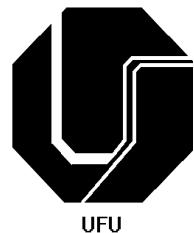


CAROLINA PIMENTA MOTA

**SISTEMA DE VISÃO POR INFRAVERMELHO
PRÓXIMO PARA MONITORAMENTO DE
PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2011

CAROLINA PIMENTA MOTA

**SISTEMA DE VISÃO POR INFRAVERMELHO PRÓXIMO PARA
MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho
Co-orientador: Prof. Dr. Roberto M. Finzi Neto

**UBERLÂNDIA - MG
2011**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

M917s Mota, Carolina Pimenta, 1986-
Sistema de visão por infravermelho próximo para monitoramento de
processos de soldagem a arco / Carolina Pimenta Mota. - 2011.
137 f. : il.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.
Co-orientador: Roberto M. Finzi Neto.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem elétrica - Teses. I. Vilarinho, Louriel Oliveira, 1975- II. Finzi Neto, Roberto Mendes. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Dedico,
Aos meus pais Vicente e Verônica,
que me ensinaram a humildade,
a vontade de aprender e a
oferecer o melhor de mim,
me levando a essa vitória

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

À CAPES pelo apoio financeiro no fornecimento da bolsa para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Louriel Oliveira Vilarinho, pela orientação, acrescentando a este trabalho grande experiência e qualidade, e pelas horas de conversas e conselhos que levarei pra vida toda.

Ao Professor Roberto Mendes Finzi Neto, pela co-orientação, atenção e dedicação total, pelas horas extras de trabalho para atingir sempre os melhores resultados e pela paciência para me ensinar e sempre esclarecer minhas dúvidas.

Ao Marcus Vinícius Ribeiro Machado, por sempre estar ao meu lado, sempre pronto para ajudar, me apoiar ou discutir ideias para que eu pudesse desenvolver o meu melhor neste trabalho.

Ao Diandro Bailoni Fernandes e Luiz Carlos Menezes Júnior, pela disponibilidade em sempre me ajudar quando precisava, pela amizade e pelas sugestões e interesse durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao grupo LAPROSOLDA, pela disponibilidade de todos os recursos necessários para a conclusão desse trabalho.

MOTA, C. P. **Sistema de Visão por Infravermelho Próximo para Monitoramento de Processos de Soldagem a Arco.** 2011. 137 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A visão, o sentido predileto do ser humano, e sua grande capacidade de captar, processar e interpretar grandes quantidades de dados de natureza visual tem sido, ao longo dos anos, um grande estímulo para o desenvolvimento de técnicas e de dispositivos tecnológicos que a reproduzam um sistema computacional. Nos processos de soldagem, a visão pode fornecer dados desde na inspeção e qualidade da junta soldada, no monitoramento de parâmetros, na correção de trajetórias até, por fim, no estudo dos fenômenos envolvidos no processo. Porém, a radiação luminosa emitida pelo arco representa uma barreira para tais estudos baseados na visualização do processo. Uma das formas utilizadas atualmente para se obter a visualização do processo, sem a interferência do arco, consiste em iluminar o processo com o infravermelho próximo e utilizar filtros de interferência (passa-faixa), em torno deste mesmo comprimento de onda, durante a aquisição das imagens. Uma solução para a iluminação infravermelha, de aplicação crescente, envolve o uso de diodos laser de alta potência, com baixo custo e menor complexidade de instalação do que os lasers convencionais. Desta forma, a proposta deste trabalho foi a criação de um sistema de visão dos processos de soldagem a arco, de baixo custo e alta flexibilidade, indo desde a caracterização dos espectros de emissão luminosa do arco, passando pela criação de uma topologia de acionamento para o diodo de alta potência no infravermelho próximo, respeitando suas limitações de uso e maximizando a potência luminosa emitida, criação dos circuitos de controle, escolha dos equipamentos e componentes ópticos e, por fim, projeto e aplicação de um protótipo em processos de soldagens. O sistema elétrico foi validado por simulações computacionais e testes experimentais de *burnout* e de stress, e as limitações do sistema de visão, como um todo, foram encontradas através e sua aplicação com soldagens TIG e MIG/MAG. Nestes ensaios, embora não tenha sido capaz de sobrepor a luz do arco, o sistema desenvolvido proporcionou uma iluminação homogênea e em sincronia com a câmera, onde a principal limitação foi o grande tempo de exposição da câmera disponível. Sugere-se, ao final, utilizar o sistema na forma de um seguidor de juntas.

Palavras-Chave: Sistema de visão; diodo laser; infravermelho próximo; monitoramento; soldagem.

MOTA, C. P. **Near-Infrared Vision System for Arc-Welding Monitoring.** 2011.
137 f. Master Thesis, Federal University of Uberlândia, MG, Brazil.

Abstract

Vision, the human being's favorite sense, and its great capacity to obtain, to process and to interpret great amount of visual nature data has been throughout the years a great inspiration for development of techniques and technological devices that reproduce it into a computational system. In welding processes, vision can supply information in inspection and welded joint's quality, in the parameters' monitoring, in trajectory correction and even, finally, in the study of the phenomena involved in the process. However, the luminosity/radiation emitted from the weld arc represents a barrier for these studies based in the process visualization. One of the forms currently used to visualize the process, without the interference of the arc's light, consists of illuminating the process with the near infrared light and, using band pass (interference) filters, around this exactly wave length, during the acquisition of the images. A solution for the near infrared illumination, of increasing application, involves the use of laser diodes of high power, with low cost and less complex installation than conventional lasers. Therefore, the proposal of this work is the project, construction and assessment of a vision system for welding processes with low cost and high flexibility. It is based on characterization of the spectrum of the weld arc, definition of a drive topology for the laser diode within its limitations of use and maximizing the emitted luminous power, built of control circuits, selection of optics equipment and components and, finally, project and application of a prototype for visualization of different arc-welding processes. The electrical system was validated by computational simulations and experimental burnout and stress tests. The final assessment of the whole vision system was carried out during TIG and MIG/MAG welding. Although, during the welding, the system was not capable of overcome the arc radiation, it provides a homogenous illumination in synchronism with the camera, which represents the main limitation due to its large shutter. Eventually, it s suggested to employ the developed vision system for helping joint tracking.

Keywords: ***Vision System; laser diode; near infrared; monitoring; welding.***

LISTA DE SÍMBOLOS

- α - ângulo de rotação em relação ao eixo x, em graus ($^{\circ}$).
- γ - ângulo de rotação em relação ao eixo y, em graus ($^{\circ}$).
- β - ângulo de rotação em relação ao eixo z, em graus ($^{\circ}$).
- Δx_{pixel} - distância projetada no eixo x entre dois pontos em uma imagem, em pixels.
- Δx_{real} - distância projetada no eixo x entre dois pontos, em cm.
- Δy_{pixel} - distância projetada no eixo y entre dois pontos em uma imagem, em pixels.
- Δy_{real} - distância projetada no eixo y entre dois pontos, em cm.
- φ - diâmetro do fio, em cm.
- λ - comprimento de onda, em μm .
- λ_{max} - comprimento de onda com máximo de emissão espectral, em μm .
- ν - frequência da radiação, em rad/s
- σ - constante para lei de Stefan-Boltzman, em $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$.
- . a, b, c, d, e, f, i, j - constantes da matriz de transformação afim.
- $bits$ - número de bits do contador, em bits.
- c - velocidade da luz no meio, em m/s.
- c_0 - velocidade da luz no vácuo, em m/s.
- C_1, C_2 - constantes da distribuição de Planck, em $\text{W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$ e $\mu\text{m} \cdot \text{K}$, respectivamente.
- C_7 - capacidade de desacoplamento, em F.
- C_{ext} - capacidade do circuito de base de tempo, em F.
- C_r - capacidade elétrica ressonante, em Faraday (F)
- C_{sn} - capacidade do circuito *snubber*, em F.
- CCD - dispositivo de carga acoplada.
- CI - circuito integrado.
- $CMOS$ - complementary metal-oxide-semiconductor.
- $D1, D2, D3, D4, D5, D6$ - diodos retificadores de proteção.
- D - distância entre suporte do espectrômetro e objeto estudado, em mm.
- $DBCP$ - distância entre o bico de contato e a peça em soldagens MIG/MAG.
- DEP - distância entre o eletrodo e a peça em soldagens TIG.

Disp - variável de controle do botão DISP.

d_i - diâmetro total do indutor, em cm.

dn - diâmetro do núcleo do indutor, em cm.

dt - duração do pulso ressonantes, em ns.

E_b - emissão em todos os comprimentos de onda em todas as direções, em W/m².

$E_{\lambda,b}$ - potência emissiva espectral de um corpo negro, em W/m².μm.

F_{osc} - frequência do cristal oscilador, em Hz.

F_{req} - frequência de acionamento dos diodos laser, em Hz.

f_r - frequência de ressonância, em Hz.

I - corrente elétrica, em A.

$I_C(0)$ - corrente ressonante inicial, em A.

$I_C(s)$ - corrente ressonante no domínio da frequência, em A.

$i_{Cr_{(1)}}(t)$ - corrente ressonante durante o primeiro estágio ressonantes, em A.

$i_{Cr_{(2)}}(t)$ - corrente ressonante durante o segundo estágio ressonantes, em A.

$i_{Cr_{(3)}}(t)$ - corrente ressonante durante o terceiro estágio ressonantes, em A.

$i_{Cr}(t)$ - corrente ressonante no domínio do tempo, em A.

I_{ef} - corrente eficaz, em A.

I_{med} - corrente média, em A.

I_{pico} - corrente de pico, em A.

$i_{pico_{(1)}}(t)$ - corrente de pico do primeiro estágio ressonantes, em Ampères (A).

$i_{pico_{(2)}}(t)$ - corrente de pico do segundo estágio ressonantes, em A.

$i_{pico_{(3)}}(t)$ - corrente de pico do terceiro estágio ressonantes, em A.

$I_{Smais(pico)}$ - corrente de pico sobre a chave Smais, em A.

$I_{Smenos(pico)}$ - corrente de pico sobre a chave Smenos, em A.

k - constante adimensional do circuito de base de tempo.

LED - diodo emissor de luz.

$LedMais, LedMenos, LedZero$ - diodo laser de alta potência.

L_r - indutância elétrica ressonante, em Henry (H).

l_r - comprimento do núcleo do indutor, em cm.

MCU - unidade microcontrolada, microcontrolador.

MIG / MAG - Metal Inert Gas/Metal Active Gas.

MOSFET - transistor de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico.

n - número de espiras do indutor.

nc - número de camadas do indutor.

NIR - infravermelho próximo.

P' - matriz de pixels de uma imagem inclinada.

P - matriz de pixels de uma imagem retificada.

PS - número que indica a pré-escala do contador, em bits.

PWM - modulação por largura de pulso.

R - resistência elétrica, em Ω .

R_α - matriz de transformação de rotação em x.

R_β - matriz de transformação de rotação em z.

R_γ - matriz de transformação de rotação em y.

real_points - matriz de posições dos pontos de controle reais, em cm.

R_{ext} - resistência do circuito de base de tempo, em Ω .

Rpixel - relação entre distância da imagem e correspondente real, em pixel/cm.

R_{sn} - resistência do circuito *snubber*, em Ω .

Smais, Smenos - chaves comutadoras de potência.

T - temperatura absoluta do corpo negro, em Kelvin.

t_0 - tempo inicial do primeiro estágio ressonante, em s.

t_1 - tempo inicial do segundo estágio ressonante, em s.

t_2 - tempo inicial do terceiro estágio ressonante, em s.

t_3 - tempo final do terceiro estágio ressonante, em s.

$$\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} & t_{44} \end{bmatrix}$$
 - matriz de transformação genérica.

T^{-1} - transformada projetiva inversa.

TIG - Tungsten Inert Gas.

TMR - valor inicial atribuído ao contador do *timer 1*.

TTL - lógica transistor-transistor.

$u(t)$ - função degrau unitária no domínio do tempo.

V - tensão elétrica, em V.

$V(s)$ - tensão de entrada do circuito no domínio da frequência, em V.

$V(t)$ - tensão de entrada do circuito no domínio do tempo, em V.

$V_c(0)$ - tensão inicial sobre o capacitor, em V.

$V_c(s)$ - tensão sobre o capacitor ressonante no domínio da frequência, em V.

$V_c(t)$ - tensão sobre o capacitor ressonante no domínio do tempo, em V.

V_{C_0} - tensão inicial do capacitor ressonante, em V.

$v_{Cr_{(1)}}(t)$ - tensão sobre o capacitor ressonante durante o primeiro estágio ressonantes, em V.

$v_{Cr_{(2)}}(t)$ - tensão sobre o capacitor ressonante durante o segundo estágio ressonantes, em V

$v_{Cr_{(3)}}(t)$ - tensão sobre o capacitor ressonante durante o terceiro estágio ressonantes, em V

V_{DC} - nível DC da entrada degrau de tensão, em Volts (V).

V_{LED} - queda de tensão sobre os diodos laser, em V.

$V_{L_r}(t)$ - tensão sobre o indutor ressonante no domínio do tempo, em V.

w_0 -frequência de ressonância, em rad/s.

w_c -frequência do circuito *snubber*, em rad/s.

X', Y', Z' - posição espacial da matriz de pixels em uma imagem inclinada.

X, Y, Z - posição espacial da matriz de pixels em uma imagem retificada.

X_C - reatância capacitiva, em Ω .

X_L - reatância indutiva, em Ω .

Z_r - impedância total ressonante, em Ω .

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Motivação do Trabalho	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Organização da Dissertação.....	3
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Visão em Soldagem.....	5
2.2. Radiação Térmica.....	11
2.3. Circuitos Eletrônicos de Potência	15
2.3.1. Circuitos Resonantes	15
2.3.1.1. Circuito Ressonante em série.....	16
2.3.1.2. Circuito Ressonante em paralelo.....	18
2.3.2. Conversores de Pulso Ressonantes	18
2.4. Imagens Inclinadas.....	19
Capítulo 3 - Metodologia.....	24
3.1. Introdução	24
3.2. Diodo Laser de Alta Potência	25
3.3. Câmera CMOS	26
3.4. Tipo de Sincronia e Iluminação.....	27
3.5. Estimativa de custos.....	29
3.6. Visão Geral do Trabalho	29
Capítulo 4 - Ensaios Preliminares.....	31
4.1. Metodologia Experimental	31
4.2. Resultados e Discussão	36
4.3. Conclusão dos Ensaios Preliminares.....	40

Capítulo 5 - Projeto Do Sistema De Visão	41
5.1. Estratégia Geral.....	41
5.2. Análise Qualitativa da Topologia Ressonante.....	41
5.2.1. Descrição da Topologia	42
5.2.1.1. Primeiro Estágio do Circuito Ressonante	43
5.2.1.2. Segundo Estágio do Circuito Ressonante	44
5.2.1.3. Terceiro Estágio do Circuito Ressonante.....	45
5.3. Análise Quantitativa da Topologia Ressonante.....	46
5.3.1. Equações de Estágio	46
5.3.1.1. Primeiro Estágio do Circuito Ressonante	47
5.3.1.2. Segundo Estágio do Circuito Ressonante	50
5.3.1.3. Terceiro Estágio do Circuito Ressonante.....	53
5.3.2. Dimensionamento dos Semicondutores	55
5.3.2.1. Corrente de Pico na chave Smais	57
5.3.2.2. Corrente de Pico na chave Smenos	58
5.3.2.3. Tensão Reversa em todos os Semicondutores	58
5.4. Circuitos Auxiliares	58
5.4.1. Circuito da Base de Tempo.....	59
5.4.2. Circuito Isolador Galvânico	69
5.4.3. Circuito de Ajuste para a Chave.....	70
5.5. Roteiro de Projeto da Topologia Ressonante.....	71
5.5.1. Requisitos de sistema	71
5.5.2. Cálculo dos Elementos Ressonante C_r e L_r	73
5.5.3. Dimensionamento dos Semicondutores	74
5.5.3.1. Chaves Smais e Smenos	75
5.5.3.2. Diodos D1, D2, D4 e D6	75
5.5.3.3. Diodos D3 e D5	75
5.5.4. Construção do Indutor L_r	76
5.5.5. Escolha do Número de Diodos Laser.....	78

5.5.6. Determinação do circuito snubber.....	80
5.6. Simulação da Topologia Ressonante.....	80
5.7. Projeto do Sistema Óptico	87
5.8. Retificação de Imagens Inclinadas	89
Capítulo 6 - Resultados e Discussão	93
6.1. Validação da Topologia Ressonante.....	93
6.1.1. Teste com LEDs Vermelhos.....	93
6.1.2. Teste de Stress da Topologia Ressonante.....	94
6.1.3. Teste de Longa Duração (Burn-in).....	97
6.1.4. Validação Através das Formas de Onda	98
6.2. Estudo da Emissão do Diodo Laser de Alta Potência	103
6.2.1. Influência do Número de Diodos Laser	103
6.2.2. Emissão Reflexiva do Diodo Laser de Alta Potência	104
6.3. Uso do Sistema de Visão em Soldagem TIG	108
6.4. Uso do Sistema de Visão em Soldagem MIG/MAG	112
6.5. Conclusões Gerais sobre o uso de Sistema de Visão em Soldagens TIG e MIG/MAG	115
Capítulo 7 - Conclusões	116
Capítulo 8 - Trabalhos Futuros	119
Referências Bibliográficas.....	121
Anexo I - Programa De Controle (PIC 18F877A)	129
Anexo II - Programa em MATLAB® para retificação de imagens.....	134
Anexo III - Programa em MATLAB® para cálculo da integral dos espectros	136

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Motivação do Trabalho

A experiência visual é a principal forma que os seres humanos usam para se comunicar com o seu mundo (BOVIK, 2009). Uma tarefa como olhar para um objeto e, instantaneamente, obter dados como o tipo do objeto, cor, localização e orientação, é considerada simples e óbvia para um ser humano comum, porém, a simplicidade da tarefa não está ligada ao fato de ser realmente simples, mas sim que a complexidade dela está encapsulada dentro do cérebro (TAYLOR e KLEEMAN, 2006).

Sendo assim, a visão e sua grande capacidade de captar, processar e interpretar grandes quantidades de dados de natureza visual tem sido, ao longo dos anos, um grande estímulo para o desenvolvimento de técnicas e de dispositivos tecnológicos que a reproduzam um sistema computacional (PEDRINI e SCHWARTZ, 2007). A integração de sensores visuais e equipamentos industriais com o intuito de reproduzir a percepção visual humana em um ou mais de seus aspectos é o que define a visão computacional.

