânico Adriano Rogério, que deu dicas para simplificar a montagem e usinou parte das peças utilizadas. As peças foram obtidas através de torneamentos, fresamentos, cortes, dobras e furações. Algumas pequenas modificações foram feitas durante a usinagem, chegando-se à versão final da planta, mostrada na Figura 3.3.

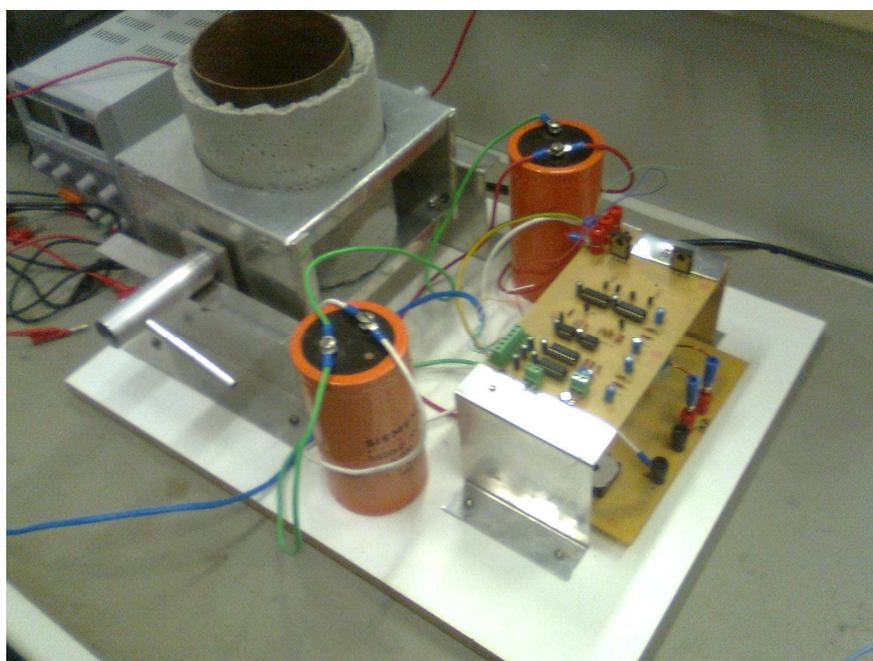


Fig. 3.3 – Planta construída, em sua versão final.

Como pode ser observado na Figura 3.3, a planta foi construída sobre uma plataforma de madeira, com um cadinho de ferro, um cadinho refratário de cimento e todas as demais peças de alumínio. A fixação das peças se deu através de

encaixes por interferência, rebites, parafusos e porcas. As dimensões das peças e os materiais utilizados são apresentadas na Tabela 3.1.

Tab. 3.1 - Dados das peças utilizadas na planta.

Dimensões das peças do forno		
Peça	Material	Dimensões
Eixo 1	Tubo Alumínio ϕ 1''	70mm
Eixo 2	Tubo Alumínio ϕ 1''	105mm
Manivela	Tubo Alumínio ϕ 8mm	76mm
Suportes para Mancal	Chapa Alumínio #2mm	103mm x 200mm x 42mm
Suporte central	Chapa Alumínio #2mm	195mm x 175mm x 110mm
Base	Madeira MDF #15mm	400mm x 500mm
Suportes para placas eletrônicas	Chapa Alumínio #1mm	107mm x 102mm x 62mm
Mancais	Barra chata Alumínio #5mm	77mm x 42mm
Cadinho principal	Tubo Ferro ϕ 115mm	150mm
Cadinho auxiliar	Tubo Ferro ϕ 2''	150mm
Refratário	Cimento refratário C70	#27mm ϕ 145mm x 120mm
Bobina com 15 espiras	Tubo de Cobre ϕ 1/4''	ϕ 105mm x 170mm

O cadinho refratário foi construído com a utilização de canos de PVC como fôrma. O cadinho de ferro foi fabricado com um tubo de ferro soldado a uma base circular também de ferro. A Figura 3.4 ilustra separadamente estes dois elementos.



Fig. 3.4 – Cadinho de ferro e cadinho refratário.

Foi construído também um cadinho auxiliar, para a realização de outros testes. Com ele, a bobina de aquecimento pode ter diâmetro menor, aumentando a densidade de campo magnético e assim aumentando a eficiência do aquecimento. Para a bobina foram utilizados no total cinco metros de comprimento de tubo de cobre. A Figura 3.5 mostra o cadinho auxiliar com a bobina de diâmetro menor.



Fig. 3.5 – Cadinho auxiliar com bobina de aquecimento.

A Figura 3.6 retrata o detalhamento da articulação do suporte central. Ele é fixado aos mancais da estrutura através de um eixo e um eixo-manivela, possibilitando assim realizar o escoamento do material fundido de uma forma prática. Há uma trava de segurança entre o suporte para mancal e suporte para cadinho, para impedir o movimento do último quando o forno estiver em funcionamento. A manivela possibilita a movimentação do suporte para cadinho pelo usuário, conforme a necessidade.

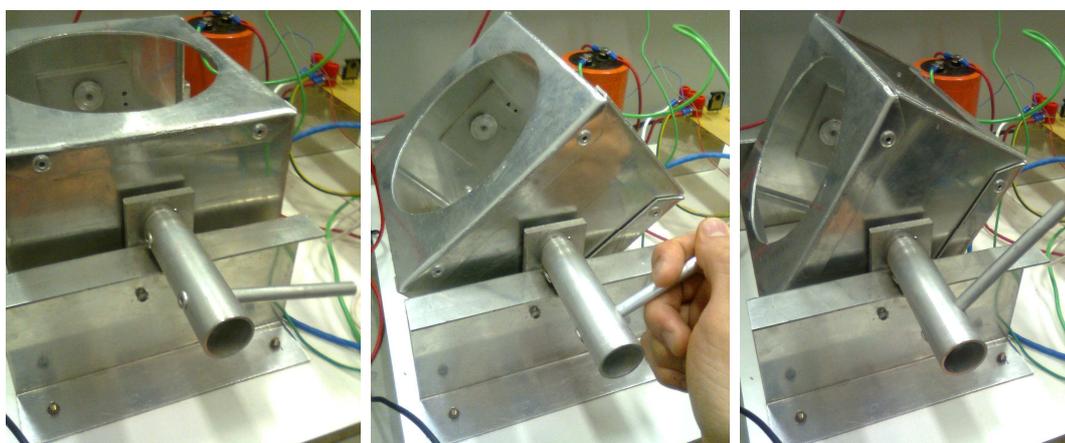


Fig. 3.6 – Detalhe da articulação do suporte central.

O suporte para fixação das placas eletrônicas possibilitará adicionar mais circuitos acima dos atuais, sem necessitar de mais espaço na base da planta. Para

isso, basta parafusar mais suportes similares, em cima dos atuais, como pode ser visto na Figura 3.7.

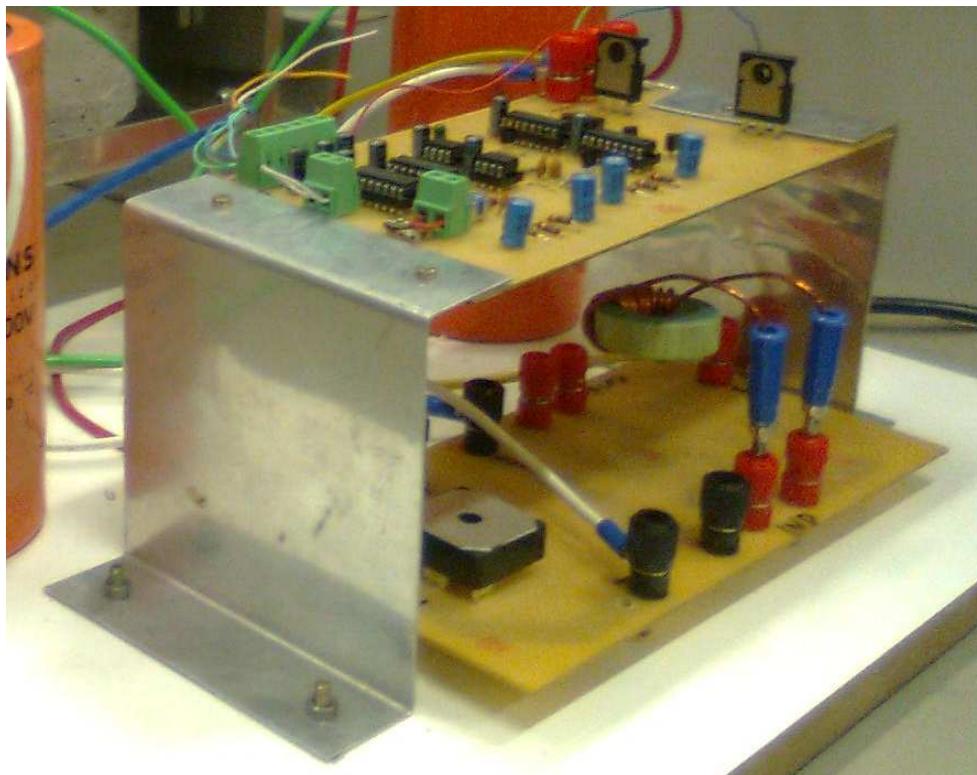


Fig. 3.7 – Detalhe do suporte para circuitos eletrônicos.

3.2 Teste de isolamento da temperatura

Foram feitos testes de isolamento de temperatura do cadinho refratário, com o intuito de verificar a eficiência da proteção contra altas temperaturas. Foi colocado um cadinho de porcelana com álcool no interior do cadinho de ferro, que por sua vez foi colocado dentro do cadinho refratário. Após fazer ignição do álcool, e com a utilização de um pirômetro, foram registradas as temperaturas no interior e na borda do cadinho de ferro, e na superfície externa do cadinho refratário. O gráfico da Figura 3.8 mostra a evolução das temperaturas medidas. Houve aquecimento por 600 segundos, em seguida foi observado o resfriamento nos 600 segundos seguintes. Constatou-se que a isolamento de altas temperaturas mostrou-se eficiente, já que a previsão é de que o funcionamento do forno não se estenda por períodos longos.