Nos processos de soldagem, a visão pode fornecer dados de diferentes naturezas e para diversos fins. Um especialista pode determinar a qualidade de uma junta soldada pelos seus aspectos visuais, como a presença e características, forma, tamanho, localização e frequência de descontinuidades e defeitos. Normas de regulamentação dos processos de soldagem têm, por exemplo, critérios de aceitação que são obtidos apenas por inspeções visuais.

Quando se fala de uma empresa, ou uma indústria com produtos soldados, é esperado da parte de seus clientes um produto soldado com qualidade e no tempo

determinado. Uma das formas de se exceder às expectativas de seus clientes, de forma pró-ativa, com um sistema flexível e adaptativo de soldagem, e evitar as maiores causas de uma baixa produtividade em soldagem é através do uso de sensores de visão a laser para localização de juntas, seguidores de juntas e inspeção autônoma de soldas (NORUK, 2011).

A visão está presente, também, no monitoramento de parâmetros de soldagem. Um soldador experiente utiliza de sua percepção visual para monitorar, por exemplo, o formato de poça fundida, a distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) e, através desses dados visuais, corrigir o que for necessário para se obter um cordão de solda de maior qualidade. Mesmo em soldagens automatizadas, é comum que o operador monitore visualmente o tamanho do arco ou mesmo precise fazer correções na trajetória da tocha, como, por exemplo, por desalinhamento da montagem da junta em soldagem de tubulações, como ilustra a Figura 1.1.



Figura 1.1 - Monitoramento visual de soldagens em tubulações.

A importância dos processos de soldagem e a complexidade de seus parâmetros interdependentes fazem com que, pela busca de qualidade, muitos trabalhos de pesquisa sejam desenvolvidos com o intuito de alcançar um melhor entendimento de seus fenômenos envolvidos. A visualização da poça fundida durante a soldagem pode fornecer diversas informações sobre a física envolvida no processo. Porém, a radiação luminosa emitida pelo arco, que se sabe ser de alta intensidade e abranger praticamente todo o espectro de luz, pode representar uma barreira para esses estudos visuais.

Existem diversas técnicas utilizadas para se obter a visualização do processo de soldagem, sem que haja interferência do arco, ou que a minimize. Um destas consiste em iluminar o processo com uma luz em infravermelho próximo (NIR) e, utilizar filtros passa-faixa, em torno deste mesmo comprimento de onda, durante a aquisição das imagens. A intensidade luminosa da fonte infravermelha deve superar a

intensidade da luz provinda do arco de soldagem durante o tempo de abertura do sensor óptico para a aquisição das imagens. Recentemente, componentes eletrônicos chamados diodos laser têm se mostrado vantajosos para este tipo de iluminação infravermelha, com seu baixo custo e menor complexidade de instalação, quando comparados aos lasers tradicionais, e maior potência luminosa, quando comparados aos diodos emissores de luz (LEDs - *light emitting diodes*).

1.2. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo principal o desenvolvimento de um sistema de visão para processos de soldagem a arco, ou seja, um sistema capaz de visualizar a poça e arredores (junta e eletrodo) durante a soldagem sem interferência da radiação luminosa do arco elétrico, através da utilização de diodos laser de alta potência no infravermelho próximo como iluminação de auxílio, de baixo custo e flexível.

Como objetivos secundários, tem-se:

- Caracterização dos espectros de emissão luminosa do arco do processo de soldagem;
- Criação de uma topologia de acionamento para o diodo de alta potência no infravermelho próximo, respeitando suas limitações de uso e maximizando a potência luminosa emitida;
- Criação dos circuitos de controle;
- Escolha dos equipamentos e componentes ópticos;
- Projeto e aplicação de um protótipo em processos de soldagens TIG (Tungsten Inert Gas) e MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas).

1.3. Organização da Dissertação

Neste Capítulo I são abordadas as motivações para a realização deste trabalho, seus objetivos principais e secundários e a organização da dissertação.

No Capítulo II é realizada uma revisão bibliográfica dos tópicos teóricos pertinentes ao desenvolvimento do trabalho como um todo: visão em soldagem, radiação térmica, uma introdução aos circuitos ressonantes e, por fim, fotografias inclinadas.

No Capítulo III é apresentada uma visão geral do trabalho, assim como os componentes chaves (diodo laser e câmera) para o desenvolvimento do projeto do sistema de visão proposto inicialmente.

No Capítulo IV tem-se a descrição do estudo preliminar realizado em soldagens TIG e MIG/MAG, para a caracterização da emissão luminosa destes processos no infravermelho próximo, com ênfase na região de emissão do diodo laser e a influência do tipo de processo, da intensidade de corrente e do gás de proteção sobre esta emissão.

No Capítulo V é realizado o desenvolvimento do projeto do sistema de visão por diodos laser no infravermelho próximo para sua aplicação em processos de soldagem, desde sua caracterização analítica, simulação computacional de seu comportamento e roteiro de escolha de seus principais componentes. É apresentado, também, o projeto do sistema óptico e o algoritmo de retificação de imagens.

No Capítulo VI são apresentados os resultados experimentais do protótipo construído, desde a validação da topologia de acionamento dos diodos laser pelas formas de onda características dos principais componentes elétricos, assim como com testes realizados em soldagens TIG e MIG/MAG.

No Capítulo VII são apresentadas as conclusões principais de todo o trabalho desenvolvido.

No Capítulo VIII são sugeridas linhas de pensamento para o desenvolvimento de trabalhos futuros, de acordo com os resultados gerais obtidos.

Nas Referências Bibliográficas são listadas todas as referências das citações realizadas ao longo do trabalho.

Nos Anexos são detalhados todos os algoritmos implementados para a obtenção do controle de acionamento dos doidos laser, para a realização da retificação de imagens inclinadas e para a obtenção dos valores de energia luminosa (integral) para um espectro.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Visão em Soldagem

A soldagem é um dos principais processos de fabricação utilizados na indústria para a união de materiais, principalmente os metais, sendo cada vez mais necessária e mais empregada. Tendo isto em vista, a necessidade da garantia de qualidade e produtividade dos processos envolvidos nesta tarefa está em constante crescimento. Sendo um processo especial (ISO3834, 2005), com parâmetros interdependentes, muitos trabalhos de pesquisa são desenvolvidos com o intuito de alcançar um melhor entendimento de seus fenômenos envolvidos.

Uma das formas amplamente aplicadas, atualmente, para o auxílio dos estudos do processo de soldagem são os sistemas de visão. O uso de câmeras, de baixa ou alta velocidade, pode fornecer diversas informações úteis aos pesquisadores, que não são possíveis de se obter com a monitoração dos sinais elétricos usuais, como a corrente ou a tensão.

Apesar da grande aplicação atual, a ideia do uso de um sistema de visão já é disseminada desde tempos anteriores à fotografia digital. O primeiro trabalho conhecido nesta área (WALL e STEPHENS, 1969; ISHIDE *et al.*, 1988) utilizou-se de um sistema composto de uma câmera analógica de TV e um monitor de TV e projeção de luz através de fibras ópticas para a aplicação de um seguidor de juntas em soldagem. Ainda nesta época, explorou-se pela primeira vez a ideia de iluminação em um espectro específico ($0,63 \mu\text{m}$) e a aquisição de imagens com um filtro de interferência (“passa banda”), melhorando o contraste da imagem e diminuindo a luz provinda do arco (ISHIDE *et al.*, 1988).

Diferentes sistemas de visão podem fornecer informações específicas sobre o processo em andamento. Por exemplo, a técnica de perfilografia ou *back-lighting* (projeção da sombra de elementos na região da solda em uma superfície plana, mostrada na Figura 2.1) visualiza as gotas em transferência como uma forma de estudo da transferência metálica (BÁLSAMO *et al.*, 2000), enquanto novos sistemas de visão têm como o objetivo a visualização direta do metal fundido e da junta propriamente dita (Figura 2.2) com uma gama de aplicações indo de estudo dos fenômenos na poça até seguidores de junta ou controladores *online* de parâmetros do processo.

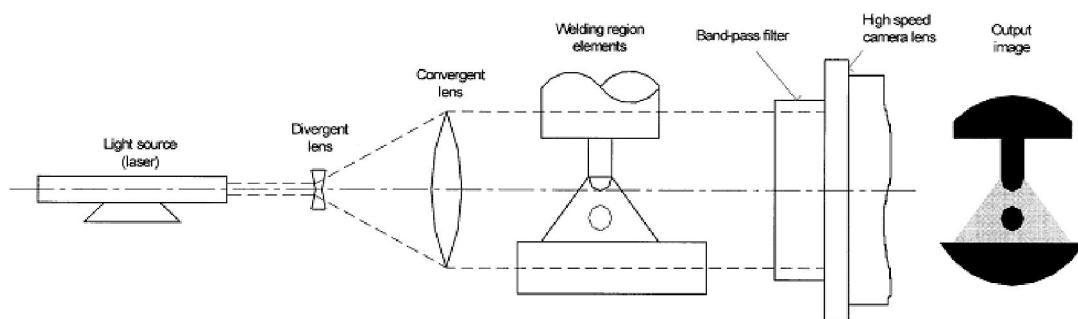


Figura 2.1 – Visualização da transferência metálica por perfilografia (BÁLSAMO *et al.*, 2000).

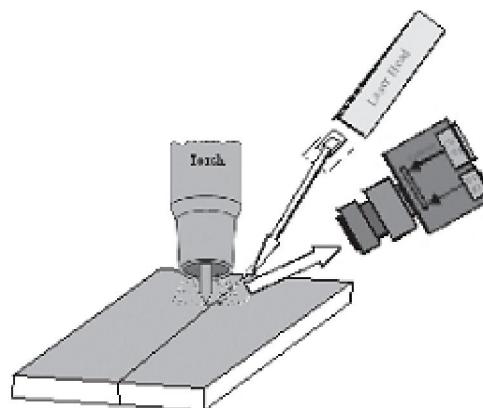


Figura 2.2 – Visualização do metal fundido por iluminação indireta (HOUGHTON *et al.*, 2007).

Diversos estudos foram realizados para a obtenção de imagens diretas da poça fundida, minimizando a luz provinda do arco com o uso de filtros de interferência (“passa-banda”) em diferentes comprimentos de onda. Alguns dos primeiros trabalhos para visualização direta da poça (OGAWA, 1999; OGAWA e MORITA, 1999) utilizaram-se de filtros ópticos em torno de 950 nm para o estudo do efeito do gás de proteção e do arame para soldagens MIG (Figura 2.3) e estudo do comportamento da poça para soldagens TIG.

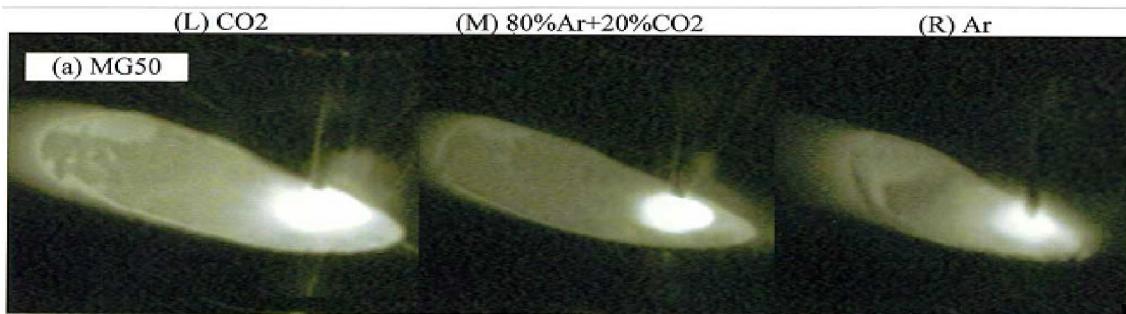


Figura 2.3 – Imagens obtidas com filtro em 950 nm no estudo do processo MIG (OGAWA e MORITA, 1999).

Uma visualização nítida da superfície da poça fundida e sua deformação retêm informações importantes de vários fenômenos básicos, como o fluxo de Marangoni dentro da poça de soldagem, o recuo da pressão devido à vaporização metálica, entre outros (DUFFEY *et al.*, 1995).

Como uma forma de evitar a radiação luminosa abundante presente no arco de solda, muitos estudos (SMITH *et al.*, 2004; BALFOUR *et al.*, 2006; ELOUARDI *et al.*, 2006; FRANCO, 2007) optaram pela sincronização da obtenção da imagem com o momento do curto-circuito no processo MIG/MAG, em conjunto com filtros ópticos e processamento de imagens para o controle *online* da largura da poça fundida. Wu *et al.* (2010) utiliza a técnica de sincronia com o momento de arco apagado para o estudo do processo MIG.

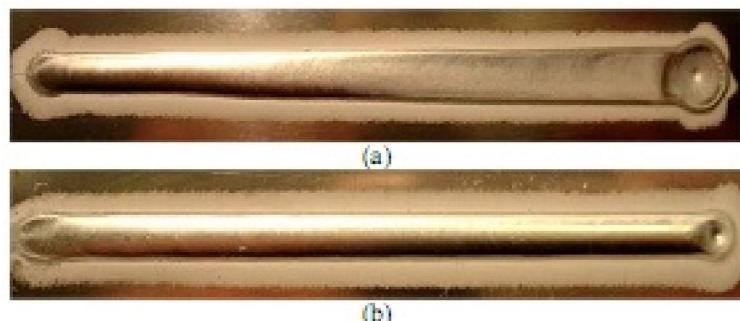


Figura 2.4 – Cordões de solda TIG (a) sem controle (b) com controle *online* de largura da poça fundida (SMITH *et al.*, 2004)

A visualização da poça fundida pode dar informações sobre muitos aspectos da solda. Boa parte dos estudos realizados (ZHANG *et al.*, 1995; ZHANG *et al.*, 1996; SAEED *et al.*, 2005b; BASKORO *et al.*, 2008; MAO e KATSUKI, 2008; ONISHI *et al.*, 2008; ZHANG, 2008; CHEN *et al.*, 2009) comprovam que a observação e o controle da poça fundida, e suas principais características, ou mesmo no controle de parâmetros de soldagem como velocidade de soldagem e ângulo de tecimento, resulta na penetração e propriedades

mecânicas desejadas, por outro lado Hara *et al.* (2008) propuseram um sistema de controle de penetração por um parâmetro estabelecido pelos autores, chamado de frequência natural, e pela largura da poça fundida.

Em aplicações mais isoladas de sistemas de visão, existem trabalhos para a observação direção do fluxo da poça fundida e seus efeitos na distribuição da escória ao longo do cordão (UMEHARA *et al.*, 2008), estudo da adição de arame quente em processo de soldagem TIG e Laser (SHINOZAKI *et al.*, 2010), reconstrução 3D da poça fundida em MIG pulsado pela sincronia com a corrente de base (ZHANG, G. *et al.*, 2006), determinação da distribuição de temperatura na poça fundida para TIG e MIG curto-círcuito (OKAGAITO *et al.*, 2004; YAMAZAKI *et al.*, 2010), uso de sensores infravermelhos no monitoramento de processo de soldagem com a chapa inclinada (FAN *et al.*, 2003), projeção do perfil do cordão através de iluminação a laser como estudo inicial para replicar computacionalmente as habilidades de um soldador (SAEED *et al.*, 2005a) ou obtenção de penetração total da poça (ZHANG, Y. M. *et al.*, 2006).

Já no trabalho de (SILVA, 1997), projetou-se um sistema de visão para controle horizontal e vertical de trajetórias para soldagem multipasses através da detecção de juntas (tratamento de imagens) obtidas por um sistema de câmera CCD (dispositivo de carga acoplada) e framegrabber. Já outros autores (SUNG *et al.*, 2009) obtiveram bons resultados para soldas com velocidades de soldagem de até 20 m/min através de um seguidor de juntas pela projeção de linhas de laser e uso de câmera CCD em conjunto com tratamento de imagens. A Figura 2.5 ilustra os princípios dos dois tipos de seguidores de juntas.

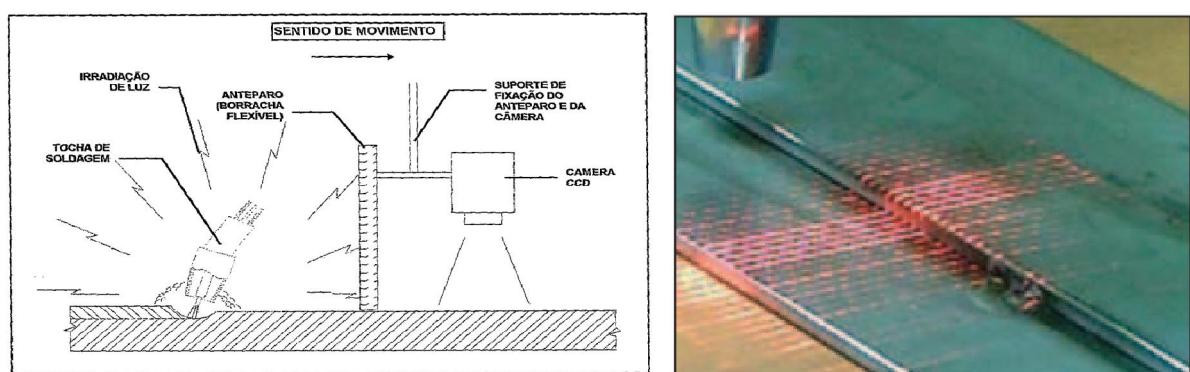


Figura 2.5 – Esquerda: controle de soldagens multipasses (SILVA, 1997) e Direita:seguidor de junta a laser (SUNG *et al.*, 2009).

Com o objetivo de melhoria da qualidade dos processos, estudos (CANTOR *et al.*, 2007; BOILLOT e NORUK, 2008; NORUK, 2011) procuram a obtenção de processos de soldagem com controles adaptativos, diminuindo os custos das práticas pós-soldagem, ou

mesmo sistemas de reparos de cordões de solda através de visão em conjunto com geração de programas para o uso de robôs. Sistemas inteligentes garantem a qualidade da solda durante e após o processo de fabricação, gerando grande economia e processos de soldagem mais “verdes”.

A melhor forma de se obter uma imagem da solda em um sistema de visão é iluminando o sistema de alguma forma, atentando-se para a frequência, amplitude e direção da radiação utilizada. Dentro dos possíveis candidatos tem-se a luz branca, UV, luz colorida ou lasers (BARNETT *et al.*, 1995). Diferentes autores optaram por iluminações distintas de seus sistemas seguidores de juntas: para a máxima emissão e máxima resolução de radiação, optou-se pelo comprimento de onda em 1,46 µm em soldagens TIG e MIG/MAG (LI *et al.*, 1992) e o uso de uma lâmpada de tungstênio integrada com lógica fuzzy para correção automática da trajetória (SHI e WANG, 2006), sempre com o uso de um filtro óptico no mesmo espectro de emissão da fonte de iluminação.