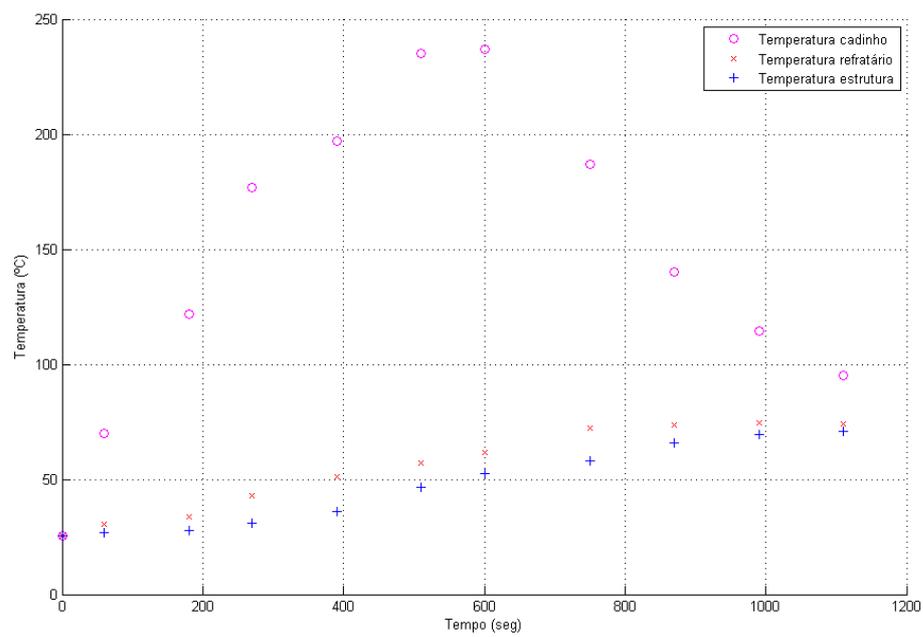


Fig. 3.8 – Teste de isolamento da temperatura.

Desenvolvimento Eletrônico

4.1 Cálculos Preliminares

A primeira etapa do desenvolvimento eletrônico contou com ajuda do aluno Leonardo Vieira, então monitor da disciplina de Termodinâmica. Como o objetivo principal era fazer com que o forno fosse capaz de fundir alumínio, foram feitos cálculos para determinar a energia necessária para isso. Foram determinadas também tensões e correntes no circuito, e analisada a viabilidade da obtenção destes valores.

Como existem várias ligas de alumínio comerciais, de composições (e propriedades) ligeiramente diferentes, os cálculos foram feitos para alumínio puro. Foram considerados os seguintes dados:

Ponto de fusão:	660 °C = 933 K
Densidade:	2700 kg/m ³
Calor específico:	910 KJ/Kg.K
Calor latente de fusão:	395 KJ/Kg
Temperatura ambiente:	25 °C = 298 K

O calor total necessário para fundir o alumínio é a soma do calor utilizado até atingir a temperatura de fusão com o calor necessário à mudança de fase do alumínio. Este valor é diretamente proporcional à massa de metal que será fundido.

$$\begin{aligned} Q &= 910 \cdot m \cdot (933 - 298) + m \cdot (394 \cdot 10^3) \\ Q &= 971,85 \cdot m [KJ] \end{aligned} \tag{3}$$

A potência para fundir depende também do tempo de fusão estipulado. Foram escolhidos t=300 segundos e m=1kg.

$$\begin{aligned} P &= 971,85 \cdot m / t \\ P &= 3,240 [KW] \end{aligned} \quad (4)$$

Para considerar perdas de calor do forno, adaptação a diferentes ligas de alumínio e outros fatores, foi adicionada uma margem de segurança de 25%, obtendo $P=4,050$ KW. A corrente que circulará na bobina principal é obtida dividindo a potência pela tensão. Usando tensão de 220V, a corrente será:

$$\begin{aligned} I &= 4050 / 220 \\ I &= 18,41 [A] \end{aligned} \quad (5)$$

Estes parâmetros foram utilizados como referência inicial. Constatou-se que atingir esta potência e corrente com os recursos disponíveis não seria possível, então optou-se pelo caminho inverso: projetar um circuito que opere em até 10 Ampères, fazendo com que o forno apresente consumo compatível com eletrodomésticos comuns, e assim não necessitando de instalações elétricas especiais. A tensão de operação também foi determinada inicialmente em 220 Volts monofásica, pois após a retificação, e considerando uma margem de segurança, alguns componentes receberão picos de até cerca de 200 Volts. Componentes e condutores que operam com estas tensões são fáceis de se adquirir, ao contrário de componentes para maiores tensões.

Desta forma, o forno construído apresentaria um funcionamento razoável, em questão de consumo, e atingiria uma temperatura mais baixa que a temperatura de fusão do alumínio. Contudo, seria possível empregá-lo em processos de tratamento térmico e outros processos a baixas temperaturas, além da possibilidade de fusão de outros materiais, como alguns polímeros e ligas metálicas de baixo ponto de fusão.

4.2 Simulação de um Circuito Ressonante

A impedância de circuitos RLC série e paralelo têm um comportamento complicado em relação a frequência. Existem valores de frequência que fazem com que a parte reativa complexa se anule, ficando puramente resistiva a impedância, para estas frequências é dito que o circuito está em ressonância [4].

As primeiras simulações feitas consistiram basicamente em um circuito ressonante de onda completa, com alimentação trifásica e retificação de ponte completa. Foi utilizado o *software PSpice* para estas simulações, e a Figura 4.1 mostra a versão do circuito que foi simulado. O circuito de acionamento dos interruptores MOSFET foi substituído por fontes de pulso complementares, operando na frequência de ressonância da carga RLC série.

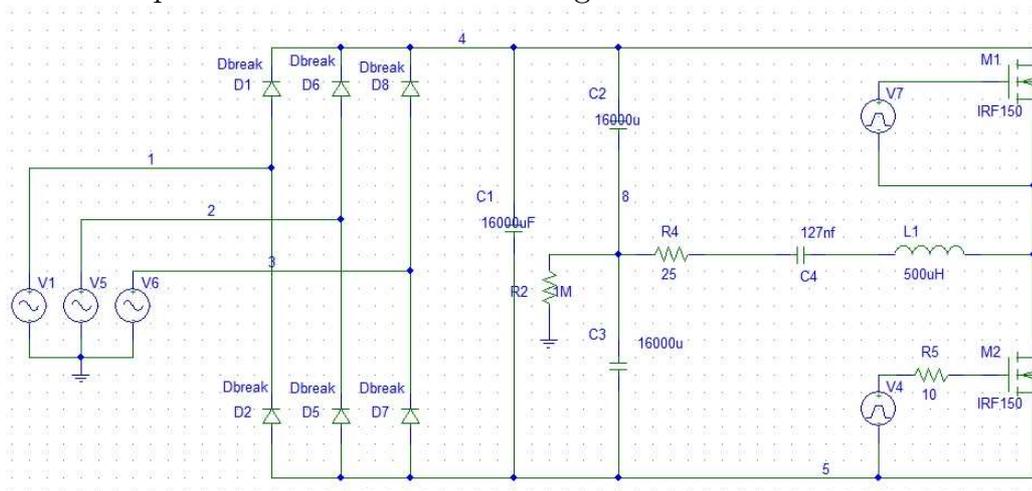


Fig. 4.1 - Circuito ressonante analisado.

Foram observadas as formas de onda de tensão e corrente no ramo ressonante, apresentadas nas Figuras 4.2 e 4.3.

Observa-se uma onda quadrada de 20 kHz no braço ressonante e a corrente aproximadamente senoidal, como se deseja. Quando a frequência de ressonância não é igual à frequência de chaveamento, a corrente não adquire um perfil senoidal, e a indução magnética resultante na maioria das vezes não é capaz de aquecer materiais.

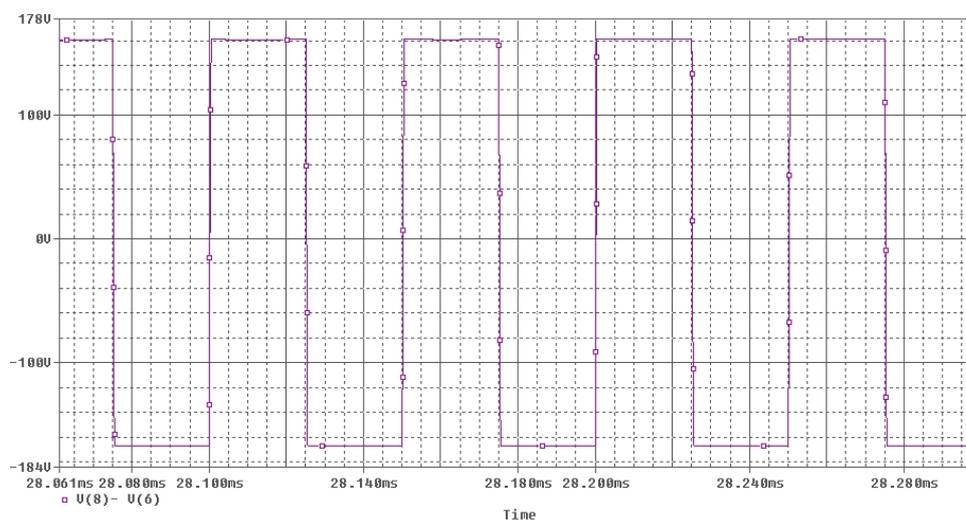


Fig. 4.2 - Tensão no ramo ressonante.