Para que a radiação luminosa do arco não seja um problema durante a aquisição de imagens, pode-se, também utilizar a técnica de Iluminação a Laser com Filtragem de Espectro. Segundo Houghton *et al.* (2007), o princípio da técnica é diminuir ou eliminar totalmente a luz do arco que alcança a câmera iluminando a área de solda com a luz de um laser. A fim de minimizar os requerimentos de força da iluminação, o comprimento de luz da fonte de iluminação deve ser selecionado onde a intensidade do arco é baixa. Um filtro passa banda estreito (filtro de interferência) é necessário para eliminar a luz do arco e apenas a luz do laser será capaz de alcançar a câmera, como mostra a Figura 2.6.

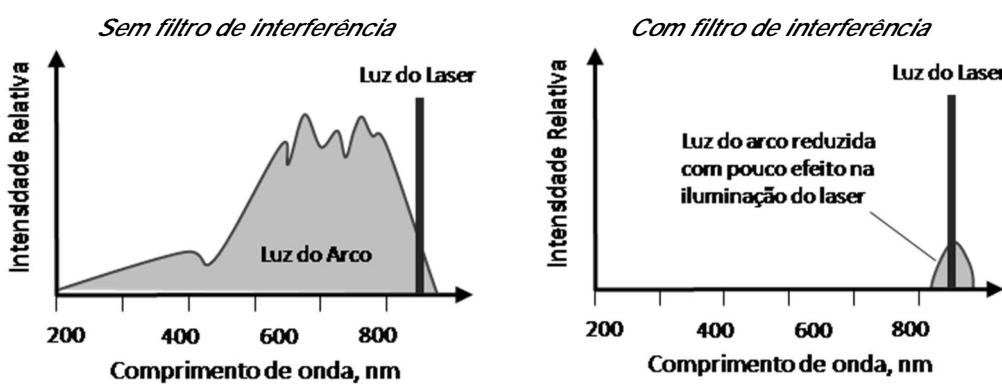


Figura 2.6 – Princípio da Filtragem do Espectro (Houghton *et al.*, 2007).

O tempo de abertura da câmera também influencia na quantidade de luz adquirida durante a aquisição da imagem. Sendo assim, pode-se diminuir a intensidade luminosa do arco diminuindo o tempo de abertura (*shutter*) de cada quadro capturado. Pulsando-se o laser dentro de cada tempo de abertura faz com que uma potência mínima seja necessária para que a luz do laser se sobreponha à radiação do arco, desde que o pulso do laser se

situe dentro do tempo de abertura da câmera a cada quadro adquirido, como pode ser visto na Figura 2.7.

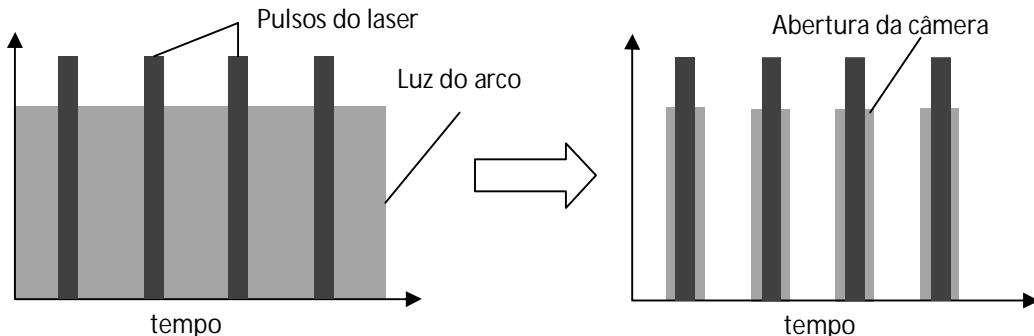


Figura 2.7 – Ajuste do tempo de abertura da câmera para minimização da potência aplicada ao laser pulsado em comparação à natureza contínua da radiação do arco .

Segundo trabalhos de Abdullah *et al* (2007, 2008), três fontes de iluminação diferentes podem ser utilizadas para a iluminação da poça fundida: sistemas de laser, diodos LED e diodos laser. Os sistemas de laser, como, por exemplo, o laser de Nd-Yag, produz potência suficiente para iluminar a poça fundida, entretanto são sistemas caros e de menor flexibilidade. Os diodos LED são produtos de baixo custo e possuem uma grande gama disponível comercialmente, porém, não produzem potência luminosa suficiente para iluminar poça fundida. Já os diodos laser têm várias características que determinam sua utilidade como uma iluminação alternativa ao laser em si, sendo de menor custo e possuindo potência suficiente quando se utilizado em conjunto, como pode ser visto na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Características de diodos LED e Diodos Laser (ABDULLAH *et al*, 2007; ABDULLAH *et al*, 2008)

Característica	Diodos LED	Diodos Laser de alta potência
Corrente	50 a 100 mA	5 a 40 A
Potência	Menos de 1 W	50 W a 250 W
Ângulo de abertura	Maior que 40º	10º a 25º
Comprimento de Onda Disponível	0,66 a 1,65 µm	0,78 a 1,65 µm
Largura do Espectro	Larga (40-190 nm FWHW)	Estreita (7-10 nm FWHM)
Custo	Menos de £2	£15 a £400
Largura do Pulso	Maior que 100 µs	Menor que 100 ns

Trabalhos recentes (VILARINHO *et al.*, 2009; VILARINHO *et al.*, 2010) mostram a aplicabilidade do uso de diodos laser de alta potência no infravermelho próximo para sistemas de visão em processo de soldagem. A intensidade luminosa emitida pelo arco de soldagem, em comprimentos de onda infravermelha superiores a 850 nm, é pequena quando comparada ao espectro visível. A Figura 2.8 ilustra resultados obtidos neste tipo de técnica de iluminação.

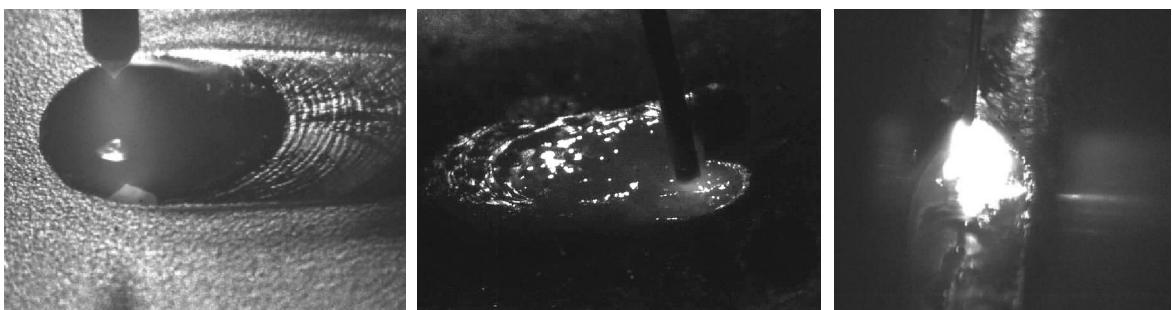


Figura 2.8 – Sistema de visão com diodos laser de alta potência no infravermelho para TIG (esquerda) e MIG/MAG (centro e direita) (VILARINHO *et al.*, 2009; VILARINHO *et al.*, 2010).

2.2. Radiação Térmica

Existem três processos através dos quais o calor passa de um lugar para outro: por condução (transferência de calor que ocorre através do meio), por convecção (transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento) e, por radiação térmica (transferência de calor por emissão de energia na forma de ondas eletromagnéticas) (DONOSO, 2010).

Em específico, o mecanismo de emissão da radiação luminosa é relacionado com a energia liberada como resultado das oscilações ou transições dos muitos elétrons que constituem a matéria. Essas oscilações são, por sua vez, sustentadas pela energia interna, e consequentemente, pela temperatura da matéria. Então, deve-se associar a emissão de radiação térmica com condições excitantes termicamente dentro da matéria (INCROPERA *et al.*, 2002). Sempre que as partículas atômicas e subatômicas estiverem em movimento, a radiação infravermelha será emitida pela matéria (VANZETTI, 1972)

Atribui-se à radiação as propriedades padrões de ondas, como frequência ν e comprimento de onda λ . Para a propagação da radiação em um determinado meio, tem-se:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.1)$$

Onde c é a velocidade da luz no meio. Para a propagação no vácuo, $c_0 = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$. A unidade do comprimento de onda é, usualmente, o μm , e o espectro eletromagnético é ilustrado na Figura 2.9.

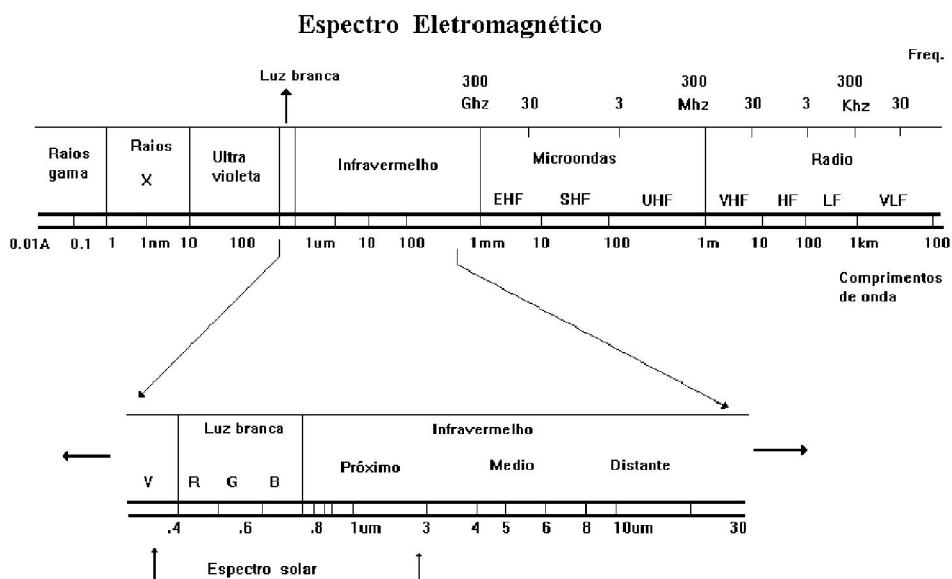


Figura 2.9 – Espectro da radiação eletromagnética (WALDER, 2011).

Na porção intermediária do espectro, variando de aproximadamente 0,1 a 100 μm , incluindo uma porção de luz ultravioleta (UV), toda a radiação visível e infravermelha (IR) é chamada de radiação térmica, já que esta afeta e sofre influência do estado térmico (temperatura). Radiação que sai de uma superfície pode propagar em todas as direções possíveis, e geralmente é importante conhecer esta distribuição direcional.

Um corpo negro é, por definição, aquele que é um perfeito emissor e absorvedor. A potência emissiva espectral de um corpo negro é dada por:

$$E_{\lambda,T}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (2.2)$$

Onde T é a temperatura absoluta do corpo negro (K), e as constantes $C_1 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$ e $C_2 = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$.

Esta equação, conhecida como distribuição de Planck, deixa importantes características a serem observadas:

- A emissão de radiação varia continuamente com o comprimento de onda;

- Em qualquer comprimento de onda a magnitude da emissão aumenta com o aumento da temperatura;
- A região espectral que a radiação se concentra depende da temperatura, com comparativamente mais radiação aparecendo em menores comprimentos de onda com o aumento da temperatura;
- Uma fração significativa da radiação que é emitida pelo Sol, que pode ser aproximado a um corpo negro em 5800 K, está no espectro visível. Em contraste, para temperaturas menores de 800 K a emissão é predominantemente na região infravermelha do espectro e não é visível ao olho humano.

A Figura 2.10 ilustra a distribuição de Planck para certas temperaturas.

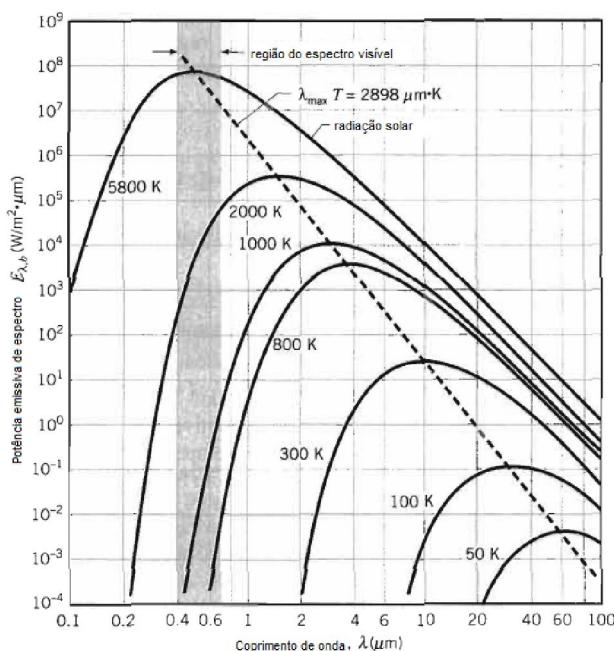


Figura 2.10 – Potência emissiva de espectro para corpos negros (INCROPERA *et al.*, 2002).

Observa-se que a distribuição no espectro de um corpo negro tem um máximo e o comprimento de onda correspondente a este depende da temperatura. A natureza desta relação é dada pela lei de Wien:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2898 \mu m \cdot K \quad (2.3)$$

Para possibilitar o cálculo da quantidade de radiação emitida em todas as direções e em todos os comprimentos de onda apenas pela temperatura do corpo negro é dada pela lei de Stefan-Boltzman:

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad (2.4)$$

Onde $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

Através da noção de emissão em corpos negros, é possível considerar, agora, o comportamento de superfícies reais. É conveniente escolher um corpo negro como referência para descrição da emissão de uma superfície real, porém, é importante saber que, em geral, a radiação espectral emitida por uma superfície real difere da distribuição de Planck.

A emissividade espectral para superfícies reais varia de acordo com comprimento de onda, dependendo ainda se o sólido é condutor ou não, e a natureza de seu tratamento superficial. Distribuições representativas da emissividade em função do comprimento de onda são mostradas na Figura 2.11 e a emissividade total em relação à temperatura é mostrada na Figura 2.12.

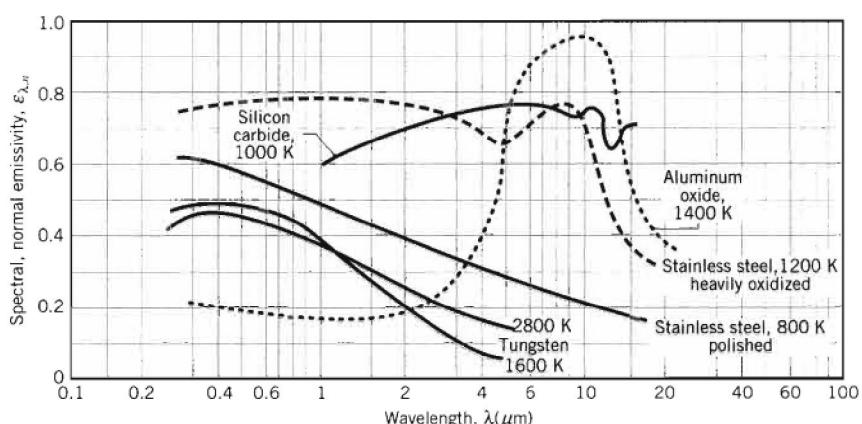


Figura 2.11 – Dependência do comprimento de onda na emissividade de certos materiais (INCROPERA *et al.*, 2002).

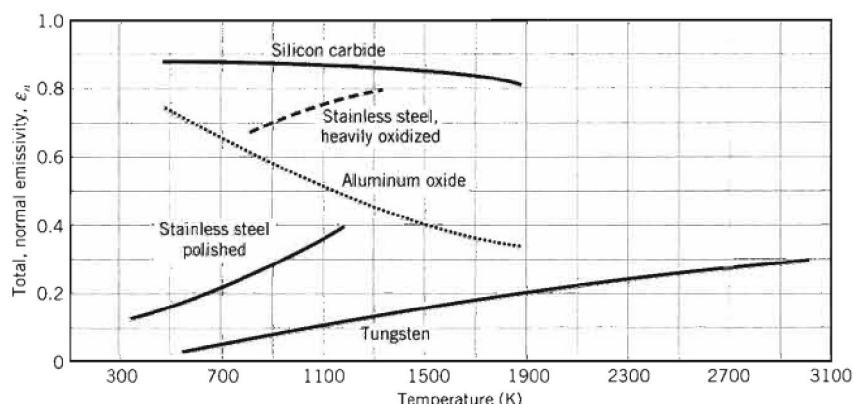


Figura 2.12 – Dependência de temperatura na emissividade de certos materiais (INCROPERA *et al.*, 2002).

2.3. Circuitos Eletrônicos de Potência

A eletrônica de potência combina potência, eletrônica e controle. O controle trata das características dinâmicas e de regime permanente dos sistemas de malha fechada. A potência cuida de equipamentos de potência rotativos e estáticos para a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A eletrônica trata dos dispositivos e circuitos de estado sólido para o processamento de sinais que permitam alcançar os objetivos de controle desejados. Portanto, define-se a eletrônica de potência como a aplicação da eletrônica de estado sólido para o controle e conversão da energia elétrica. (RASHID, 1999)

O chaveamento de dispositivos semicondutores de potência é a base para a eletrônica de potência. Com o desenvolvimento de tecnologias dos semicondutores de potência, as capacidades nominais e a velocidade de chaveamento dos dispositivos de potência melhoraram enormemente e o desenvolvimento da tecnologia de microprocessadores/microcontroladores teve grande impacto na sintetização da estratégia de controle para os semicondutores de potência.

Para o controle ou o condicionamento de energia elétrica, a conversão de potência elétrica de uma forma para a outra é necessária, e as características de chaveamento dos dispositivos de potência permitem essas conversões. Os conversores estáticos de energia realizam essas funções de conversão de potência. Os circuitos de eletrônica de potência podem ser classificados em seis tipos (RASHID, 1999): retificadores com diodos, conversores CA-CC (corrente alternada – corrente constante), conversores CA-CA (controladores de tensão CA), conversores CC-CC (*choppers*), conversores CC-CA (inversores) e chaves estáticas.

2.3.1. Circuitos Ressonantes

O circuito ressonante é uma combinação de elementos R, C, e L que possui uma resposta em frequência característica, como ilustrado na Figura 2.13.