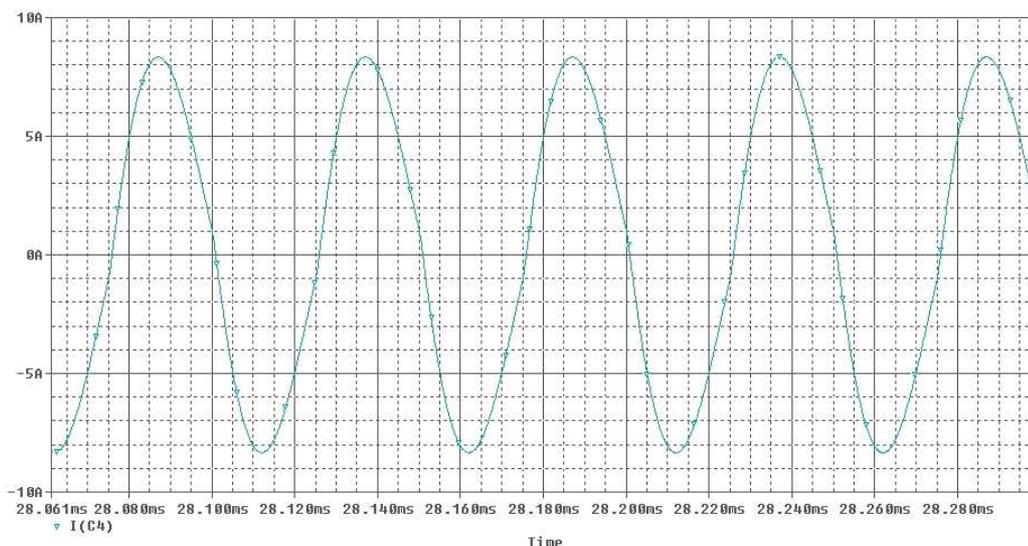


Fig. 4.3 - Corrente no ramo ressonante.

4.3 Esquema elétrico geral

A Figura 4.4 mostra todos os estágios do projeto eletrônico do forno. A próxima Seção lista os principais componentes eletrônicos utilizados em cada estágio.

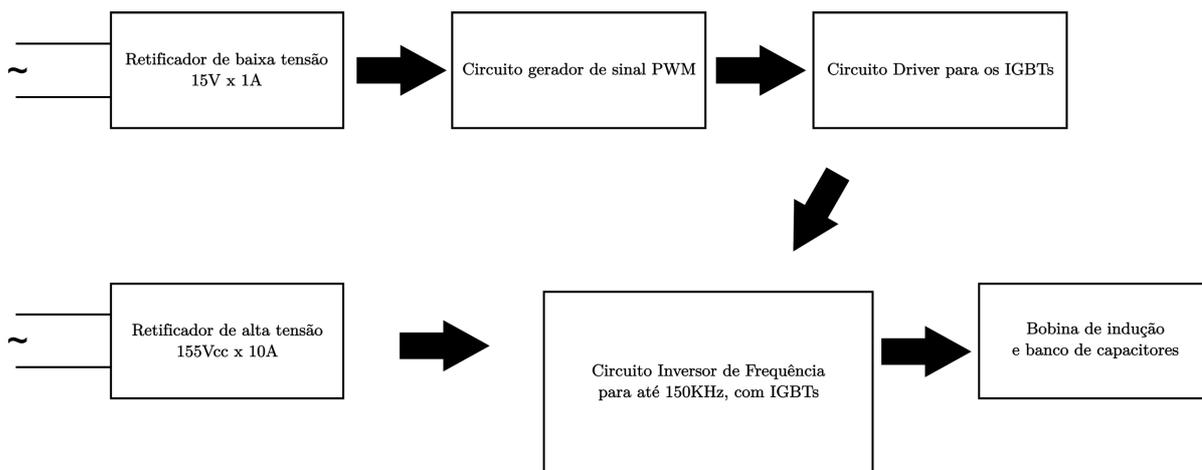


Fig. 4.4 - Esquema elétrico geral do projeto.

4.4 Escolha dos componentes adequados

Após as simulações feitas descritas na Seção 4.2, foram determinados os principais componentes eletrônicos a serem utilizados:

- IGBT STGW60H65DF (02 unidades):

Responsável pelo chaveamento da tensão do circuito, é o principal componente utilizado. São utilizados dois, para trabalhar com onda completa. Este IGBT suporta até 60A e 650V.

- SG3525 (01 unidade):

Gerador de PWM, é utilizado no circuito de acionamento (circuito *driver*) para disparo dos IGBTs com pulsos de frequência ajustável. Fornece dois sinais complementares.

- 6N137 (02 unidades):

Opto-acoplador, utilizado no circuito de acionamento para implementar estágios de isolamento entre o sinal fornecido pelo PWM e a porta (gate) de cada IGBT.

- CD4050 (03 unidades):

Buffer utilizado no circuito de acionamento, para corrigir imperfeições nos pulsos gerados. É utilizado um logo após a saída do PWM, e um para cada estágio isolado, logo após os opto-acopladores.

- BC337 (04 unidades) e BC327 (02 unidades):

Amplificadores de corrente utilizados no circuito de acionamento logo após cada buffer CD4050.

- SKD25-08 (01 unidade):

Ponte retificadora trifásica a diodos, para 800V e 25A, utilizada no circuito de potência para realizar alimentação CC. Foram utilizadas apenas duas entradas, por se tratar de alimentação CA monofásica.

- Capacitor eletrolítico de 200V e 5500uF (02 unidades):

Utilizados em conjunto com a ponte no circuito de potência, para realizar a retificação.

- Capacitor de poliéster de 250V e 4,7uF (08 unidades):

Utilizados para compor bancos de capacitores.

- Tubo de cobre de $1/4''$ de diâmetro:

Utilizado na construção da bobina de aquecimento. Dentro da bobina é inserido o cadinho ferroso onde ocorrerá o aquecimento. Optou-se por utilizar tubo, em vez de fio maciço por dois motivos: O primeiro é o fato de se trabalhar com altas correntes e frequências, podendo ocorrer o efeito *skin* na bobina (o efeito *skin* é o aumento aparente da resistência do condutor, resultado da condução que passa a ocorrer apenas na superfície do mesmo, e não em toda a sua seção). O segundo é uma prevenção contra um eventual superaquecimento da bobina, havendo possibilidade de implementar resfriamento com água em seu interior. É recomendável que a bobina construída possua altura de uma a duas vezes o seu diâmetro [6].

- Fio de cobre de $1,5\text{mm}^2$ e núcleo toroidal de ferrite:

Utilizado na placa de potência, na construção do indutor de casamento de impedância.

4.5 *Driver* de meia ponte

Foi feita uma tentativa de se utilizar o componente IRF21844, um driver de meia ponte. Ele recebe os pulsos gerados no gerador de PWM e oferece na saída dois pulsos complementares com tempo morto ajustável. Após várias tentativas de se utilizar este componente, e de várias consultas feitas na folha de dados e até em outras fontes, não foi obtido nenhum êxito, e ficou decidido pela não-utilização deste componente, sendo substituído pelos estágios de amplificação e isolamento que compõem o circuito de acionamento mencionado.

4.6 Montagem do circuito de acionamento

Este foi o primeiro circuito montado, e seu diagrama esquemático está apresentado na Figura 4.5. São necessárias três fontes CC de 15 V, disponíveis no laboratório de Circuitos Elétricos e Eletrônicos. A primeira alimenta o estágio do gerador de pulsos, composto pelo SG3525, trimpots de ajuste de frequência e razão

cíclica, um buffer CD4050 e dois BC337, além de alguns resistores e capacitores. As outras duas alimentam cada um dos estágios isolados de ataque dos IGBTs. A Figura 4.6 mostra esta organização da placa. A alimentação é feita pelos bornes posicionados no canto superior esquerdo da placa.

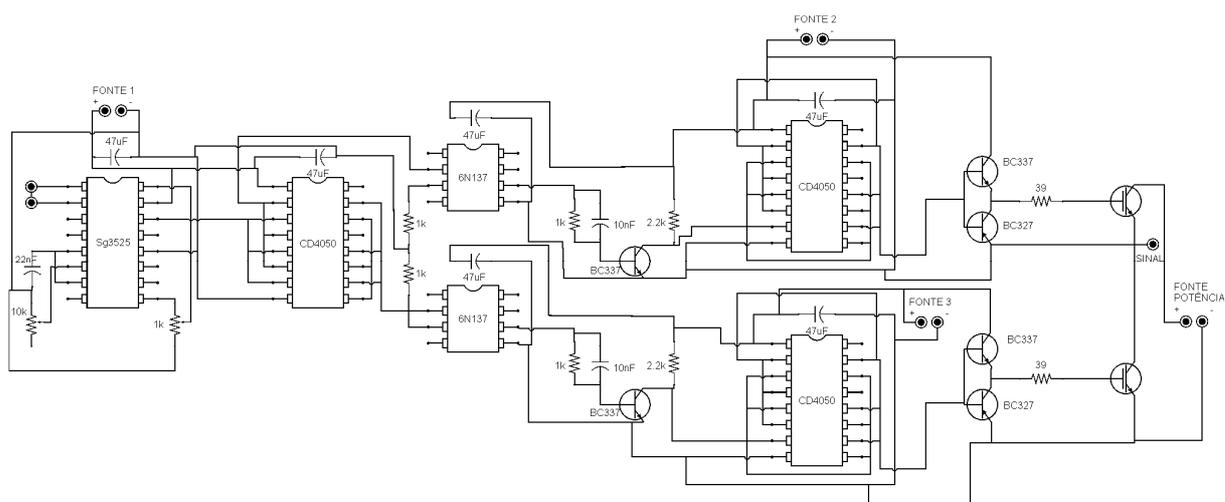


Fig. 4.5 - Diagrama elétrico do circuito de acionamento.