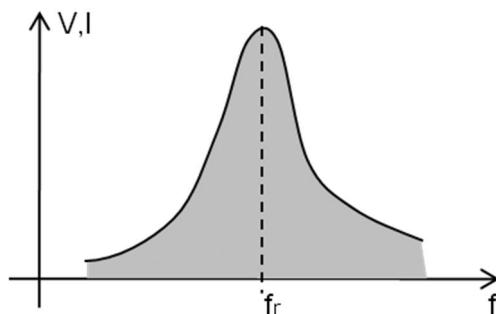


Figura 2.13 – Curva de Ressonância.

Observa-se que a resposta é máxima para a frequência f_r e, em frequências distantes, à direita ou à esquerda, têm valores de tensão ou corrente muito pequenos, sendo que, para fins práticos, possuem pouca influência na resposta do sistema.

Um circuito ressonante elétrico precisa ter tanto indutância quanto capacidade. Além disso, uma resistência sempre está presente, seja porque não existem capacitores ou indutores ideais, ou para controlar a forma da curva de ressonância. Quando a ressonância ocorre devido à aplicação da frequência adequada, a energia armazenada em um elemento reativo é igual à fornecida pelo outro elemento reativo do sistema. Em outras palavras, a energia oscila entre um elemento reativo e outro. Portanto, uma vez que um sistema ideal (C e L puros) atinge um estado de ressonância, ele não precisa mais de energia, pois seria autossustentável (BOYLESTAD, 2004). Em um circuito real existe alguma resistência presente nos elementos reativos que produz um eventual “amortecimento” das oscilações entre os elementos reativos.

2.3.1.1. Circuito Ressonante em série

As configurações básicas para um circuito ressonante em série são mostradas na Figura 2.14.

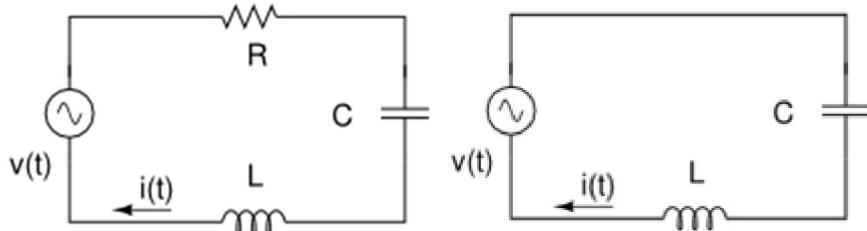


Figura 2.14 –Círculo ressonante em série: RLC (esquerda) e LC (direita).

A condição de ressonância para um circuito ressonante ocorre quando, já citado anteriormente, não se necessita de energia reativa, ou seja, a reatância indutiva (χ_L) se iguala à reatância capacitativa do circuito (χ_C):

$$\chi_L = \chi_C \quad (2.5)$$

Sabe-se, pela teoria de circuitos que:

$$\chi_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad e \quad \chi_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (2.6)$$

Substituindo as relações da Eq. (2.6) na Eq. (2.5) e isolando-se do termo da frequência (f), pode-se concluir que a frequência de ressonância f_r é:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (2.7)$$

Um circuito ressonante em série tem, em sua frequência de ressonância, o menor valor possível para a impedância equivalente, resultado em um valor máximo de pico de corrente. O resistor em série, para os circuitos RLC, fornece um amortecimento da oscilação de energia entre os elementos ressonantes.

Pela somatória de tensões em uma malha fechada, tem-se que:

$$V(\lambda) = R \cdot I(\lambda) + V_c(\lambda) + L_r \cdot \frac{d[I(\lambda)]}{dt} \quad (2.8)$$

Aplicando a transformada de Laplace na Eq. (2.8):

$$V(s) = R \cdot I(s) + V_c(s) + L_r [s \cdot I(s) - I(0)] \quad (2.9)$$

Sabe-se que:

$$I(s) = C \cdot [s \cdot V_c(s) - V_c(0)] \quad (2.10)$$

Aplica-se a Eq. (2.10) na Eq. (2.9) e considerando as condições iniciais nulas, tem-se a seguinte equação da corrente:

$$I(s) = \frac{s \cdot V(s)}{Z_r \cdot \left(s^2 + \frac{R}{L} s + \frac{1}{LC} \right)} \quad (2.11)$$

E, para o circuito ressonante em série LC:

$$I(s) = \frac{s \cdot V(s)}{Z_r \cdot \left(s^2 + \frac{1}{LC} \right)} \quad (2.12)$$

Considerando uma entrada degrau $v(t) = V_{DC} \cdot u(t)$, e realizando a transformada inversa de Laplace, tem-se que a corrente se comporta de forma senoidal para o circuito LC e para o circuito RLC.

$$\lambda_{RLC} = \frac{V_{DC}}{Z_r} \cdot \sin(2\pi f_r) \quad \text{e} \quad \lambda_{LC} = \frac{V_{DC}}{Z_r} \cdot \sin(2\pi f_r) \quad (2.13)$$

2.3.1.2. Circuito Ressonante em paralelo

A configuração básica para um circuito ressonante em paralelo é mostrada na Figura 2.15.

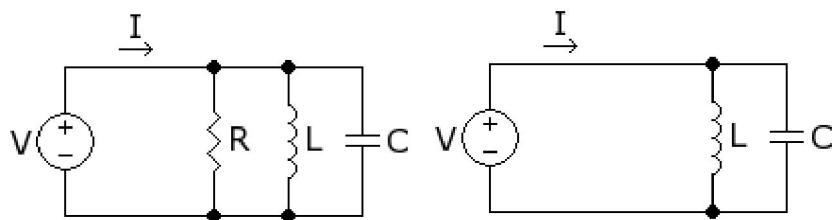


Figura 2.15 –Circuito ressonante em paralelo: RLC (esquerda) e LC (direita).

Assim como o circuito ressonante em série, a frequência de ressonância para o circuito ressonante em paralelo é obtida quando as reatâncias indutiva e capacitativa se igualam. Sendo assim, a frequência de ressonância para o circuito em paralelo é definida pela Eq. (2.7).

Um circuito ressonante em paralelo tem, em sua frequência de ressonância, o maior valor possível para a impedância equivalente, resultando em um valor máximo de pico de tensão. O resistor em paralelo, para os circuitos RLC, fornece um amortecimento da oscilação por dissipação de energia ressonante entre os elementos ressonantes.

2.3.2. Conversores de Pulso Ressonantes

Os dispositivos em conversores com um controle PWM (modulação por largura de pulso - aqueles em que os dispositivos são apenas “ligados” ou “desligados” na corrente para a carga) podem ser acionados para sintetizar a forma desejada da tensão e/ou corrente de saída. Entretanto, devido a altos di/dt e dv/dt , submetem as chaves a um esforço de tensão elevada, causando perdas de potência por chaveamento, essas aumentando linearmente com a frequência, e produzem interferência eletromagnética.

As desvantagens do controle PWM podem ser eliminadas ou minimizadas se os dispositivos forem “ligados” e “desligados” quando a tensão sobre um dispositivo e/ou sua corrente tornar-se zero.

Circuitos de pulso ressonantes, devido a sua característica natural, provocam a queda a zero da corrente e/ou da tensão através dos dispositivos de chaveamento. Este tipo de conversor produz uma forma de onda aproximadamente senoidal em uma alta frequência de saída e, em geral, é usado em aplicações de saída relativamente fixa, como, por exemplo, aquecimento indutivo, sonares, iluminação ou geradores ultrassônicos. Devido à alta frequência de chaveamento, o tamanho dos componentes de comutação é pequeno.

2.4. Imagens Inclinadas

Uma imagem digital pode ser definida como uma função de intensidade luminosa denotada $f(x,y)$ cujo valor ou amplitude nas coordenadas espaciais (x,y) fornece a intensidade ou o brilho da imagem naquele ponto. A Figura 2.16 mostra uma imagem e a orientação do sistema de coordenadas. Por convenção, adota-se a origem da imagem em seu canto superior esquerdo.



Figura 2.16 – Convenção do sistema de coordenadas para representação de imagens digitais.

Uma das formas de se classificar imagens é quanto à inclinação da câmera fotográfica. Neste contexto em particular, as imagens podem ser classificadas em verticais ou inclinadas. Uma imagem é dita vertical quando, no momento de sua aquisição, o eixo óptico da câmera estava apontado verticalmente {Disperati, 1995 #38}, ou seja, seu eixo é coincidente com o eixo ortogonal ao plano que se deseja fotografar.

Imagens inclinadas são, por definição, imagens obtidas com o eixo ótico da câmera fotográfica dirigido, intencionalmente ou não, para qualquer posição entre a horizontal e a vertical, ou seja, com a câmera posicionada obliquamente (DISPERATI, 1995), como mostra a Figura 2.17.

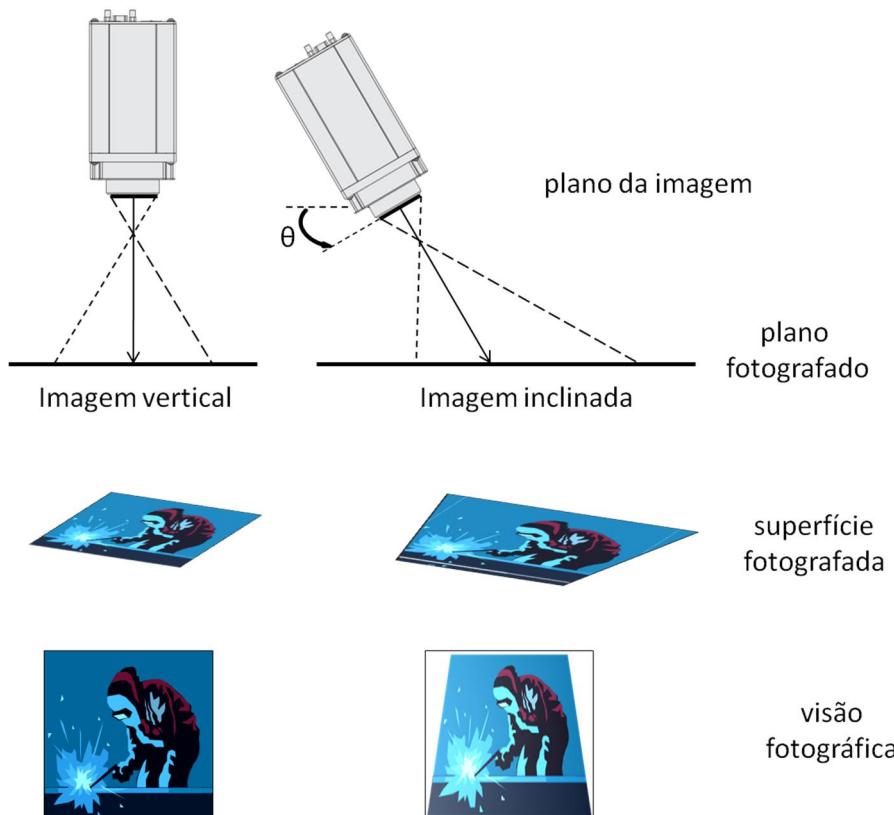


Figura 2.17 – Características das imagens vertical e inclinada.

Observa-se, na imagem anterior, a posição das câmeras para a tomada de imagens vertical e inclinada e, também, esquematicamente, a área do plano de interesse (um soldador realizado uma soldagem) coberta pelos tipos de imagens, assim como as imagens correspondentes no plano da imagem (visão fotográfica). Considerou-se, neste caso, uma imagem de tamanho quadrado.

Como pode ser observado pela figura, quando se inclina a câmera em determinado ângulo, a área coberta no plano fotografado é maior e seu formato trapezoidal é distorcido do formato quadrangular resultante da fotografia exatamente vertical. Isso resulta em uma imagem adquirida pela câmera com distorções ao longo de sua área fotografada e, quanto maior o ângulo de inclinação, maior será a distorção observada na imagem adquirida. A distorção impede que, por exemplo, a imagem tenha sua escala linear, não sendo possível a realização de medições diretamente da imagem obtida.

Para a recuperação das características principais da imagem e obtenção de uma escala única ao longo de toda a extensão desta, deve-se realizar o que se chama de retificação de imagens. A retificação de fotografias analógicas pode ser realizada com métodos gráficos, analíticos ou óptico-mecânicos (SLAMA, 1980) e, no caso de imagens digitais, existem técnicas de processamento computacional de imagens que possibilitam a transformação da imagem inclinada em vertical, como a transformação projetiva.

Todas as transformações de rotação, translação, escalas uniforme e não uniforme, deformação paralela, perspectiva e composição de projeções lineares, são permitidas na transformação projetiva, que preserva a colinearidade entre os pontos e linhas retas, incidência (posição do ponto numa linha) e as razões de proporções chamadas de harmônicos (DA SILVA, 2006).

A retificação de imagens é realizada a partir do conhecimento dos elementos de orientação exterior, cujos valores permitem a recuperação da posição e atitude da imagem segundo um referencial geodésico utilizado nos mapeamentos. Os elementos de orientação exterior podem ser determinados por vários procedimentos, no caso de uma única foto é denominada de ressecção espacial (HASEGAWA e DE ARRUDA JUNIOR, 2004).

Considera-se, em uma situação real e tridimensional, que a câmera fotográfica pode ser inclinada em relação ao plano fotografado em cada um dos eixos de referência, ou na combinação deles. A título de padronização, chamam-se os ângulos α , β e γ os ângulos de rotação em relação aos eixos x, y e z, respectivamente, como ilustra a Figura 2.18.

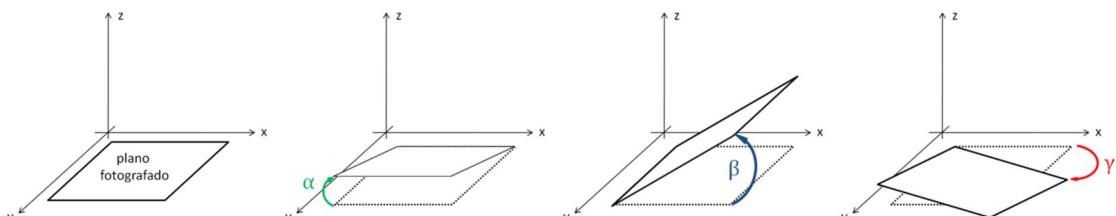


Figura 2.18 – Ângulos medidos para cada eixo de rotação.

De acordo com Pedrini e Schwartz (2007), para o mapeamento indireto, a transformação homogênea (T^{-1}) da imagem inclinada (P') para a imagem vertical (P) pode ser representada como:

$$P = T^{-1}P' \quad (2.14)$$

Esta garante que todos os pontos da imagem transformada terão um pixel associado à imagem original. Contudo, diferentes pixels da imagem resultante podem ser mapeados em um único pixel da imagem original.

Uma transformação homogênea espacial, dada, por exemplo, pela Eq. (2.14), normalmente é expressa em notação matricial, ou seja:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} & t_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

A rotação de um ponto em torno do eixo x por um ângulo α é realizada pela matriz de transformação:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

A rotação de um ponto em torno do eixo y por um ângulo λ é realizada pela matriz de transformação:

$$R_\lambda = \begin{bmatrix} \cos \lambda & 0 & \sin \lambda & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \lambda & 0 & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

E, por fim, a rotação de um ponto em torno do eixo z por um ângulo β é realizada pela matriz de transformação:

$$R_\beta = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Como a projeção é realizada sobre o plano xy, o valor de Z' pode ser desconsiderado na transformação. A partir dos conhecimentos em transformação afim, dada pela Eq. (2.15):

$$\begin{pmatrix} WX \\ WY \\ W \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ i & j & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Ou, de forma similar:

$$\begin{aligned} X' &= \frac{aX + bY + c}{iX + jY + 1} \\ Y' &= \frac{dX + eY + f}{iX + jY + 1} \end{aligned} \quad (2.20)$$

A partir de quatro pontos não colineares em duas imagens correspondentes, a imagem inclinada e a correspondência no plano real fotografado, os oito coeficientes da Eq. (2.20) podem ser determinados.

Os valores de intensidade de níveis de cinza ou cor para cada pixel na nova grade de imagem transformada podem ser obtidos por um processo de interpolação. Os quatro métodos mais comumente utilizados para interpolação de valores de intensidade dos pixels da imagem são vizinho mais próximo, bilinear, bicúbica, e polinômios de Lagrange. A discussão detalhada destes métodos não é necessária para o entendimento geral da retificação de imagens inclinadas e, não sendo o foco principal deste trabalho, não será realizada.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

3.1. Introdução

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de visão para processos de soldagem através da utilização de diodos laser de alta potência no infravermelho próximo como iluminação de auxílio, de baixo custo e flexível.

A escolha do espectro em infravermelho próximo se dá principalmente por dois motivos. Sabe-se que a emissão do espectro de luz do arco em processos de soldagem abrange todo o espectro visível, além de emitir em níveis ultravioletas e infravermelhos. Porém, a emissão em infravermelho tem menor energia luminosa quando comparado ao espectro visível, facilitando a sobreposição do arco nesta região.

Por outro lado, para a obtenção de uma sequência de imagens iluminadas por um feixe de luz no infravermelho próximo é, de certa forma, mais simples e com custo muito baixo quando comparado aos níveis mais altos de infravermelho. Uma câmera CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) comum, geralmente, tem resposta no espectro do infravermelho próximo, o que não seria possível com o uso de iluminação no infravermelho com maiores comprimentos de onda. Câmeras infravermelhas são produtos específicos e, portanto, de alto custo, já câmeras comuns têm uma grande diversidade de modelos, a preços baixos, e alta flexibilidade.

Escolheu-se, inicialmente, diodos laser como fonte de iluminação por seu custo intermediário, mais caros que LEDs, porém muito mais baratos do que lasers comuns, e maior flexibilidade e facilidade de instalação, quando comparados aos lasers.

Sendo assim, os principais pontos a serem discutidos nesta metodologia são: a escolha do componente base para a fonte de iluminação, ou seja, o diodo laser de alta potência, a escolha da câmera responsável pela obtenção da sequencia de imagens do

processo de soldagem, a escolha da técnica de iluminação e, por fim, realizar uma estimativa de custo do projeto do sistema de visão como um todo, garantindo seu baixo custo ao compará-lo com sistemas semelhantes existentes.

3.2. Diodo Laser de Alta Potência

Sabendo-se que a componente base para a fonte de iluminação deve ser um diodo laser, de alta potência e com emissão com espectro no infravermelho próximo e, existindo poucos semicondutores comercialmente disponíveis para a realização da triagem, escolheu-se o diodo laser pulsado disponível com maior potência encontrada, e maior aplicabilidade neste trabalho, de modelo **SPL PL90_3**, do fabricante OSRAM® como diodo laser de alta potência para a iluminação. Este é ilustrado na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Diodo Laser SPL PL90_3 (OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS, 2006).