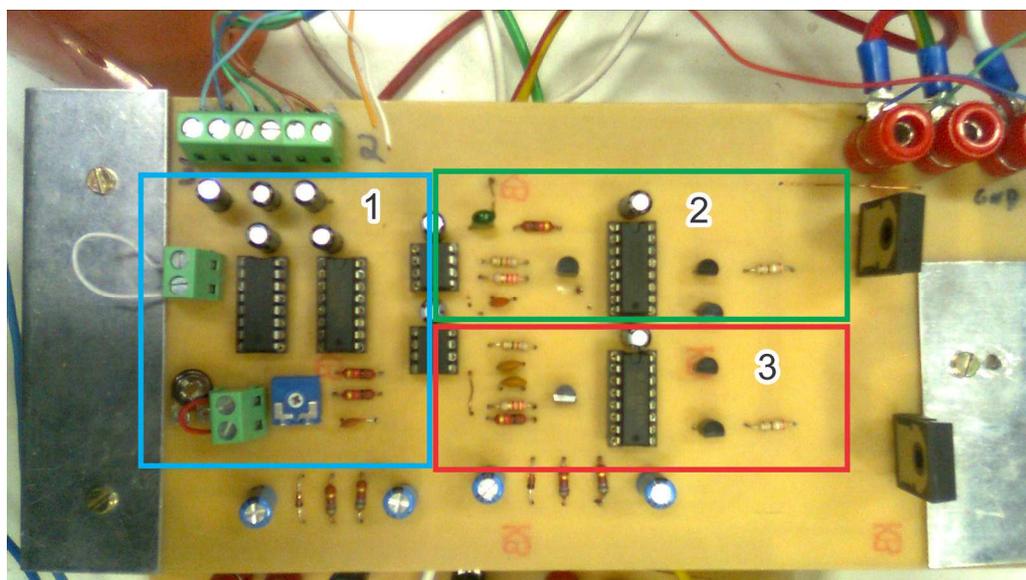


Fig. 4.6 - Separação da alimentação pelas três fontes.

Pode ser observado na Figura 4.6, da esquerda para a direita, o primeiro CI, que é o gerador de pulsos PWM, e o segundo CI, que corrige e armazena os pulsos gerados. Estes pulsos são direcionados aos opto-acopladores, onde ocorre a isolamento dos estágios. Cada sinal passa por um amplificador BC337, passa mais uma vez por

um buffer CD4050 e um estágio *totem pole*, composto por um BC337 e um BC327. A saída é conectada, através de um resistor de 39 ohms ao *gate* do IGBT. A Figura 4.7 mostra o *layout* da placa construída.

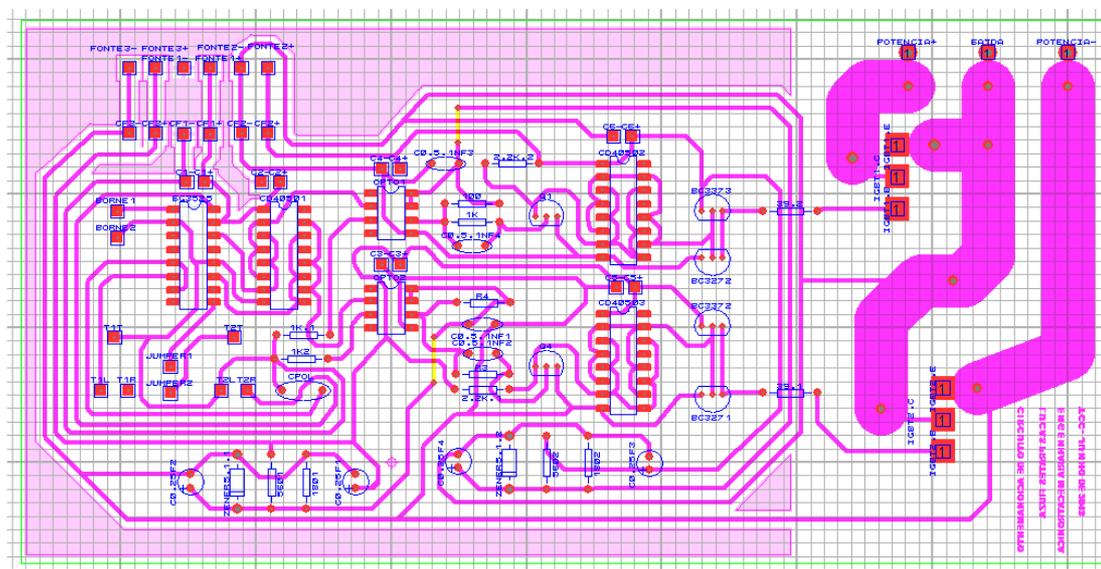


Fig. 4.7 - Layout da placa de acionamento.

Foi adicionado ainda dois divisores de tensão na parte inferior da placa, para alimentar cada um dos opto-acopladores com 5V, aproveitando as fontes de 15V utilizadas nos estágios isolados.

Os IGBTs foram instalados na placa de acionamento para não ser necessário transportar os sinais de disparo através de fios, o que provocaria o aparecimento de ruídos. A placa possui, ainda, entrada de tensão contínua de potência, para alimentar os IGBTs, pelos bornes instalados no canto superior direito.

Posteriormente, foi necessário adicionar um circuito *snubber* para filtrar ruídos no chaveamento dos IGBTs, como mostra a Figura 4.8. Ele é conectado em paralelo a cada IGBT (entre o coletor e emissor), e consiste em um arranjo em série de um resistor de 100 ohms e 5W com um capacitor de 22nF. Paralelo ao resistor foi colocado um diodo ultra rápido 1N4937.

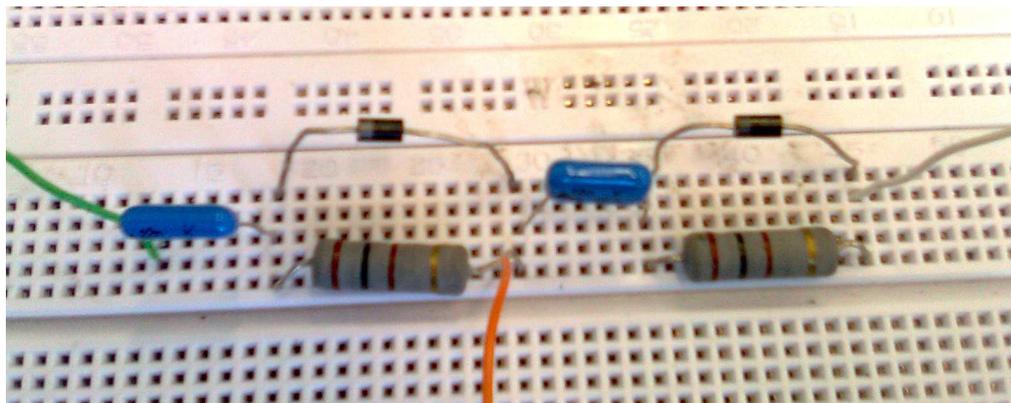


Fig. 4.8 – Circuito *snubber* utilizado.

O circuito foi conectado com o terminal da esquerda junto ao emissor do IGBT inferior, o terminal central no emissor do IGBT superior e o terminal da direita junto ao coletor do IGBT superior.

4.7 Montagem do circuito de Potência

A placa de potência montada possui o diagrama elétrico mostrado na Figura 4.9. Consiste em uma entrada CA, uma ponte retificadora, capacitores de retificação, saída para a bobina, banco de capacitores em paralelo com a bobina e em série com o indutor de casamento de impedância. A Figura 4.10 mostra o layout da placa e a Figura 4.11 mostra a placa montada.

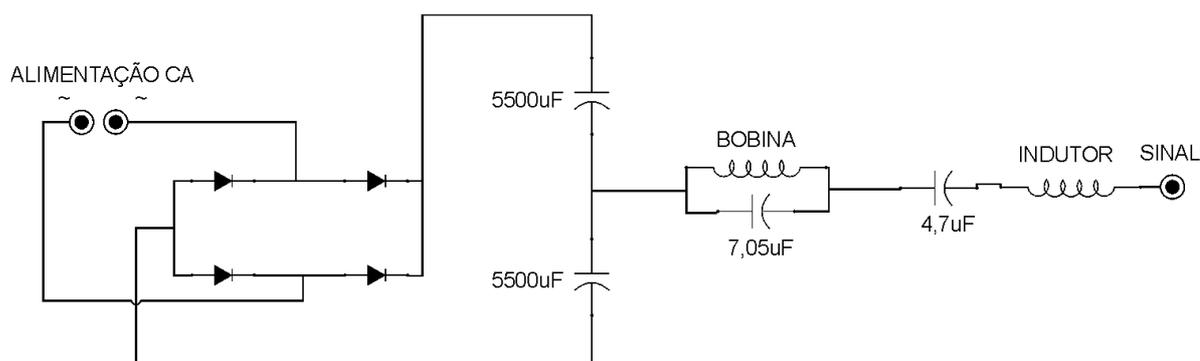


Fig. 4.9 - Diagrama elétrico da placa de potência.

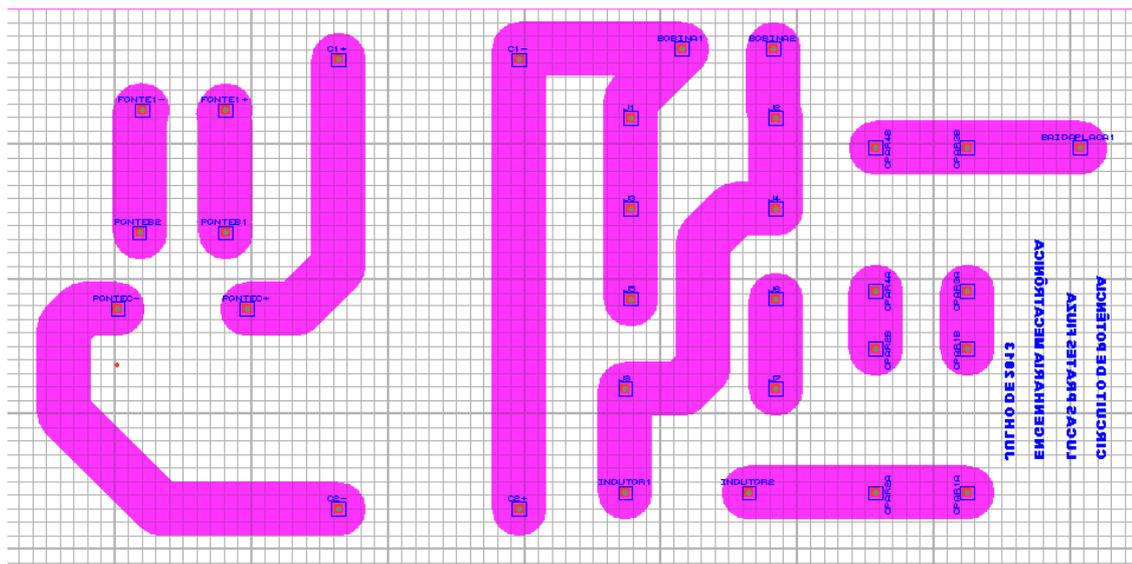


Fig. 4.10 - Layout da placa de potência.

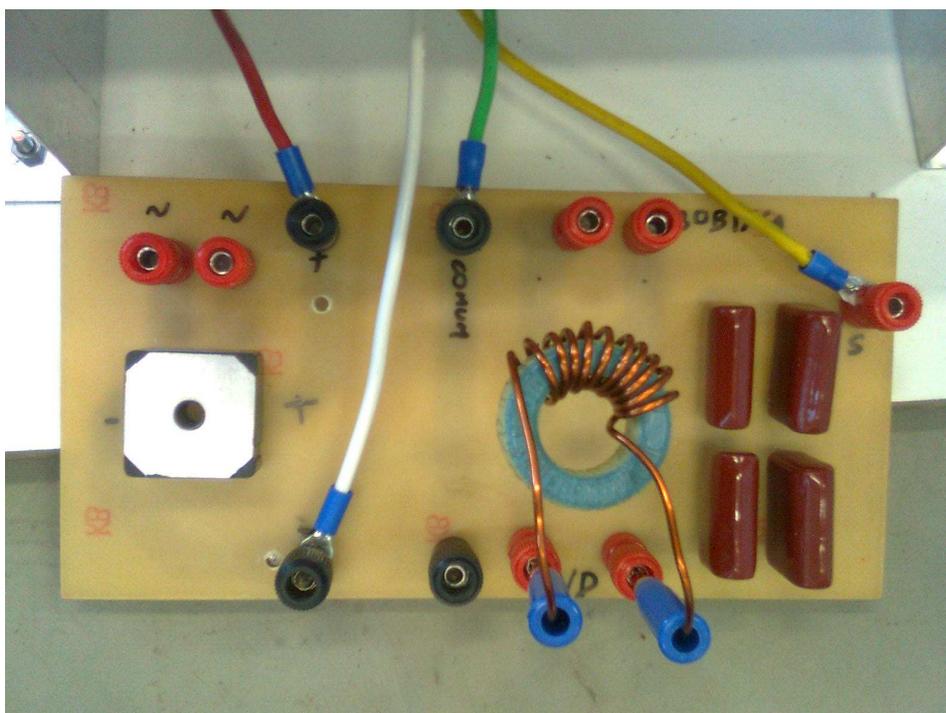


Fig. 4.11 - Placa de potência.

Devido às dimensões dos capacitores de retificação, não foi possível fixá-los à placa de potência, a solução foi colocar bornes na placa e conectá-los com fios apropriados, como mostra a Figura 4.12. Percebe-se ainda que os capacitores de ressonância da bobina, que seriam colocados imediatamente abaixo do indutor, não estão presentes. Eles foram fixados diretamente na bobina durante os testes, para facilitar eventuais acréscimos ou substituição de capacitores.

Um detalhe importante é a conexão entre as duas placas: dos capacitores retificadores sai a tensão de alimentação dos IGBTs na placa de acionamento, e os terminais denominados SINAL das duas placas são curto-circuitados.



Fig. 4.12 - Capacitor de retificação.

4.8 Construção dos indutores

O indutor foi construído enrolando em um núcleo toroidal de ferrite um fio de cobre de $1,5\text{mm}^2$ de seção transversal. A Figura 4.13 mostra o indutor construído, com 11 espiras.

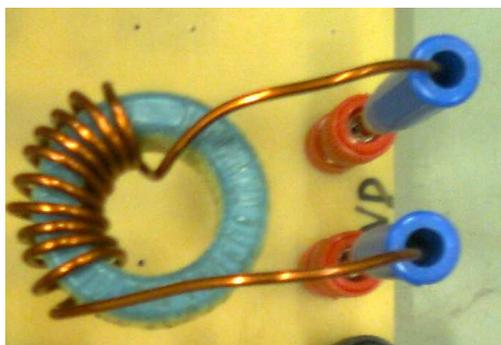


Fig. 4.13 - Indutor de casamento de impedância.

A quantidade de espiras foi escolhida aleatoriamente. Para medir a indutância do indutor, foi montado o circuito RL mostrado na Figura 4.14.

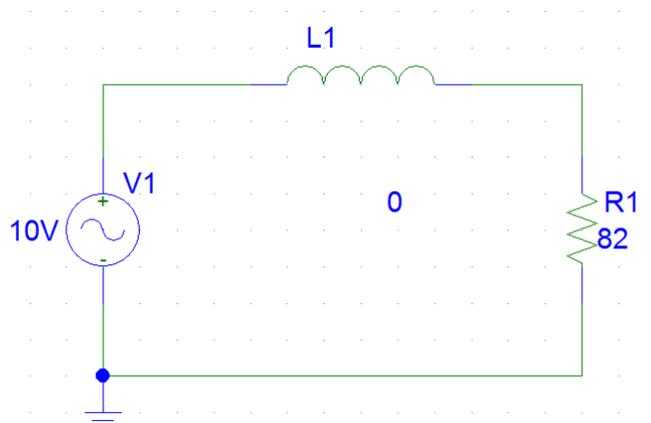


Fig. 4.14 - Circuito RL montado.

Este circuito é um divisor de tensão, e a impedância no indutor é dada por:

$$X_L = 2\pi fL \quad (6)$$

Conhecendo a tensão de entrada e o valor do resistor, pode-se calcular a impedância X_L . A medição pode ser feita em uma frequência arbitrária. Foi utilizado um resistor de 82 ohms, e para uma frequência de 765KHz, foi obtido:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

$$L = \frac{82}{2\pi \cdot 765000} \quad (7)$$

$$L \approx 17\mu H$$

Para a bobina de aquecimento foi utilizada a mesma estratégia. Para um resistor de 990 ohms e frequência de 2MHz, a indutância calculada foi:

$$L \approx 10,2\mu H \quad (8)$$

4.9 Obtenção do circuito ressonante

De posse do valor das indutâncias, o cálculo dos capacitores para ressonância partiu da frequência utilizada no funcionamento do forno, de 20 kHz. Para o indutor com núcleo de ferrite foram inseridos capacitores em série. Para a bobina de aquecimento, foram inseridos capacitores em paralelo. Um circuito LC tem a frequência de ressonância dada pela equação (9).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

Assim, o valor da capacitância em série com o indutor será:

$$C = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{f_0 \cdot 2\pi} \right)^2 = 3,73\mu F \quad (10)$$

Da mesma forma, a capacitância em paralelo com a bobina será:

$$C = 6,235\mu F \quad (11)$$

Devido à disponibilidade de capacitores para o projeto, foi utilizado $C=4,7\mu F$ para a ressonância com o indutor e $C=7,05\mu F$ para a ressonância com a bobina. Com estes valores, as respectivas frequências de ressonância resultantes foram $f=17,8$ kHz e $f=18,8$ kHz.

Os indutores também possuem uma resistência, referente ao condutor utilizado. Como o valor medido em laboratório foi muito pequeno, menor que 0,5 ohms, a resistência dos dois indutores foi desprezada durante os cálculos.

4.10 Retificador de Potência

Para calcular a capacitância necessária, foi usada a fórmula apresentada na equação (12):

$$I_c = C \frac{dV}{dt} \quad (12)$$

Considerando o período de 8,3ms, correspondente a meio ciclo de 60Hz, que é o tempo que o capacitor vai carregar, a tensão de rede de 220V e a corrente de trabalho de 10A, pode-se obter o valor da capacitância:

$$C = I_c \frac{dt}{dV}$$
$$C = 10 \frac{0,0083}{\frac{220 \cdot \sqrt{2}}{2}} = 5500 \mu F \quad (13)$$

Um detalhe importante é que o capacitor deve suportar mais de 150V.

Segundo a norma NBR 5471, deve-se utilizar fios de seção transversal de 1,5mm² para suportar até 14A. A Figura 4.15 mostra os capacitores para retificação utilizados, bem como os fios utilizados.