A Tabela 3.1, abaixo, enumera as principais características deste diodo laser, segundo o banco de dados do fabricante.

Tabela 3.1 - Características do diodo laser SPL PL90_3 (OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS, 2006)

Parâmetros	Valor Típico	Unidade
Ciclo de Trabalho	0,1	%
Comprimento de onda de emissão	905	nm
Corrente Direta de Pico	40	A
Divergência do Feixe (FWHM)	11 x 25	º (grau)
Largura de espectro (FWHM)	7	nm
Largura de Pulso	100	ns
Potência de Pico de Saída	75	W
Tensão Reversa Máxima	3	V

Deve-se ressaltar, neste ponto, que o semicondutor escolhido é um diodo laser pulsado, ou seja, o componente suporta apenas determinados pulsos de corrente passando por sua junção em certo intervalo de tempo, não suportando a passagem contínua de corrente. Para este modelo especificamente, é importante observar que o diodo laser tem um ciclo de trabalho muito baixo, de 0,1%, largura máxima de pulso de 100 ns e corrente de pico máxima de 40 A.

Essas características, principalmente, devem ser levadas em consideração durante todo o desenvolvimento do sistema de visão, pois são estes os limites de funcionamento ótimo do diodo laser de alta potência e, portanto, os limites de projeto de todo o sistema de visão.

Um ponto fundamental a ser destacado é que a utilização destes diodos laser requer o uso de EPI (Equipamento de Proteção Individual) específico. Em um trabalho correlato, (VILARINHO *et al.*, 2009; VILARINHO *et al.*, 2010) classificou-se o diodo laser utilizado como sendo da Classe III-B (EN60825, 2007), o que demanda proteção aos olhos, embora a reflexão difusa não seja danosa. Neste caso, será utilizado óculos de proteção modelo 620.P1002.00 Skyline.

3.3. Câmera CMOS

Os requisitos para a escolha de uma câmera para a realização da filmagem da região da junta iluminada pelo diodo laser escolhido são relativamente simples: esta deve responder ao espectro no infravermelho próximo da emissão do diodo laser (905 nm) e deve ter flexibilidade suficiente para a sincronização da obtenção das imagens com os pulsos de iluminação.

Escolheu-se uma câmera CMOS modelo PL-B776U, do fabricante PIXELINK, simplesmente por estar disponível no Laprosolda e que não fosse de alta velocidade (para desenvolver um sistema de menor custo). Com resolução de 3.1 MP (2048 x 1536), comunicação USB 2.0, tempo de exposição programável de 100 µs a 2 segundos e capacidade de resposta a *trigger* externo, esta câmera filma em até 48 quadros por segundo (fps) para menores resoluções (PIXELINK). Sua resposta ao espectro no infravermelho próximo é suficiente para a obtenção de imagens com qualidade, como mostra a Figura 3.2.

Em uma análise inicial é possível observar que o tempo mínimo de exposição desta câmera (tempo no qual o *shutter* permanece aberto recebendo a imagem), de 100 µs, é muito superior à largura máxima de pulso do diodo laser de alta potência (100 ns). Como não houve recursos suficientes para a aquisição de uma câmera CMOS com menor tempo

de abertura, espera-se que, ao suprir uma energia de pico muito alta ao diodo laser durante um intervalo de tempo pequeno, a energia média da iluminação seja suficiente para sobrepor o arco contínuo no intervalo de tempo de exposição.

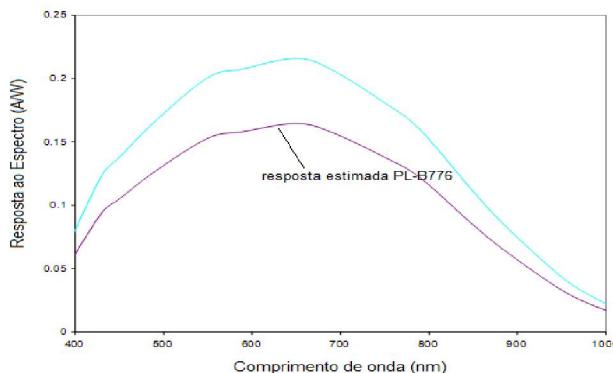


Figura 3.2 – Resposta espectral da câmera PL-B776U (PIXELINK).

3.4. Tipo de Sincronia e Iluminação

A sincronização dos pulsos emitidos pelos diodos laser e do tempo de abertura da câmera é, como já citado, de extrema importância. Existem diversas soluções para que haja a sincronização do sistema de iluminação com o de visão, ilustrados na Figura 3.3, como a utilização de um sistema de acionamento (*trigger*) mestre, acionando os diodos e a câmera ao mesmo tempo, ou um sistema onde os diodos laser são acionados pela saída do *trigger* da câmera, ou ainda, um sistema onde o *trigger* gerado para os pulsos dos diodos laser acione a captura de quadros da câmera, por sua entrada de *trigger*.

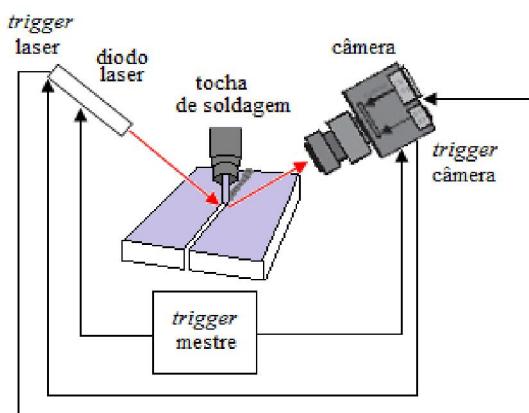


Figura 3.3 – Formas de sincronização: *trigger* mestre, pela câmera e pelo laser (MOTA et al., 2010).

Tendo em vista a flexibilidade do sistema de visão, optou-se pela utilização da sincronia através de um *trigger mestre*. Desta forma, pode-se adaptar a aplicabilidade do sistema para diferentes tipos de câmera, aumentando e diminuindo a quantidade quadros adquiridos por segundo, ou mesmo para diferentes situações, como, por exemplo, utilização de pulsos diferentes para processo de soldagens diferentes.

Como técnica de iluminação tem-se duas soluções principais: iluminação direta e iluminação concêntrica (Figura 3.4). Para a iluminação direta, posiciona-se a fonte de iluminação e a câmera em lados opostos da região da solda, inclinados em ângulos idênticos em relação ao plano de iluminação. Desta forma, o feixe de luz infravermelha atinge a chapa metálica e, por reflexão direta é direcionado para a entrada do CMOS da câmera. Sabe-se que a reflexão máxima se dá no mesmo ângulo em que se encontra a câmera, portanto, é necessária uma menor energia luminosa da fonte de iluminação para o alcance de um patamar adequado de luz na câmera. Por outro lado esse tipo de arranjo demanda um maior espaço de trabalho, não sendo possível a utilização do sistema em todos os tipos de junta.

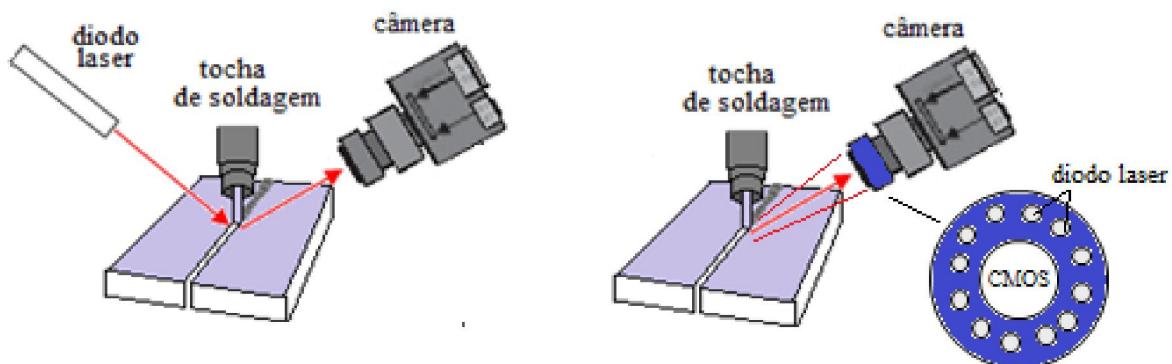


Figura 3.4 – Técnicas de Iluminação: direta (esquerda) e concêntrica (direita).

Para a iluminação concêntrica, ao contrário do que ocorre na técnica anterior, a fonte de iluminação e a câmera são posicionadas no mesmo lado da junta a ser soldada, sendo que se distribuem as diversas fontes pontuais de iluminação (o conjunto de diodos laser) ao redor do sensor da câmera, de forma concêntrica. Este tipo de técnica é utilizado largamente em câmeras comerciais com finalidades de segurança noturna, demando um espaço de trabalho menor e maior flexibilidade de uso quando comparado ao sistema com iluminação direta. Embora esta abordagem possibilite em soldagem maior acessibilidade em uma junta, por outro lado, este tipo de iluminação exige uma maior energia luminosa da fonte de iluminação para o alcance de um patamar adequado de luz na câmera.

Tendo em vista um melhor aproveitamento da energia infravermelha gerada pelo sistema de visão, inicialmente, optou-se pela utilização da técnica de iluminação direta.

Caso o sistema projetado se mostre suficiente para a sobreposição do arco, deve-se considerar a adaptação do sistema para a técnica de iluminação concêntrica.

3.5. Estimativa de custos

Finalizando esta metodologia, tem-se a estimativa de custos para o desenvolvimento do sistema de visão para processos de soldagem resumida na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Estimativa de custos do sistema de visão (preço FOB).

Descrição	Valor (US\$)
25 diodos de alta potência SPL PL90_3	1200,00
Câmera USB PL-B776U	1500,00
Sistema óptico de Iluminação	100,00
Componentes eletrônicos	150,00
Lente multifocal para câmera	900,00
Notebook para armazenamento de imagens	700,00
TOTAL	4550,00

Deve-se ressaltar que, assim como a câmera USB, o computador responsável pelo armazenamento das imagens e a lente multifocal para a câmera já estão disponíveis em laboratório, diminuindo a estimativa de custos para o desenvolvimento de um protótipo para pouco mais de 30% do custo total.

A título de comparação, um sistema de visão semelhante ao desenvolvido neste trabalho teve como custo de aquisição o valor de aproximadamente US\$ 15.000,00 e, propostas de projetos com o intuito de criação de um sistema de monitoramento e controle *online* de soldagem a arco, através da utilização deste tipo de sistema de visão, obtiveram financiamento de órgãos governamentais de apoio a pesquisas de cerca de US\$2,4 milhões (VILARINHO e LUCAS, 2009). Desta forma, o valor estimado para o desenvolvimento deste sistema de visão pode ser considerado de baixo custo.

3.6. Visão Geral do Trabalho

Tendo em vista todas as características apresentadas neste capítulo sobre os componentes-base (diodo laser e câmera) e as técnicas de sincronia e iluminação tem-se a

seguinte ordem para o desenvolvimento deste trabalho, conforme esquematizado na Figura 3.5.

- Realização do estudo da emissão no infravermelho próximo, especificamente nos comprimentos de onda em torno de 905 nm, para os processos de soldagem TIG e MIG/MAG;
- Desenvolvimento do projeto completo do Sistema de Visão, indo desde a criação, análise matemática e simulação computacional de uma topologia de acionamento dos diodos laser, até a escolha de todos os componentes eletrônicos e dos componentes integrantes de sistema óptico;
- Desenvolvimento de um algoritmo para retificação das imagens inclinadas adquiridas durante os testes do protótipo com soldagem TIG e MIG/MAG;
- Validação da topologia de acionamento dos diodos laser através de testes experimentais;
- Validação do sistema de visão através de testes de um protótipo de teste em soldagens TIG e MIG/MAG.

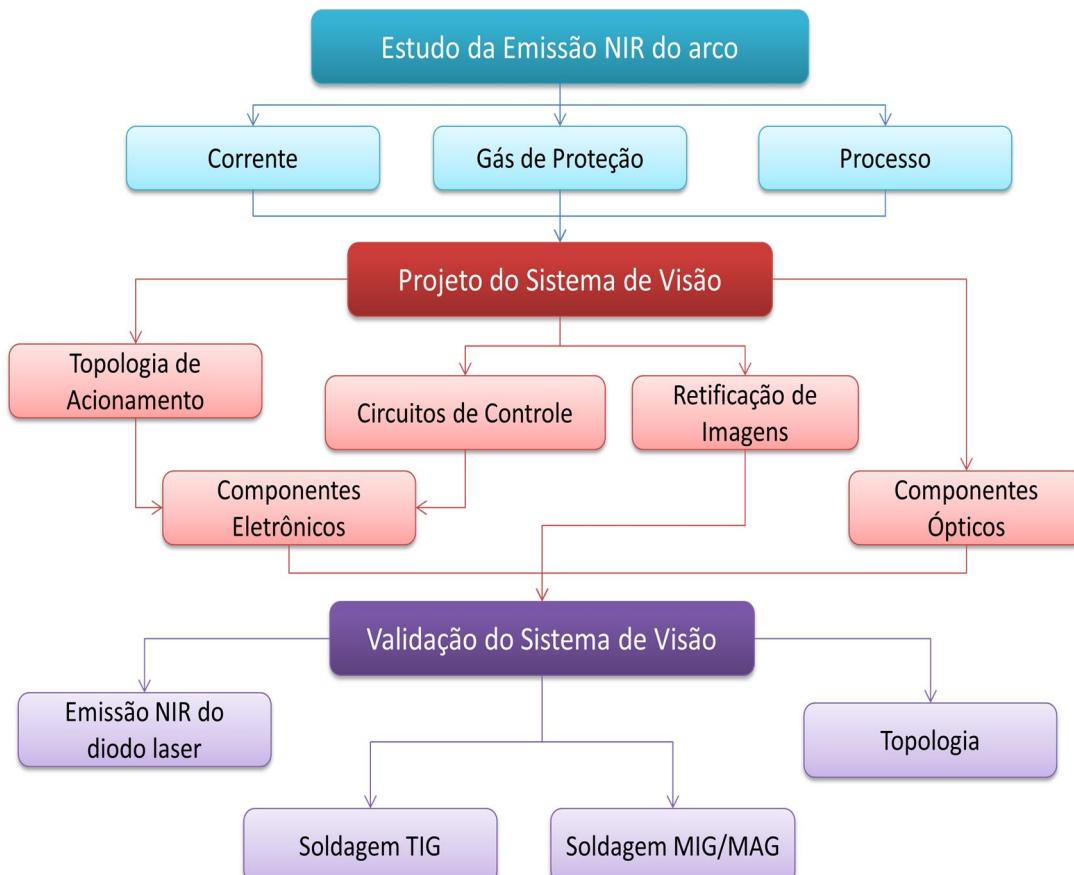


Figura 3.5 – Representação esquemática da metodologia de trabalho.

CAPÍTULO IV

ENSAIOS PRELIMINARES

O comportamento do arco de soldagem em relação à sua emissão luminosa, principalmente em seu espectro no infravermelho próximo, não é completamente conhecida. A maioria dos estudos sobre a emissão luminosa do arco se focam no espectro luminoso e, muitas vezes, no espectro ultravioleta, tendo em vista fatores como a saúde e a segurança do soldador e do ambiente fabril.

Desta forma, a proposta destes ensaios preliminares é conhecer melhor o comportamento do arco elétrico de soldagem no mesmo intervalo de espectros infravermelhos emitidos pelos diodos laser de alta potência escolhidos para a técnica de iluminação apresentada. Sendo assim, realizou-se um estudo comparativo entre a emissão do arco de soldagem de infravermelho próximo (neste caso, nas proximidades de 905 nm) nos processos TIG e MIG/MAG, avaliando também sua influência pela intensidade de corrente e composição da proteção gasosa empregada.

4.1. Metodologia Experimental

A fim de atingir os objetivos destes ensaios preliminares, elaborou-se uma metodologia padrão de trabalho, envolvendo desde a escolha dos parâmetros de soldagem dos dois processos distintos, passando pela fabricação e ajuste do sensor de luminosidade até o desenvolvimento de um programa para a obtenção e a interpretação do espectro do arco de solda. A padronização de todas as etapas envolvidas neste experimento possibilitou a comparação e discussão dos resultados obtidos.

Como sensor de luminosidade, para a obtenção do espectro do arco, utilizou-se de um espetrômetro portátil, modelo SM242-USB da Spectral Products, com resolução de

comprimento de onda de 0,3 nm, entrada de fibra óptica SMA905, detector CCD de 2048 pixels. Além de sua portabilidade e versatilidade (uso de uma fibra com maior resolução ou maior captação de luz), sua comunicação por USB facilita a sua interface com plataformas de programação, como o LabView®, deixando-o independente de seu software original. A fibra ótica utilizada, com diâmetro de 600 micrômetros e comprimento de 2 metros, capta a radiação e a conduz até o espectrômetro.

Para a focalização do ponto da emissão luminosa, utilizou-se de um suporte com um sistema de lentes convergentes e divergentes (Figura 4.1) e um filtro óptico de interferência em 905 nm (comprimento de onda de interesse para desenvolvimentos futuros do sistema de visão). Calcularam-se, por fim, as distâncias necessárias entre as lentes para que o arco focalizado pudesse ser captado inteiramente e enviado para a fibra ótica, como ilustra a Figura 4.2. A lente divergente (com comprimento focal de -12 mm) e a lente convergente subsequente (com comprimento focal de 54 mm), é importante ressaltar, estão alinhadas com seu foco coincidente e a fibra ótica está nas proximidades do ponto focal da última lente convergente (com comprimento focal de 54 mm). A distância entre o orifício delimitador ($\varnothing = 10$ mm) e o arco de solda (D) determina o tamanho do objeto visto pelo espectrômetro.