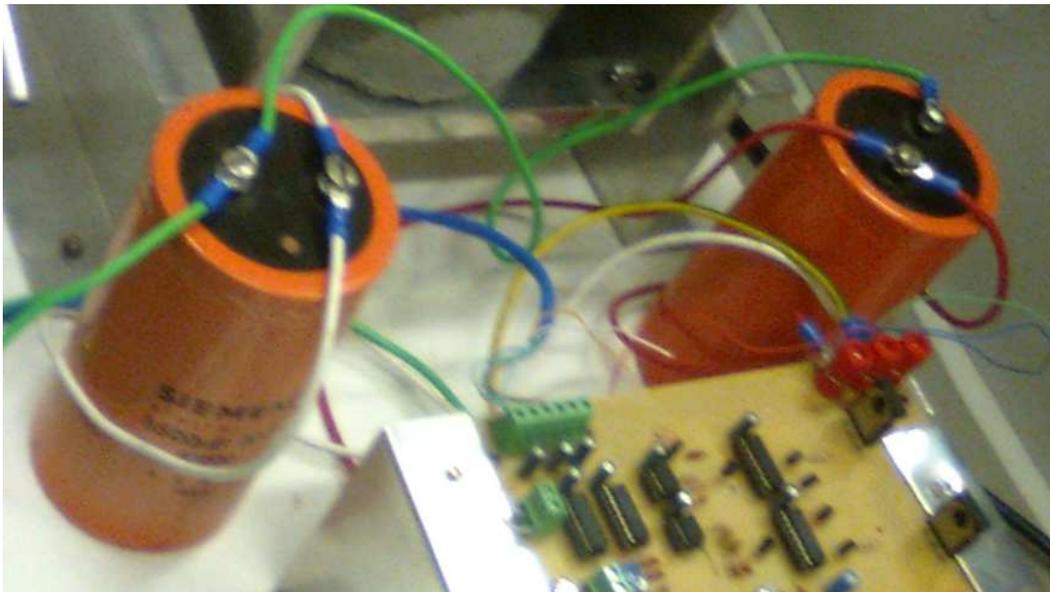


Fig. 4.15 - Capacitores de retificação com os fios conectados ao circuito.

Experimentos

5.1 Medição dos sinais no circuito de acionamento

O gerador de PWM foi ajustado para oferecer pulsos de 20KHz, com um tempo morto de 8 μ s, e razão cíclica próxima de 50%. O tempo morto serve para garantir que os IGBTs não irão conduzir ao mesmo tempo, causando curto-circuito. A Figura 5.1 mostra o sinal gerado pelo gerador de PWM, nota-se que a onda não está perfeitamente quadrada. A Figura 5.2 mostra o sinal corrigido com o buffer CD4050.

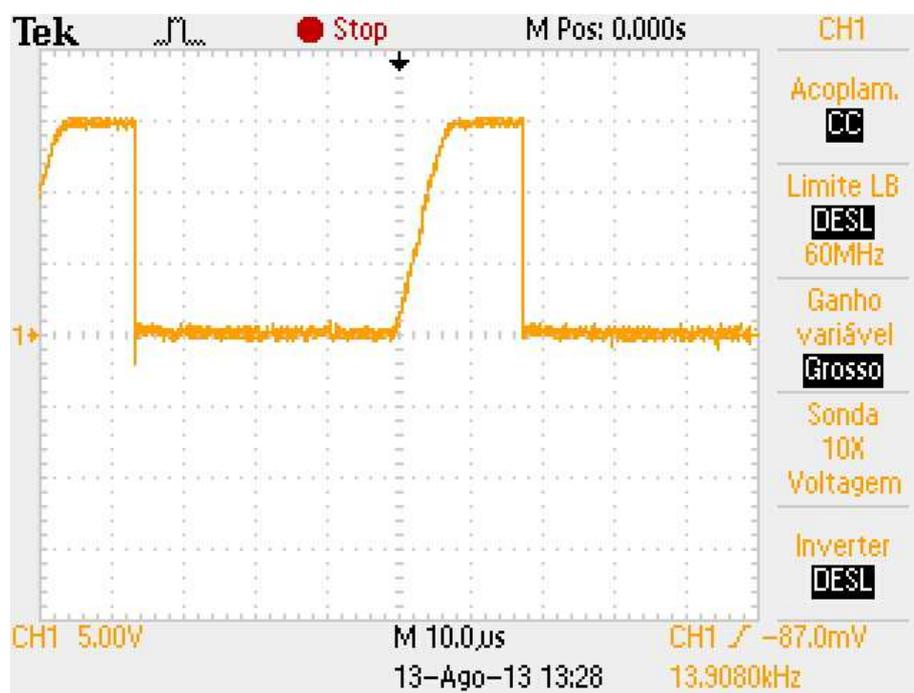


Fig. 5.1 - Sinal obtido do gerador de PWM.

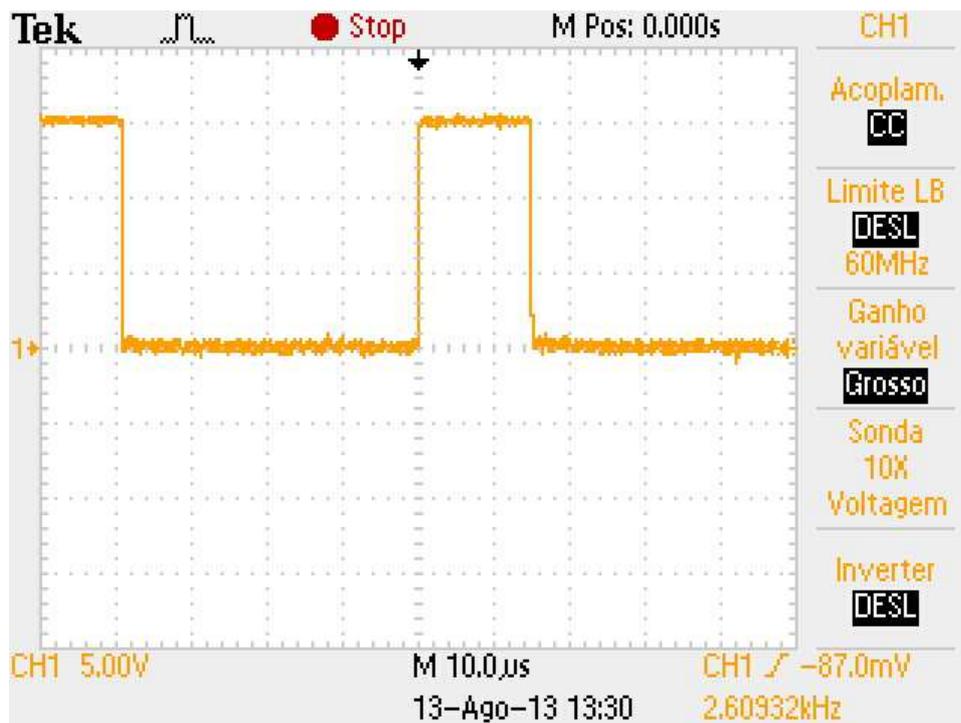


Fig. 5.2 - Sinal corrigido com o buffer CD4050.

A Figura 5.3 mostra o sinal após o opto-acoplador. Como este elemento é alimentado com 5V, a amplitude do sinal foi reduzida para este valor. A Figura 5.4 mostra o sinal amplificado, e a Figura 5.5 mostra o sinal disponível no gate do IGBT. O sinal sofreu ligeira atenuação em sua transição para 15V, mas isso não alterou o disparo dos IGBTs, pois de acordo com a folha de dados, a tensão de limiar (tensão necessária para colocá-lo em condução) do componente é de 6 V.

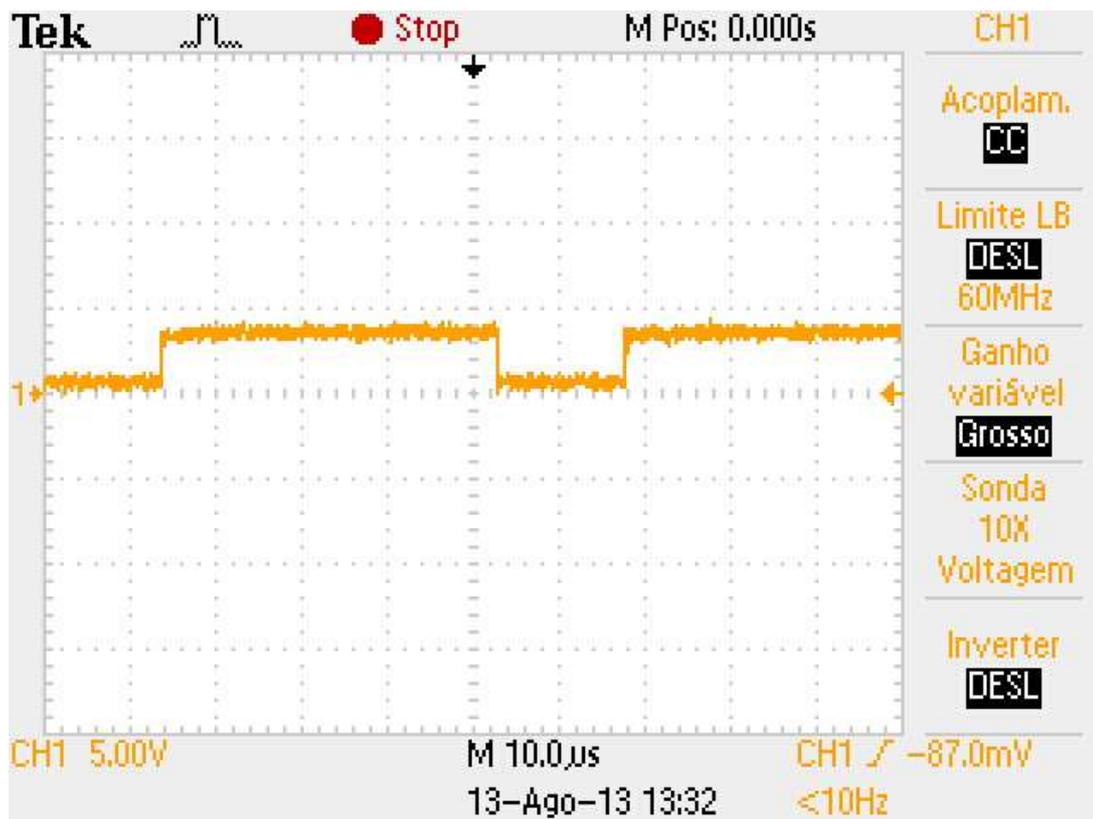


Fig. 5.3 - Sinal obtido na saída do opto-acoplador.

Fig. 5.4 - Sinal amplificado pelo arranjo *totem pole* BC337 e BC327.

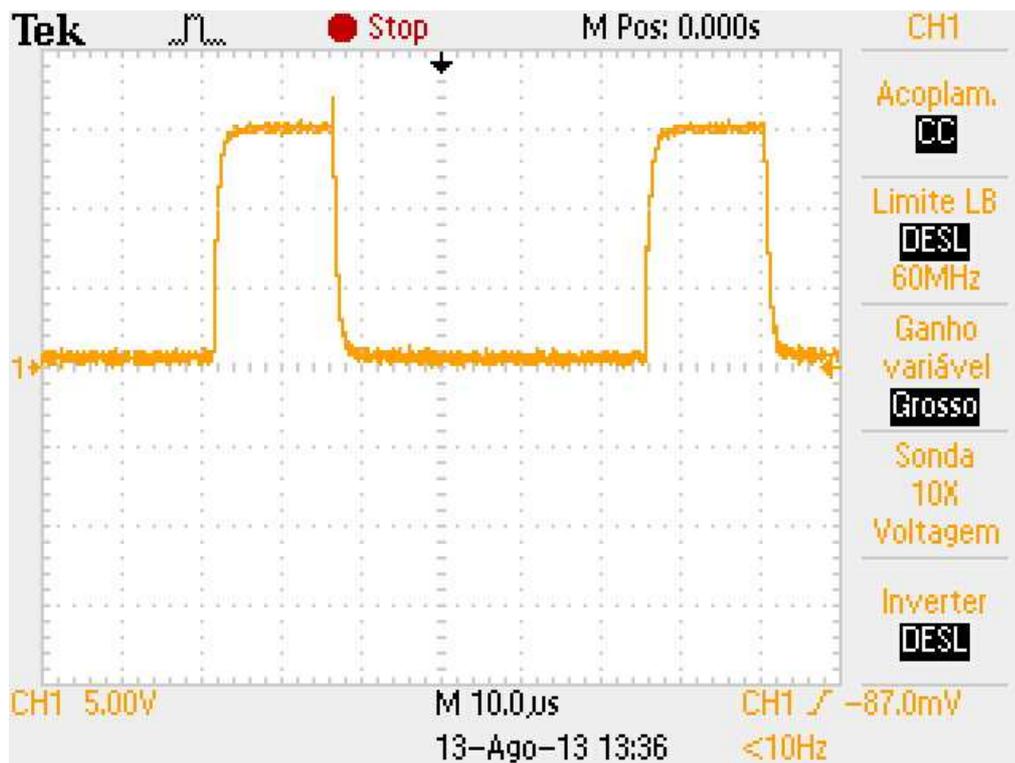


Fig. 5.5 - Sinal disponível no gate do IGBT.

5.2 Medição dos sinais no circuito de potência

Com a configuração descrita na Seção anterior, foi medido o valor da tensão entre o coletor e o emissor de um dos IGBTs. Foi utilizado um variador de tensão alternada para alimentar o circuito de potência. A Figura 5.6 mostra essa medição, o valor nulo indica o período de condução da chave, o valor máximo indica o período de chave aberta, e o valor intermediário indica o período de tempo morto, quando nenhuma das chaves conduz. Observou-se que, com um valor de cerca de 6 Volts, a corrente medida no circuito foi de cerca de 0,8 Ampères.

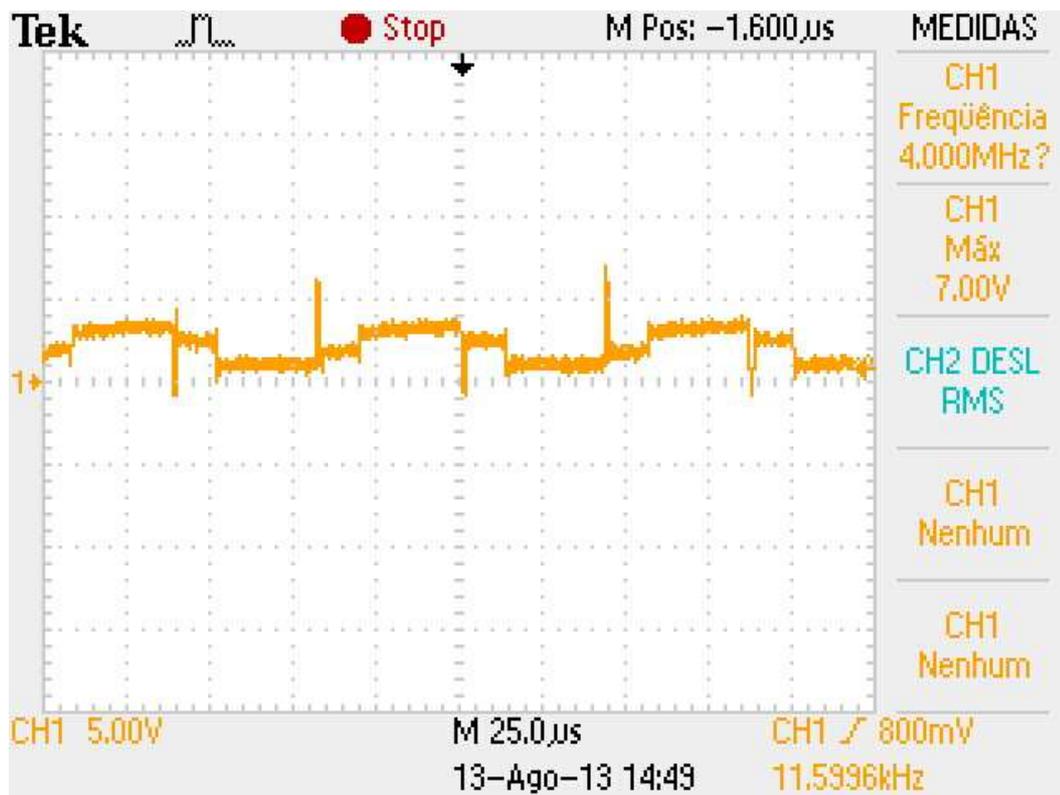


Fig. 5.6 - Tensão medida entre o coletor e o emissor do IGBT.

Pelo gráfico apresentado na Figura 5.6, é possível perceber que ainda aparece um pouco de ruído, o que indica que em determinados momentos, provavelmente os dois IGBTs estão conduzindo ao mesmo tempo. Isso acarretará em um aquecimento adicional dos componentes, podendo causar até a queima dos mesmos.

Foram feitos testes diminuindo a razão cíclica para cerca de 10%, assim a tensão pôde ser aumentada. Com a razão cíclica menor, cada chave conduz por um intervalo menor de tempo, diminuindo a eficiência do aquecimento. Em todos os casos, foi observada na bobina a ressonância do circuito. A Figura 5.7 mostra a tensão medida na bobina, e pode ser observada a ocorrência da ressonância por se tratar de uma onda senoidal praticamente pura.

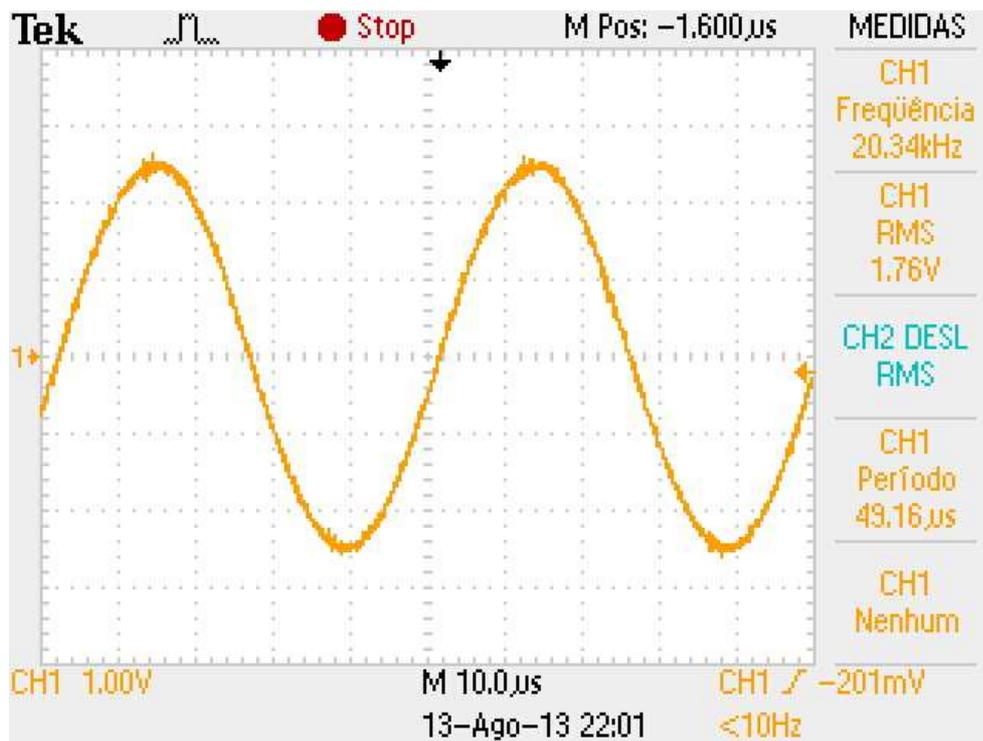


Fig. 5.7 - Tensão na bobina de aquecimento.