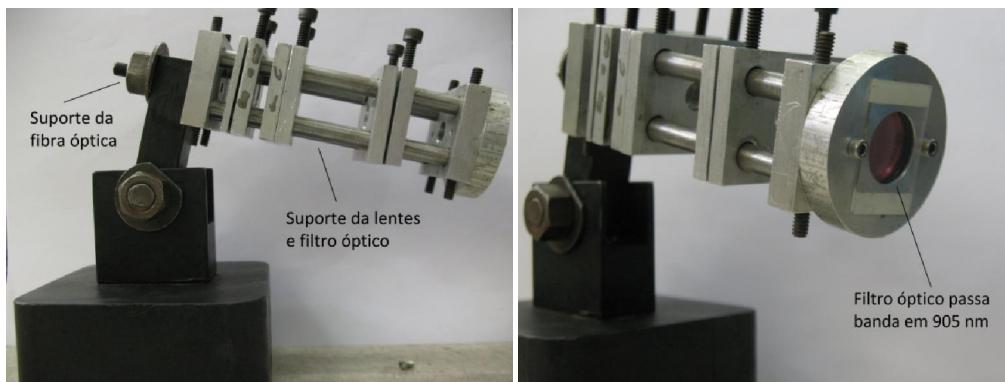


Figura 4.1 – Suporte para fibra óptica e lentes (esquerda) e filtro óptico passa banda (direita).

Todos os testes foram realizados com o auxílio de uma tocha acoplada a um braço robótico, sem movimento em relação ao espectrômetro. O suporte da fibra óptica e das lentes foi posicionado de modo que apenas uma região envolvendo a placa de teste e a tocha de soldagem fosse focalizada pelo sistema de lentes, sem que ocorresse saturação completa do sensor, com uma distância em linha reta entre eles (D) de 795 mm. As chapas de teste foram posicionadas sobre uma mesa com controle de velocidade de movimentação

e a solda realizada em direção ao suporte (mesa movimentando na direção contrária), para evitar a interposição da tocha entre o arco e a poça fundida com o sensor (Figura 4.3).

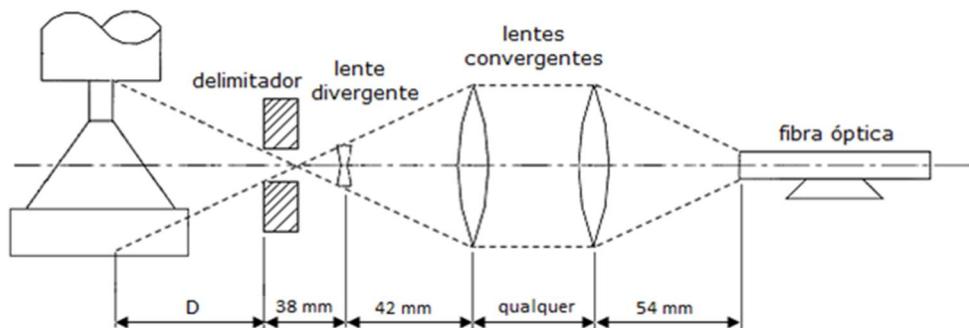


Figura 4.2 – Esquema de sistema de lentes para a focalização do arco na fibra óptica.

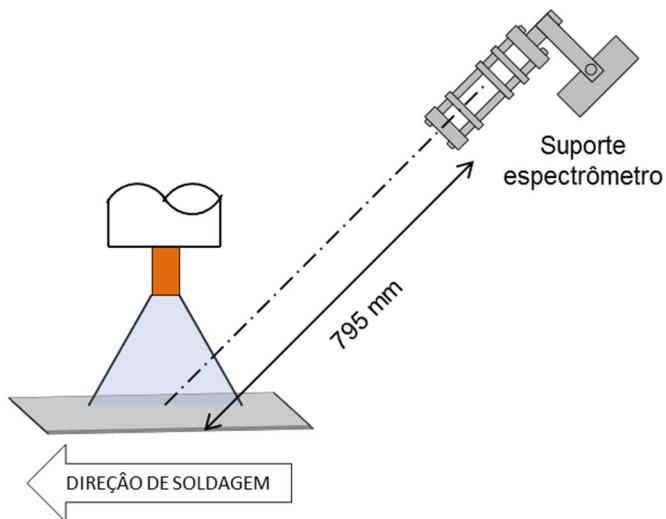


Figura 4.3 – Posicionamento da tocha e suporte do espectrômetro.

O espectro e a radiação do arco foram adquiridos através de um programa em ambiente LabView® (Figura 4.4) com a calibração e bibliotecas fornecidas pelo próprio fabricante do espectrômetro. O usuário deve entrar com quatro dados para a aquisição durante os experimentos: o tempo de integração, tempo que o sensor CCD do espectrômetro permanece aberto para a obtenção de um sinal; o número de médias, quantidade de vezes que o sensor faz o cálculo durante um ciclo; o intervalo de tempo entre duas amostras e o número de amostras de espectro a serem gravadas. Neste trabalho foram utilizados os valores de 40 ms, 5 médias, 200 ms e 10 amostras, respectivamente. Ao clicar no botão “Gravar”, o programa salva automaticamente em arquivos LVM sucessivos e no intervalo definido o vetor de intensidades luminosas.

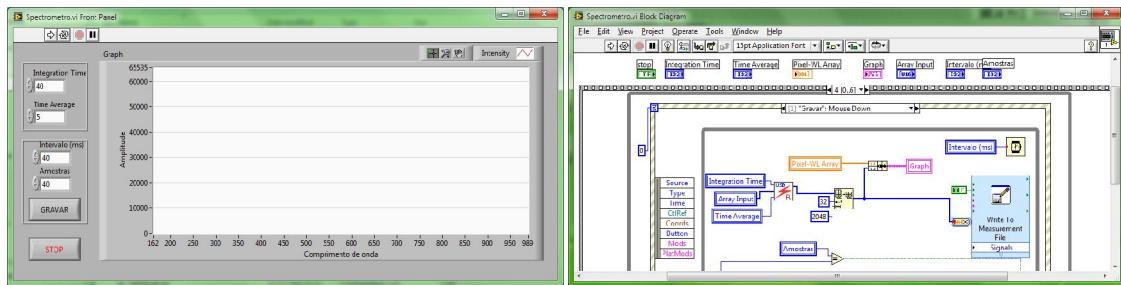


Figura 4.4 – Telas do programa em LabView® para aquisição do espectros de luz: (cima) tela de trabalho e interface com o usuário e (baixo) modo de edição do programa.

A Tabela 4.1, mostrada a seguir, relaciona os parâmetros de soldagem utilizados nos testes para a aquisição do espectro do arco. Utilizando-se dois processos a arco, TIG e MIG/MAG, variou-se a proteção gasosa e a intensidade de corrente. Ainda, em cada processo, ajustaram-se os demais parâmetros para obter uma transferência metálica do tipo spray (não há grande variação na emissão de radiação ao longo do tempo) e um comprimento de arco aproximadamente similar entre os testes. Por fim, todos os testes foram realizados com o uso do filtro passa banda em 905 nm, exceto um teste para cada processo com a finalidade de comparação entre os espectros.

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados para a realização dos experimentos.

Teste	Processo	Corrente (A)	Vel. de Alim. (m/min)	Vel. Soldagem (cm/min)	Proteção Gasosa	Vazão (l/min)	DBCP/ DEP ⁽¹⁾ (mm)	Filtro 905 nm	
1	TIG	150	-	20	Argônio	13	4	SEM	
2	TIG	150	-					COM	
3	TIG	200	-					COM	
4	TIG	250	-					COM	
5	MIG/MAG	200	19 ⁽²⁾	25	Ar+8%CO ₂	22	22	COM	
6	MIG/MAG	250	22 ⁽²⁾					18	
7	MIG/MAG	275	7,8	25		15		SEM	
8	MIG/MAG	275	7,8	25				COM	
9	MIG/MAG	390	12,5	35				COM	
10	MIG/MAG	275	7,8	25	Ar+5%O ₂	22	22	COM	
11	MIG/MAG	390	13,2	35				COM	
12	MIG/MAG	275	7,8	25				COM	
13	MIG/MAG	390	13	35				COM	

⁽¹⁾Nota 1: DBCP é a distância entre o bico de contato e a peça em soldagens MIG/MAG e DEP é a distância entre o eletrodo e a peça em soldagens TIG.

⁽²⁾Nota 2: os testes de número 5 e 6 foram realizados com arame 0,8 mm.

Com relação aos equipamentos e consumíveis utilizados durante a realização dos testes, segue-se a lista:

- Suporte para fibra óptica;
- Suporte para lentes com ajuste de distâncias;
- Lentes divergente (-12 mm) e convergentes (54 mm);
- Filtro Óptico Comar 905 IH 25;
- Mesa movimentadora IMC SDP-600;
- Fonte Fronius TransPlus Synergic 5000 para o processo MIG/MAG;
- Arame ER70S6 com diâmetro de 0,8 mm testes 5 e 6 e Arame ER70S6 com diâmetro de 1,2 mm para demais testes em MIG/MAG,
- Fonte IMC MTE digitec 300 para o processo TIG;
- Eletrodo EWTh-2 com diâmetro de 2,4 mm;
- Gases de proteção: Argônio, Ar+8%CO₂, Ar+5%O₂;
- Chapas de aço ao carbono com espessura de ½”;
- Óculos de proteção modelo 620.P1002.00 Skyline.

Para a interpretação dos vetores de intensidade luminosa coletados durante o experimento, desenvolveu-se um programa em linguagem Matlab®. O usuário escolhe o diretório contendo os arquivos LVM (extensão de saída do programa de aquisição do LabView®) que deseja analisar. O algoritmo reconhece todas as amostras de um mesmo teste e, através do vetor de calibração dos comprimentos de onda, imprime todos os espectros amostrados e o espectro médio destes. O vetor de calibração simplesmente relaciona o índice do vetor do espectro amostrado com um comprimento de onda específico (dado pelo fabricante). Por fim, o valor da integral numérica (do espectro médio) é calculado através da função *trapze* este será utilizado como fator de comparação entre os testes.

Deve-se ressaltar que os valores obtidos, tanto da intensidade luminosa em cada ponto do espectro adquirido, como o valor da integral numérica calculada são apenas valores relativos, dependentes de inúmeros fatores como o tempo de integração, o número de médias, a posição do espetrômetro em relação à placa de teste e as condições do teste; Portanto, os resultados aqui obtidos são úteis apenas quando utilizados em forma de comparação, não sendo possíveis conclusões fora da abrangência desta metodologia experimental.

4.2. Resultados e Discussão

Os valores da integração numérica, na faixa de comprimentos de 890 e 930 nm, obtidos após a coleta e interpretação dos espectros, as tensões e correntes médias monitoradas durante os processos estão listado na Tabela 4.2. Nos testes de números 1 e 7 o filtro óptico de interferência em 905 nm foi retirado para a aquisição do espectro completo do arco e foi realizada a integração de toda a faixa de comprimentos.

Tabela 4.2 – Parâmetros medidos durante a realização dos experimentos.

Teste	Processo	Corrente (A)	Filtro 905 nm	Corrente Monitorada (A)	Tensão Monitorada (V)	Integração
1	TIG	150	SEM	151	14,7	2,28E+07
2	TIG	150	COM	151	15,2	4,05E+04
3	TIG	200	COM	202	16,1	5,22E+04
4	TIG	250	COM	253	17,8	7,90E+04
5	MIG/MAG	200	COM	202	31,5	7,15E+04
6	MIG/MAG	250	COM	250	33,5	9,74E+04
7	MIG/MAG	275	SEM	275	29,6	3,50E+07
8	MIG/MAG	275	COM	275	29,6	3,23E+05
9	MIG/MAG	390	COM	393	33,5	5,65E+05
10	MIG/MAG	275	COM	267	26,6	2,39E+05
11	MIG/MAG	390	COM	394	31,7	4,43E+05
12	MIG/MAG	275	COM	268	24	1,71E+05
13	MIG/MAG	390	COM	390	28,7	2,84E+05

Através da Figura 4.5, pode-se observar que o filtro óptico, além de anular as emissões com comprimento de onda fora da banda passante (a resposta deste filtro é uma gaussiana com 10 nm de largura de banda), atenua a intensidade do espectro dentro da banda passante. Deve-se ressaltar que o perfil de intensidades espectral obtido pelo sensor de luminosidade utilizado neste trabalho, assim como seu valor de integração, são relativos, dependentes de todos os aspectos descritos na metodologia experimental.

Uma segunda análise pode ser discutida através da comparação entre os testes de números 8 a 13, Figura 4.6. Com o aumento da corrente, mantendo-se o mesmo tipo de proteção gasosa, houve um aumento do valor da integração do espectro, ou seja, uma maior emissão de radiação infravermelha. O aumento da corrente, mantendo-se o mesmo comprimento do arco, entrega maior energia ao arco, aumentando a agitação dos átomos presentes e, portanto, aumentando o número de partículas ionizadas (VILARINHO, 2009). Sabe-se que parte da radiação infravermelha deve-se à emissão de radiação atômica,

quando um elétron pertencente a um átomo excitado libera energia luminosa ao retonar à sua posição de origem e, portanto, quanto maior o número de partículas ionizadas, maior será a energia luminosa emitida com o retorno dos elétrons aos seus estados naturais.

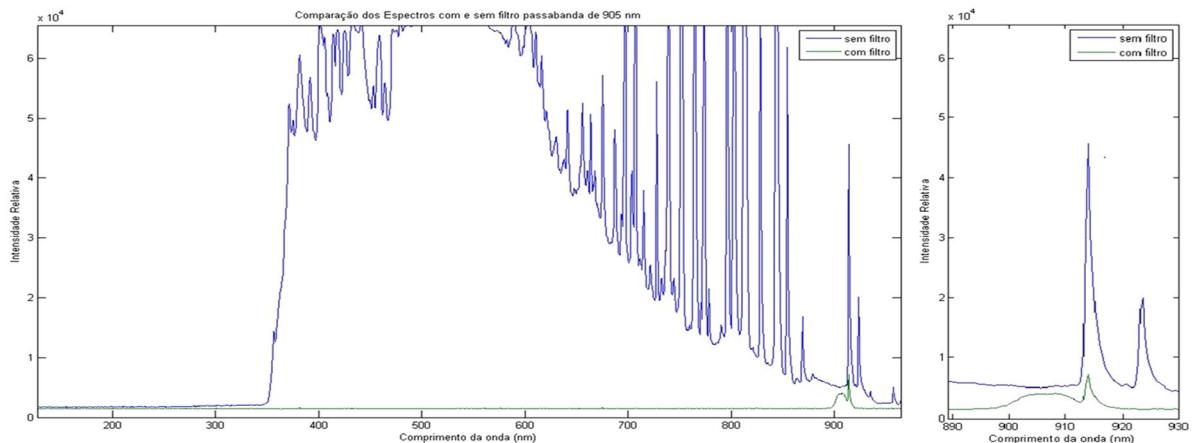


Figura 4.5 – Comparação dos espectros com e sem o uso do filtro (esquerda) e detalhe para atenuação na faixa 890-930 nm (direita), testes 1 e 2.

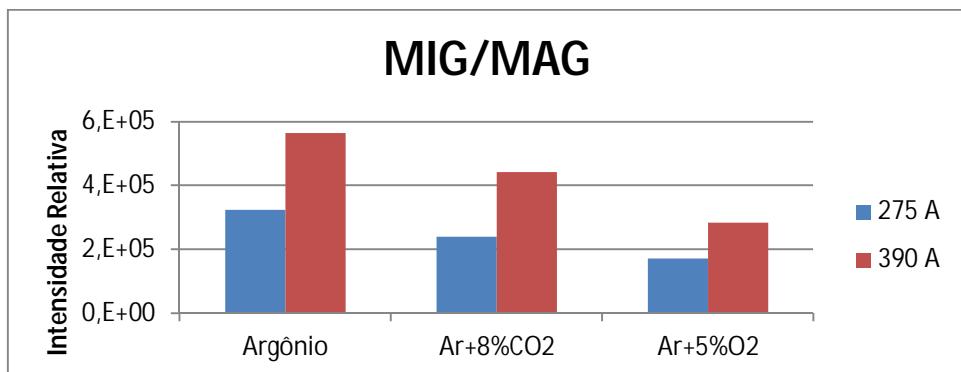


Figura 4.6 – Resultados da integração numérica para testes 8 a 13.

Outra análise interessante retirada destes mesmos testes (8 a 13) é a influência da proteção gasosa sobre emissão de infravermelho. Pode-se observar que, para qualquer corrente, a integração numérica apresentou os maiores valores para a proteção de Argônio puro, valores intermediários com a adição de dióxido de carbono e, por fim, valores menores com a adição de oxigênio ao argônio. Ao comparar os espectros médios obtidos, Figura 4.7, nota-se a diferença entre os espectros dos gases de proteção, onde o teste com argônio apresentou um grande pico em torno de 914 nm, o teste com adição de dióxido de carbono apresentou picos menores abaixo deste valor e, por fim, o teste com adição de oxigênio apresentou um pico menor em torno dos mesmos 914 nm.

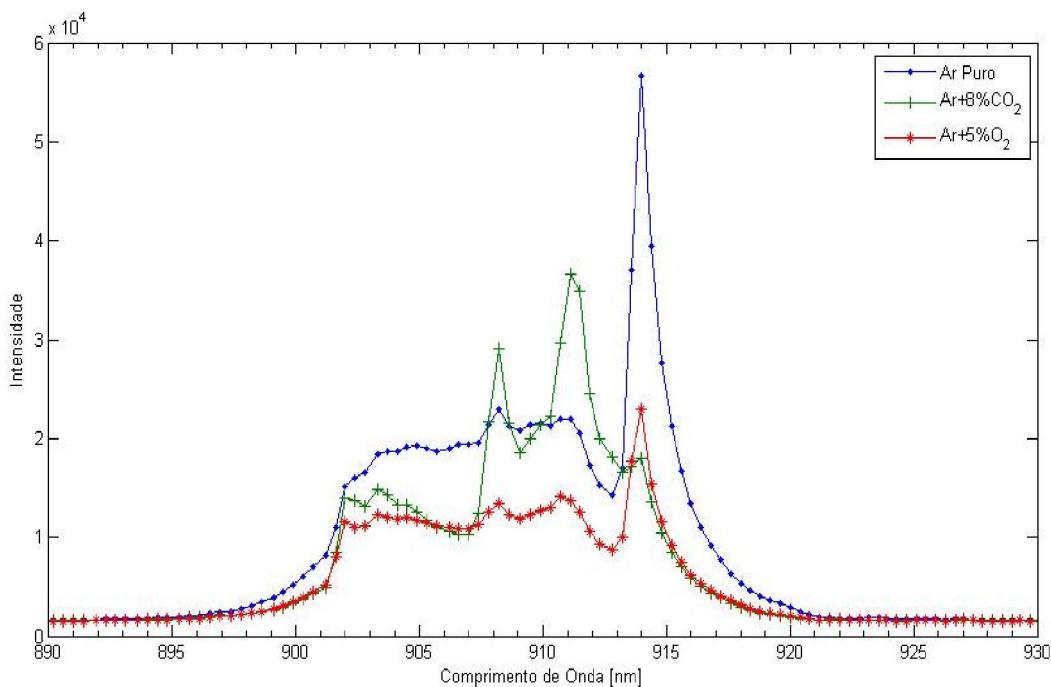


Figura 4.7 – Comparativo espectro dos testes 8, 10 e 12 (275 A).