Foram feitos mais alguns testes, aumentando a tensão até se atingir cerca de 3 Ampères. Como se trata de uma corrente alta, e havia presença de muito ruído, os testes feitos foram de curta duração por segurança, apenas para se observar as formas de onda nos IGBTs e na bobina. Tais testes não tiveram duração suficiente para realizar aquecimento no cadinho posicionado dentro da bobina.

5.3 Outros testes realizados

Anteriormente ao teste apresentado nas Seções anteriores, foram realizados outros testes, que apresentaram resultados pouco satisfatórios. O sinal medido entre o coletor e o emissor de uma das chaves não apresentou o perfil desejado, além da presença de ruídos de cerca de 2,5 vezes o valor nominal do teste. A Figura 5.8 mostra esta medição feita.

Constatou-se que os cálculos para ressonância do circuito LC série provocou um erro no valor da capacitância, distorcendo completamente o sinal, e colocando os interruptores em condução em momentos não desejados.

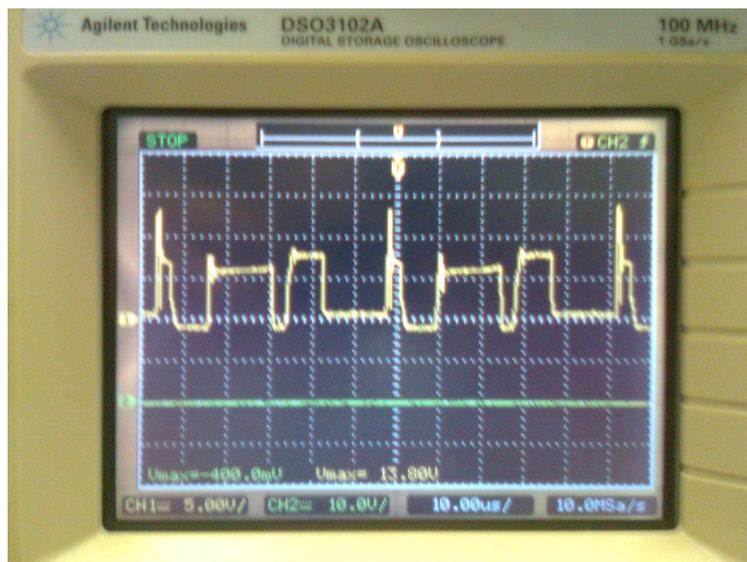


Fig. 5.8 - Tensão medida com circuito LC série de capacitância diferente da ideal.

Foi feito ainda outro teste, retirando o circuito LC série, substituído por um fio. Neste caso, a tensão medida entre o coletor e o emissor de uma das chaves apresentou perfil quadrado. Também havia presença de ruído, de cerca de 40% do valor de tensão nominal do teste. A Figura 5.9 apresenta esta medição, e a Figura 5.10 apresenta a atenuação do ruído feita com a utilização de um circuito *snubber* nas chaves.

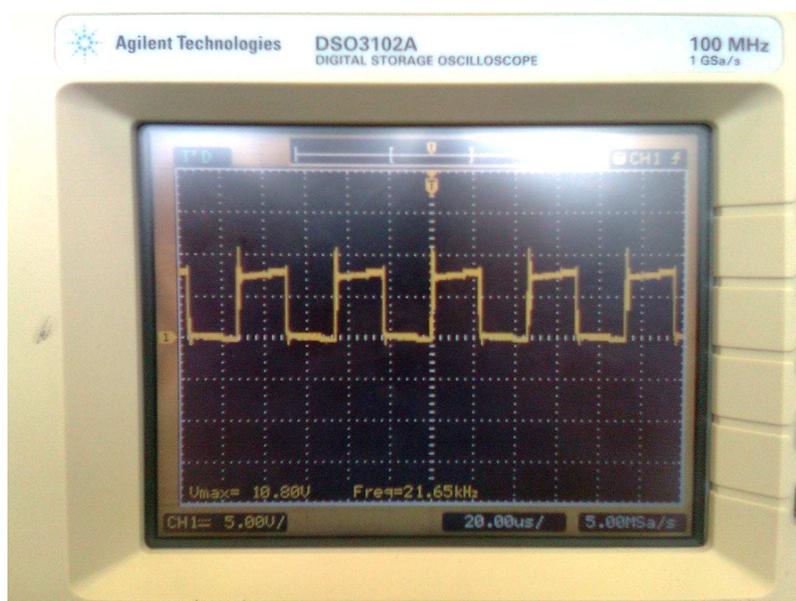


Fig. 5.9 - Tensão medida retirando o circuito LC série.



Fig. 5.10 - Atenuação de ruído com a utilização de um circuito *snubber*.

Aumentando a capacitância do *snubber*, a tensão medida apresenta maior oscilação. Diminuindo a capacitância, a filtragem do ruído torna-se menos eficiente. Todos estes testes foram realizados com chaveamento a 20 kHz.

Conclusão e Propostas de Continuidade

Este trabalho proporcionou uma atividade com grande interdisciplinaridade, grande quantidade de experimentos práticos, além de toda a pesquisa que se fez necessária, caracterizando o que um Trabalho de Conclusão de Curso deve ter.

6.1 Resultados

Como foi descrito na Seção Experimentos, limitações técnicas impediram a visualização direta dos resultados do forno. Porém, como são mostrados em todos os gráficos presentes neste trabalho, foi obtido êxito no projeto do inversor de frequência e no circuito ressonante, atingindo indiretamente os objetivos propostos.

Foi observado que a ressonância ocorre de forma satisfatória para uma pequena faixa de frequências de chaveamento, dado um circuito ressonante fixo. No caso deste projeto, foram projetados banco de capacitores para a operação da planta em 17,8 kHz ou 18,8 kHz, e mesmo assim a ressonância foi observada sem distorções com o chaveamento em 20 kHz, e também em uma faixa de ± 2 kHz. Isso é bastante útil na montagem de circuitos, pois possibilita utilizar componentes de valores comerciais em arranjos simples. Esta técnica também é utilizada quando se deseja aumentar a amplitude da forma de onda. Quando o chaveamento ocorre um pouco abaixo da ressonância do circuito, a terceira harmônica passa a ter maior influência na amplitude, aumentando o seu valor sem provocar distorção [4].

6.2 Percepções

Durante o desenvolvimento do trabalho foram observadas algumas dificuldades. Uma delas foi a falta de espaço nos laboratórios da instituição destinados ao desenvolvimento de pesquisa. Todos os dias se fazia necessário montar e desmontar a planta e os equipamentos necessários aos experimentos, demandando muito tempo que poderia ser aplicado na própria pesquisa. Além disso, o fato de se montar um protótipo de testes todos os dias aumenta muito as chances de cometer um erro, de ligar algum elemento de forma errada e até de danificar algum componente da planta.

Em relação ao projeto, foi dedicado muito tempo (cerca de 2 meses) ao estudo e tentativas de utilização do *driver* IRF21844. Com ele, o circuito de acionamento ficaria mais simples, e seria disponibilizado mais tempo na obtenção de um circuito ressonante que consumisse menor corrente, sendo possível testar a planta em suas condições nominais. A solução foi abandonar a ideia de utilização deste *driver* e implementar um circuito maior que executasse a mesma função. Este circuito ainda demandou um pouco mais de tempo, para corrigir erros que apareceram durante a montagem.

Outro grande desafio foi acertar os dois circuitos ressonantes para a mesma frequência de chaveamento das chaves. Durante algum tempo os testes não apresentaram os resultados esperados, e depois de muita análise foram detectados e corrigidos os erros. Só então foram obtidos sinais compatíveis com os estudados na teoria. A presença de ruído também diminuiu naturalmente com a correção destes erros, tornando-se bem menos significativo nos últimos testes realizados.

6.3 Propostas de continuidade

Como propostas de continuidade existe a possibilidade de adaptação para malha fechada para controle automático de temperatura: O pino 1 do SG3525 recebe a entrada de referência, o pino 2 recebe o sinal de erro, e a saída deste controlador aparece no pino 9. É preciso fazer a realimentação do pino 9 para o pino 2, este é o sinal de erro.

Outra ideia de expansão do projeto é a implementação de circuitos de proteção contra curto-circuito e desarme por aquecimento. Isso se faz necessário para proporcionar maior segurança para o funcionamento da planta e para o próprio usuário.

Há ainda a possibilidade de otimização da estrutura da planta, e utilização de cadinhos que facilitem o escoamento do material fundido.

Bibliografia

[1] **Induction heating equipment, systems and services for industrial applications - EFD Induction.** Disponível em: <<http://www.efd-induction.com/>>
Acesso em: 15 ago 2013.

[2] **Vantagens de aquecimento por indução - aquecimento por indução, aquecedor indução, PWHT, soldagem pós, pré-aqueça solda, forno forjamento, fabricante forno fusão.** Disponível em: <<http://www.inductionheating.com/Pt/Advantages-Induction-Heating-28.html>>.
Acesso em: 15 ago. 2013.

[3] **Sobre aquecimento por indução.** Disponível em: <<http://www.ghinduction.com/sobre-aquecimento-por-inducao/?lang=pt-br>>.
Acesso em: 15 ago. 2013.

[4] Hart, Daniel W. - **Eletrônica de Potência - análise e projetos de circuitos.** Porto Alegre: AMGH Editora, 2012. 480p.

[5] **Características Físicas do IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) .** Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/grad/01_1/igtb/Pagina_IGBT.htm>.
Acesso em: 15 ago. 2013.

[6] Di Stasi, Luigi. **Fornos Elétricos.** Curitiba: Hemus, 2002. 451 p.

[7] **Inversores de frequência - Descrição do funcionamento.** Disponível em: <<http://www.faculdadedavilamatilde.com.br/>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

[8] **Forno INDUCAO.** Disponível em: <<http://www.eduardomoreira.eng.br/metalurgia/inducao/inducao.html>>. Acesso em: 15 ago. 2013.