Sabe-se que o espectro adquirido na região ao redor do arco é composto pela radiação térmica de corpo negro, devido à alta temperatura atingida, e correspondente à área inferior do espectro obtido, e pelo espectro de emissão atômica, quando um elétron pertencente a um átomo excitado libera energia ao retonar à sua posição de origem, e correspondente aos picos presentes. De acordo com NIST (2010), os átomos excitados presentes nos diferentes gases utilizados (argônio, carbono e oxigênio), possuem picos de emissão na faixa de comprimentos de onda filtrados, como mostra a Tabela 4.3, e são, portanto responsáveis pelos picos presentes nos espectros adquiridos.

Tabela 4.3 – Picos de emissão dos átomos excitados presentes nos gases de proteção (NIST, 2010).

Elemento	Átomo Excitado	Comprimento de Onda (nm)	Intensidade Relativa (%)
Argônio	Ar I	912,2967	100,0
Carbono	C I	909,483	45,0
		911,180	30,0
Oxigênio	O I	915,601	23,5

A maior intensidade relativa da radiação emitida pelo Ar I resulta nos picos em torno de 914 nm, onde foi maior para a proteção de Argônio, intermediário para Ar+5%O₂ e, por fim, menor para Ar+8%CO₂. Para a adição de oxigênio, observa-se uma adição da radiação

emitida pelo átomo excitado O I no pico existente de Ar I e, para a adição de dióxido de carbono observa-se dois picos distintos nas proximidades de 910 nm. A diferença entre os valores dos comprimentos onde ocorrem os picos podem ser relacionados a problemas na calibração do espectrômetro.

Esses picos são diretamente proporcionais à porcentagem de átomos e, portanto, de átomos excitados de argônio presentes no arco. Acredita-se que essa proporcionalidade tenha uma relação direta com a condutividade elétrica de cada componente da composição. Segundo autores (SCOTTI e PONOMAREV, 2008) quanto maior a condutividade elétrica do elemento na temperatura da região do plasma, maior é a parcela de corrente, em percentual, que passa por estes. No caso do Ar+8%CO₂, por exemplo, espera-se que uma porcentagem maior que a variação de argônio (8%) circule pelos átomos ionizados de CO₂.

Segundo a distribuição de Planck, a magnitude da emissão aumenta com o aumento da temperatura (INCROPERA *et al.*, 2002). Portanto, além de possuir maior intensidade relativa de elementos ionizados, o teste com gás de proteção Argônio apresentou maior radiação de corpo negro, indicando maior temperatura na região medida pelo espectrômetro (arco, junta, e metal de adição).

Por fim, como mostra a Figura 4.8, para um mesmo nível de corrente, a soldagem pelo processo MIG/MAG apresentou maiores valores de radiação infravermelha quando comparado ao processo TIG.

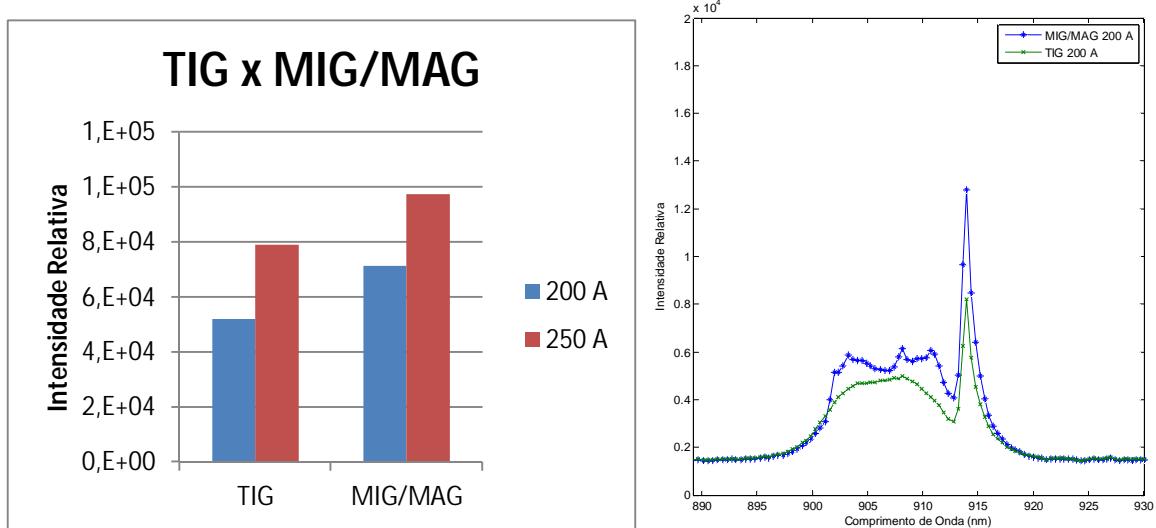


Figura 4.8 – Resultados da Integração numérica para testes 3 a 6 (esquerda) e detalhe para forma dos espectros, com corrente de 200 A (direita).

Os resultados numéricos obtidos sobre a energia luminosa do arco (integral dos espectros) fornecem, portanto, a quantidade de energia mínima requerida para a sobreposição do arco por uma fonte de iluminação no infravermelho próximo. Neste caso,

deve-se submeter esta fonte de iluminação à mesma metodologia experimental descrita neste trabalho e, comparando-se seus perfis em espectro e, principalmente a energia luminosa fornecida, é possível concluir se esta fonte é suficiente ou não para a obtenção de imagens do processo de soldagem sem a interferência da luminosidade do arco.

4.3. Conclusão dos Ensaios Preliminares

Foi proposta, neste trabalho preliminar, a realização de um estudo da emissão e radiação infravermelha próxima em processos de soldagem a arco, em específico, em dois processos largamente utilizados, TIG e MIG/MAG, focando também sua influência por parâmetros como a corrente de soldagem e a proteção gasosa utilizada. Através do uso de um espectrômetro USB, aliado a um sistema de lentes para a focalização do arco e um algoritmo de aquisição do espectro, foi possível realizar um comparação quantitativa entre os processos e seus parâmetros.

Para ambos os processos, o aumento da intensidade de corrente resultou no aumento da emissão infravermelha. O aumento da tensão sobre um arco, de mesmo comprimento, aumenta a radiação de corpo negro no infravermelho e na emissão luminosa pelo retorno dos elétrons ao seu estado natural pelas partículas ionizadas. Para uma mesma intensidade de corrente, o processo MIG/MAG apresenta maior emissão e radiação infravermelha quando comparado ao processo TIG, devido à própria natureza física do arco.

O formato do espectro adquirido fornece informações importantes sobre o arco de soldagem. Seus picos indicam a composição da proteção gasosa utilizada e a temperatura atingida influencia na emissão de corpo negro. A soma dessas duas parcelas que caracteriza a emissão total do arco. Com base nos resultados obtidos é possível se obter quantitativamente a intensidade luminosa necessária para sobreposição do arco durante a aquisição de imagens.

CAPÍTULO V

PROJETO DO SISTEMA DE VISÃO

5.1. Estratégia Geral

Neste capítulo são apresentadas as principais etapas para o projeto do sistema de visão em infravermelho próximo para processo de soldagem. Inicialmente, a topologia de acionamento do diodo laser de alta potência é apresentada e seu comportamento em relação aos principais componentes é detalhado de forma qualitativa. As equações analíticas que regem o comportamento desta são apresentadas, assim como um roteiro numérico simplificado para a determinação de cada um dos principais componentes envolvidos.

Por fim, são apresentados todos os circuitos auxiliares envolvidos no controle desta topologia, as principais formas de onda da topologia obtidas através de simulação computacional e a implementação de um algoritmo de retificação de imagens inclinadas.

5.2. Análise Qualitativa da Topologia Ressonante

O seguinte item apresenta a análise qualitativa da topologia de acionamento dos diodos laser, baseado na combinação de circuitos ressonantes e *snubber*. O funcionamento será dividido em etapas características, seus circuitos equivalentes ilustrados e o comportamento da tensão e corrente sobre os principais componentes serão apresentado.

5.2.1. Descrição da Topologia

Os diodos laser de alta potência escolhidos para a criação do sistema de visão necessitam de um circuito capaz de fornecer pulsos de corrente com picos de até 40 A e ciclo de trabalho abaixo de 0,1% (Tabela 3.1). O chaveamento desta potência, portanto deve ser realizado de acordo com as características deste semicondutor.

Através do uso da teoria de circuitos ressonantes, apresentada no Capítulo 2, é possível construir uma topologia capaz de acionar os diodos laser com maior eficiência energética do que um circuito de chaveamento comum. A topologia do circuito de acionamento dos diodos laser é apresentada na Figura 5.1, onde os diodos laser são representados pelos componentes LedMais, LedMenos e LedZero.

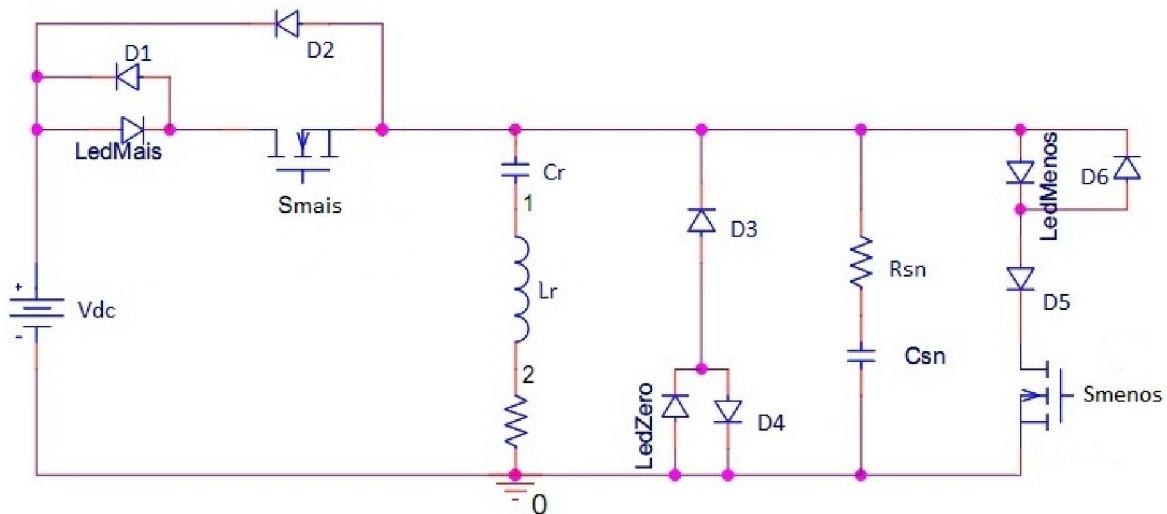


Figura 5.1 – Topologia de acionamento dos diodos laser.

Através do chaveamento dos MOSFETs (transistor de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico), Smais e Smenos, em uma determinada frequência e o ajuste dos valores dos componentes passivos do circuito, é possível aumentar a corrente sobre os diodos laser, maximizando sua emissão luminosa a cada tempo de abertura para a aquisição de uma imagem da câmera.

Os componentes Csn e Rsn formam um circuito *snubber* e auxiliam a comutação das chaves. Os componentes Cr e Lr formam o que se denomina de circuito ressonante LC série. Quando a ressonância ocorre, devido à aplicação da frequência adequada, a energia armazenada em um elemento reativo é igual à fornecida pelo outro elemento reativo do sistema. Em outras palavras, a energia oscila entre um elemento e o outro durante a comutação das chaves presentes no circuito.

Os diodos D1, D4 e D6, ligados em antiparalelo com cada um dos diodos laser, são chamados de diodos de “roda-livre” e, neste circuito, sua principal função é evitar que a tensão no diodo laser se torne instantaneamente negativa, durante a comutação das chaves, devido à presença de indutâncias. O diodo D2 é também um diodo de “roda-livre” para a proteção da chave Smais e, por fim, os diodos D3 e D5 estão em série com os diodos laser para evitar a ação de tensão reversa sobre estes.

Deve-se ressaltar, neste ponto, que a escolha de um circuito ressonante para o acionamento dos diodos laser vai além da eficiência. A corrente que circula pelo circuito com a configuração ressonante tem forma senoidal, ao contrário do formato quadrado encontrado em circuitos de chaveamento simples. A forma senoidal garante um acionamento suave dos diodos laser de alta potência, com menor impacto na junção PN do semicondutor. Da mesma forma, este circuito permite um tempo maior de acionamento dos diodos laser sem que haja degradação destes.

Antes de se iniciar a análise operacional desta topologia, algumas considerações devem ser feitas:

- Todos os componentes são considerados ideais, sejam eles chaves de potência, diodos ou elementos ressonantes.
- Para todos os estágios de funcionamento do circuito a frequência de ressonância é constante.
- As influências do circuito *snubber* C_{sn} e R_{sn} sobre os valores de corrente e tensão não serão considerados.
- A análise é realizada apenas em regime permanente, não levando em consideração os valores transitentes.

A seguir são apresentados os estágios de funcionamento, da topologia de acionamento (círculo ressonante) dos diodos laser.

5.2.1.1. Primeiro Estágio do Circuito Ressonante

Para o primeiro estágio de funcionamento da topologia de acionamento considera-se que:

- A chave Smais encontra-se conduzindo e a chave Smenos encontra-se aberta.
- O capacitor ressonante C_r encontra-se inicialmente carregado em V_{c0} .
- ‘t’ varia de t_0 até t_1 .

O circuito equivalente para esta etapa e as formas de onda relevantes do circuito são apresentados na Figura 5.2.

A corrente proveniente da fonte de tensão constante V_{dc} é responsável pelo acionamento do primeiro diodo laser, LedMais, que está diretamente polarizado, e carrega o

capacitor ressonante. Quando o capacitor está completamente carregado não há mais condução de corrente para este circuito.

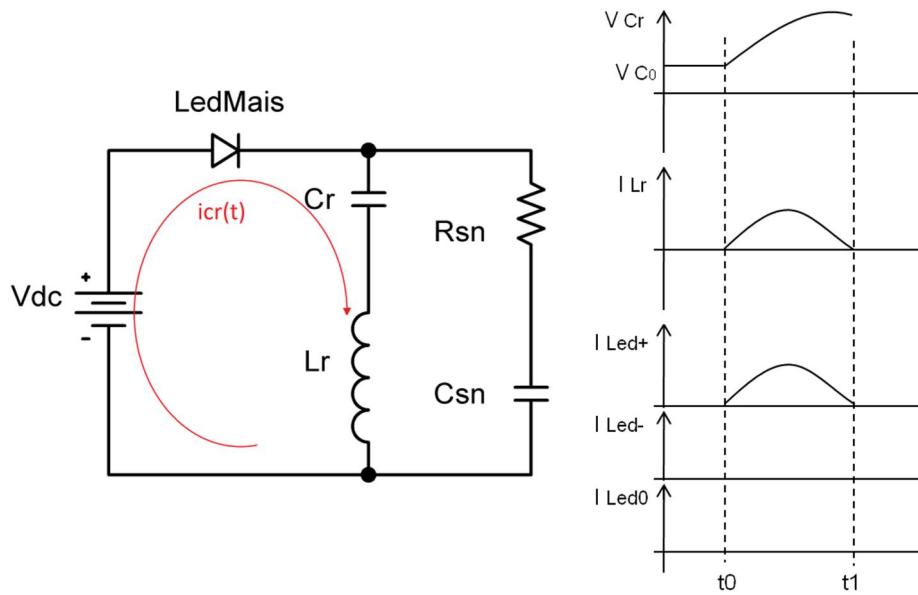


Figura 5.2 – Circuito equivalente do primeiro estágio (esquerda) e Tensão no capacitor C_r , corrente nos diodos laser e no indutor L_r (direita).

Este estágio é finalizado quando a corrente ressonante e, consequentemente, a corrente que passa pelo primeiro diodo laser, LedMais, cai a zero. Assim, em $t = t_1$ a chave Smais é tirada de condução e a chave Smenos é ligada em condução.

5.2.1.2. Segundo Estágio do Circuito Ressonante

Para o segundo estágio de funcionamento da topologia de acionamento considera-se que:

- A chave Smais encontra-se aberta e a chave Smenos encontra-se conduzindo.
- O capacitor ressonante C_r encontra-se carregado em sua tensão máxima.
- A corrente inicial no capacitor ressonante, $i_{cr}(t)$, é nula.
- ‘ t ’ varia de t_1 até t_2 .

O circuito equivalente para esta etapa e as formas de onda relevantes do circuito são apresentados na Figura 5.3.

O capacitor ressonante, neste estágio de funcionamento, age como uma fonte de tensão, e a corrente ressonante, $i_{cr}(t)$, aciona o segundo diodo laser, LedMenos, que está diretamente polarizado. Este estágio é finalizado quando a corrente ressonante cai a zero. A tensão inicial deste estágio, no capacitor ressonante, supera o valor de V_{dc} e, portanto, nesse estágio, a corrente ressonante tem maior pico que no estágio anterior. Assim, em $t = t_2$ a chave Smenos é tirada de condução.

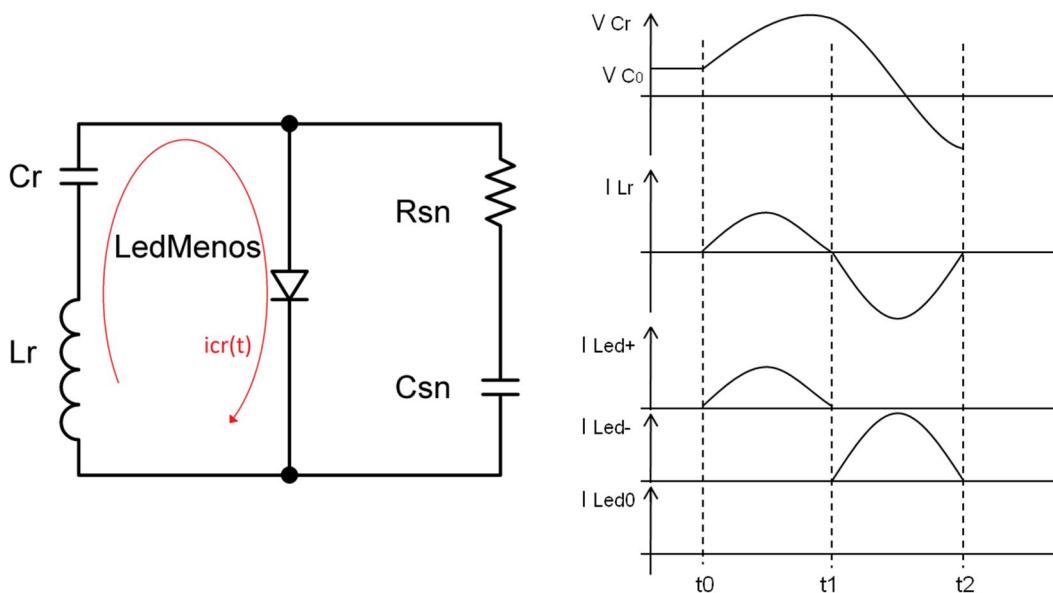


Figura 5.3 – Circuito equivalente do segundo estágio (esquerda) e Tensão no capacitor C_r , corrente nos diodos laser e no indutor L_r (direita).

5.2.1.3. Terceiro Estágio do Circuito Ressonante

Para o terceiro estágio de funcionamento da topologia de acionamento considera-se que:

- As chaves Smais e Smenos encontram-se desligadas.
- O capacitor ressonante C_r encontra-se carregado em uma tensão negativa, $V_{C_r(t)}$.
- A corrente inicial no capacitor ressonante, $i_{C_r}(t)$, é nula.
- ‘t’ varia de t_2 até t_3 .

O circuito equivalente para esta etapa e as formas de onda relevantes do circuito são apresentados na Figura 5.4.

O capacitor ressonante, neste estágio de funcionamento, age como uma fonte de tensão negativa, e a corrente ressonante circula em sentido oposto ao estágio de funcionamento anterior, acionando o terceiro diodo laser, LedZero, que está diretamente polarizado para este sentido. Este estágio é finalizado quando a corrente ressonante cai a zero, em $t = t_3$ e o capacitor ressonante encontra-se carregado novamente com a tensão V_{C_0} .

Esta é a etapa final de funcionamento da topologia de acionamento dos diodos laser. O comportamento contínuo da tensão e corrente não submete as chaves a qualquer estresse de comutação e o circuito ressonante é disparado pelas chaves Smais e Smenos, ativados e desligados através de um circuito de controle adequado.

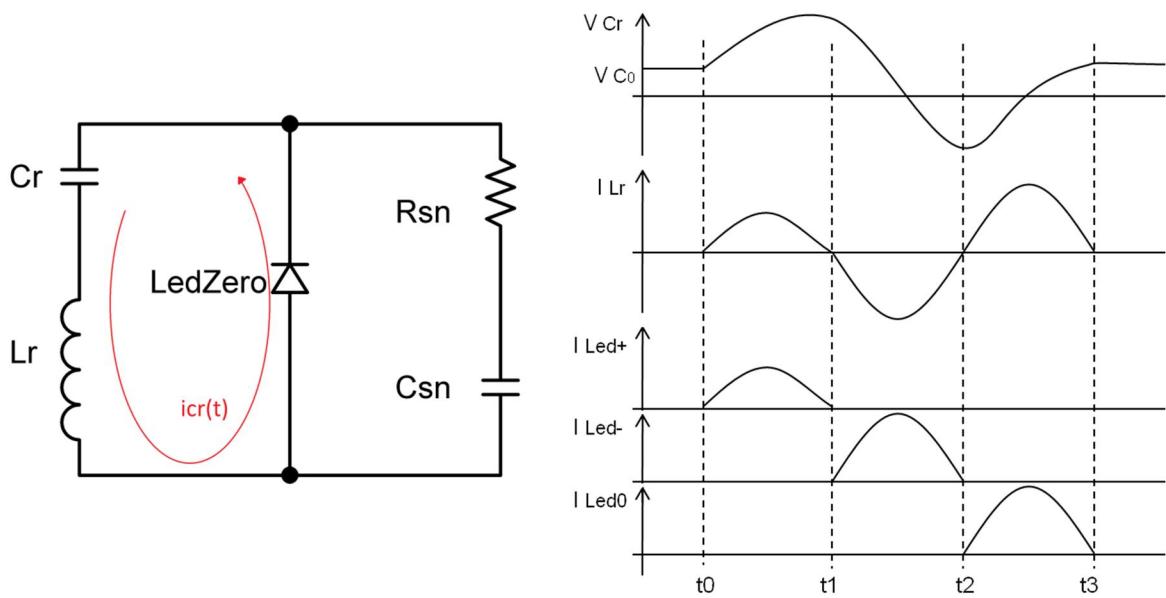


Figura 5.4 – Circuito equivalente do terceiro estágio (esquerda) e Tensão no capacitor \$Cr\$, corrente nos diodos laser e no indutor \$Lr\$ (direita).

5.3. Análise Quantitativa da Topologia Ressonante

O seguinte item apresenta a análise quantitativa da topologia de acionamento dos diodos laser, baseado na combinação de circuitos ressonantes e *snubber*. Será apresentado o desenvolvimento das equações de tensão e corrente no capacitor ressonante. O dimensionamento dos componentes semicondutores do circuito de acionamento também será apresentado.

5.3.1. Equações de Estágio

As equações de tensão e corrente no capacitor ressonante em seus três estágios de funcionamento são apresentadas a seguir.

Será válida para todos os estágios a sequência de equações da Eq. (5.1) até a Eq. (5.6).

$$W_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \quad (5.1)$$

$$W_0 = \frac{1}{\sqrt{C_r \cdot L_r}} \quad (5.2)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (5.3)$$

$$\nu_{Lr} = L_r \cdot \frac{d[i_c(\lambda)]}{dt} \quad (5.4)$$

$$i_c(\lambda) = C_r \cdot \frac{d[\nu_c(\lambda)]}{dt} \quad (5.5)$$

$$w_c = \frac{1}{R_{sn} \cdot C_{sn}} \quad (5.6)$$

5.3.1.1. Primeiro Estágio do Circuito Ressonante

A Figura 5.5 apresenta o circuito equivalente da topologia de acionamento dos diodos laser e a Tabela 5.1 apresenta os valores de tensão de corrente para as condições iniciais e finais para o primeiro estágio de funcionamento.

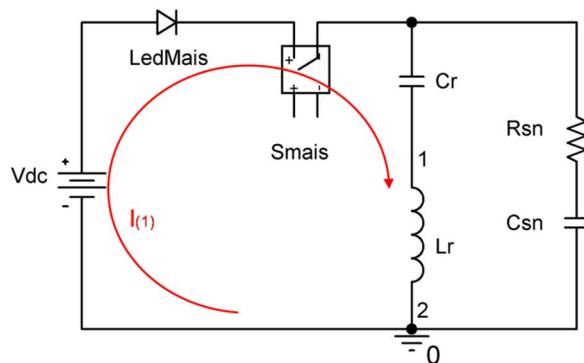


Figura 5.5 – Circuito equivalente do primeiro estágio.

Tabela 5.1 – Condições iniciais e finais para o primeiro estágio do circuito ressonante.

Elemento Ressonante	Valor Inicial (t_0)	Valor Final (t_1)
Tensão no capacitor ressonante C_r	V_{C0}	$V_{Cr}(t_1)$
Corrente no indutor ressonante L_r	0	0

O valor de V_{C0} será calculado ao final do terceiro estágio.

Pela teoria de circuitos e sabendo-se que há uma queda constante de tensão sobre LedMais (V_{LED}), obtém-se a Eq. (5.7).

$$V_{DC} - V_{LED} = V_{Cr}(\lambda) + V_{Lr}(\lambda) \quad (5.7)$$

Substituindo a Eq. (5.4) na Eq. (5.7) tem-se:

$$V_{DC} - V_{LED} = V_{Cr}(\lambda) + L_r \cdot \frac{d[i_c(\lambda)]}{dt} \quad (5.8)$$

Aplicando a transformada de Laplace na Eq. (5.8) e isolando $V_{Cr}(s)$, tem-se:

$$V_{Cr}(s) = \frac{V_{DC} - V_{LED}}{s} - L_r \cdot [s \cdot I_{Cr}(s) - I_{Cr}(0)] \quad (5.9)$$

Aplicando a transformada de Laplace na Eq. (5.5), tem-se que:

$$I_{Cr}(s) = C_r \cdot [s \cdot V_{Cr}(s) - V_{Cr}(0)] \quad (5.10)$$

Substituindo a Eq. (5.9) na Eq. (5.10) e aplicando as condições iniciais:

$$I_{Cr}(s) = C_r \cdot \left[s \cdot \left(\frac{V_{DC} - V_{LED}}{s} - L_r \cdot s \cdot I_{Cr}(s) \right) - V_{C_0} \right] \quad (5.11)$$

Isolando o termo $I_{Cr}(s)$ na Eq. (5.11), tem-se:

$$I_{Cr}(s) = \frac{C_r \cdot (V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0})}{1 + C_r \cdot L_r \cdot s^2} \quad (5.12)$$

Aplicando a Eq. (5.2) na Eq. (5.12):

$$I_{Cr}(s) = \frac{C_r \cdot w_0^2 \cdot (V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0})}{s^2 + w_0^2} \quad (5.13)$$

Aplicando a Eq. (5.3) e a transformada inversa de Laplace na Eq. (5.13), pode-se obter a equação da corrente sobre o capacitor ressonante C_r durante o primeiro estágio de funcionamento do circuito de acionamento.

$$i_{Cr(1)}(\lambda) = \frac{(V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0})}{Z_0} \cdot \operatorname{sen}(w_0 \cdot \lambda) \quad (5.14)$$

Para o cálculo da tensão sobre o capacitor ressonante C_r , basta substituir a Eq. (5.14) obtida na Eq. (5.8). Portanto:

$$V_{DC} - V_{LED} = V_{Cr(1)}(\lambda) + L_r \cdot \frac{\left[\frac{(V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0})}{Z_0} \cdot \operatorname{sen}(w_0 \cdot \lambda) \right]}{dt} \quad (5.15)$$

Resolvendo a derivada e isolando o termo $V_{C(1)}(\lambda)$, tem-se então:

$$V_{C(1)}(\lambda) = (V_{DC} - V_{LED})[1 - \cos(\omega_0 \cdot \lambda)] + V_{C_0} \cdot \cos(\omega_0 \cdot \lambda) \quad (5.16)$$

O cálculo da tensão no capacitor ressonante C_r no instante t_1 , $V_{Cr}(t_1)$, pode ser realizado da seguinte forma:

Iguala-se a Eq. (5.14) a zero, condição final de corrente, e encontra-se o instante t_1 onde a tensão $V_{Cr}(t_1)$ ocorre.

Aplica-se o instante encontrado na Eq. (5.16) e o resultado é $V_{Cr}(t_1)$.

Igualando a Eq. (5.14) a zero:

$$\frac{(V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0})}{Z_0} \cdot \sin(\omega_0 \cdot \lambda) = 0 \quad (5.17)$$

A equação anterior é satisfeita com $\omega_0 \cdot t = 0$ ou $\omega_0 \cdot t = \pi$. Sabendo-se que o valor de tensão desejado se encontra no final do primeiro estágio, deve-se substituir $\omega_0 \cdot t = \pi$ na Eq. (5.16).

Portanto, o valor final da tensão sobre o capacitor C_r no instante t_1 , $V_{Cr}(t_1)$, é:

$$V_{Cr}(t_1) = 2 \cdot (V_{DC} - V_{LED}) - V_{C_0} \quad (5.18)$$

Para o cálculo da corrente de pico I_{pico} que passa pelo capacitor ressonante, deve-se derivar a Eq. (5.14) e igualar a zero. Encontra-se, assim, o instante onde o pico de corrente ocorre. Em seguida, aplica-se o instante encontrado na Eq. (5.14) e obtém-se é I_{pico} . Logo, derivando-se a Eq. (5.14) e igualando a zero, tem-se

$$\frac{d[i_{C(1)}(\lambda)]}{dt} = \frac{(V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0})}{Z_0} \cdot \omega_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot \lambda) = 0 \quad (5.19)$$

A Equação (5.19) é satisfeita quando $\omega_0 \cdot t = \pi/2$ ou $\omega_0 \cdot t = 3\pi/2$. Sabendo-se que o valor de tensão desejado se encontra ainda no primeiro estágio, deve-se substituir $\omega_0 \cdot t = \pi/2$. Aplicando este valor na Eq. (5.14), tem-se o valor da corrente de pico para o primeiro estágio.

$$I_{pico} = \frac{V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0}}{Z_0} \quad (5.20)$$

O intervalo de tempo de duração deste estágio pode ser obtido através da Eq. (5.17) Sabendo-se que:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 \quad (5.21)$$

E que $\omega_0 \cdot t = \pi$ satisfaz a Eq. (5.17), tem-se que:

$$t_1 = \frac{\pi}{\omega_0} \quad (5.22)$$

Como $t_0 = 0$, então:

$$\Delta t_1 = \frac{\pi}{\omega_0} \quad (5.23)$$

5.3.1.2. Segundo Estágio do Circuito Ressonante

A Figura 5.6 apresenta o circuito equivalente da topologia de acionamento dos diodos laser e a Tabela 5.2 apresenta os valores de tensão de corrente para as condições iniciais e finais para o segundo estágio de funcionamento.

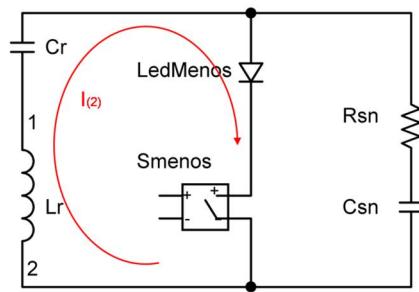


Figura 5.6 – Circuito equivalente do segundo estágio.

Tabela 5.2 – Condições iniciais e finais para o segundo estágio do circuito ressonante.

Elemento Ressonante	Valor Inicial (t_1)	Valor Final (t_2)
Tensão no capacitor ressonante C_r	$2 \cdot (V_{DC} - V_{LED}) - V_{C_0}$	$V_{Cr}(t_2)$
Corrente no indutor ressonante L_r	0	0

Pela teoria de circuitos e, considerando-se uma queda de tensão sobre LedMenos (V_{LED}), obtém-se a Eq. (5.24).

$$V_{Cr}(\lambda) + V_{Lr}(\lambda) + V_{LED} = 0 \quad (5.24)$$

Substituindo a Eq. (5.4) na Eq. (5.24) tem-se:

$$V_{Cr}(\lambda) + L_r \cdot \frac{d[i_c(\lambda)]}{dt} + V_{LED} = 0 \quad (5.25)$$

Aplicando a transformada de Laplace na Eq. (5.25) e isolando $V_{Cr}(s)$, tem-se:

$$V_{Cr}(s) = -\frac{V_{LED}}{s} - L_r \cdot [s \cdot i_c(s) - i_c(0)] \quad (5.26)$$

Substituindo a Eq. (5.26) na Eq. (5.10) e aplicando as condições iniciais:

$$i_c(s) = C_r \cdot \left[s \cdot \left(-\frac{V_{LED}}{s} - L_r \cdot s \cdot i_c(s) \right) - 2 \cdot (V_{DC} - V_{LED}) + V_{C_0} \right] \quad (5.27)$$

Isolando o termo $i_c(s)$ na Eq. (5.27), tem-se:

$$i_c(s) = \frac{C_r \cdot (V_{LED} + V_{C_0} - 2 \cdot V_{DC})}{1 + C_r \cdot L_r \cdot s^2} \quad (5.28)$$

Aplicando a Eq. (5.2) na Eq. (5.28):

$$i_c(s) = \frac{C_r \cdot W_0^2 \cdot (V_{LED} + V_{C_0} - 2 \cdot V_{DC})}{s^2 + W_0^2} \quad (5.29)$$

Aplicando a Eq. (5.3) e a transformada inversa de Laplace na Eq. (5.29), pode-se obter a equação da corrente sobre o capacitor ressonante C_r durante o segundo estágio de funcionamento do circuito de acionamento.

$$i_{C_{(2)}}(\lambda) = \frac{(V_{LED} + V_{C_0} - 2 \cdot V_{DC})}{Z_0} \cdot \operatorname{sinc} W_0 \cdot \lambda \quad (5.30)$$

Substituindo a Eq. (5.30) obtida na Eq. (5.25), derivando e isolando o termo $V_{C_{(2)}}(\lambda)$, tem-se então:

$$V_{C_{(2)}}(\lambda) = -V_{LED} - (V_{LED} + V_{C_0} - V_{DC}) \cdot \cos(\omega_0 \cdot \lambda) \quad (5.31)$$

O cálculo da tensão no capacitor ressonante C_r no instante t_2 , $V_{Cr}(t_2)$, é feito similarmente ao da tensão final do primeiro estágio, descrito no item anterior.

Igualando a Eq. (5.30) a zero:

$$\frac{(V_{LED} + V_{C_0} - 2 \cdot V_{DC})}{Z_0} \cdot \sin(\omega_0 \cdot \lambda) = 0 \quad (5.32)$$

Da mesma forma, a equação anterior é satisfeita com $\omega_0 \cdot t = 0$ ou $\omega_0 \cdot t = \pi$. Sabendo-se que a tensão desejada se encontra no final do estágio, deve-se substituir $\omega_0 \cdot t = \pi$ na Eq. (5.31). Portanto, o valor final da tensão sobre o capacitor C_r no instante t_2 , $V_{Cr}(t_2)$, é:

$$V_{Cr}(t_2) = V_{C_0} - 2 \cdot V_{DC} \quad (5.33)$$

O cálculo da corrente de pico I_{pico} no segundo estágio é similar ao apresentado no estágio anterior. Derivando a Eq. (5.30) e igualando a zero:

$$\frac{d[i_{C_{(2)}}(\lambda)]}{dt} = \frac{(V_{LED} + V_{C_0} - 2 \cdot V_{DC})}{Z_0} \cdot \omega_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot \lambda) = 0 \quad (5.34)$$

De forma similar, a Eq. (5.34) é satisfeita quando $\omega_0 \cdot t = \pi/2$. Portanto:

$$I_{pico_{(2)}} = \frac{(V_{LED} + V_{C_0} - 2 \cdot V_{DC})}{Z_0} \quad (5.35)$$

Sabendo que $\omega_0 \cdot t = \pi$ satisfaz a Eq. (5.32), tem-se que:

$$t_2 = \Delta t_2 = \frac{\pi}{\omega_0} \quad (5.36)$$

5.3.1.3. Terceiro Estágio do Circuito Ressonante

A Figura 5.7 apresenta o circuito equivalente da topologia de acionamento dos diodos laser para o terceiro estágio de funcionamento e a Tabela 5.3 apresenta os valores de tensão de corrente para as condições iniciais e finais.

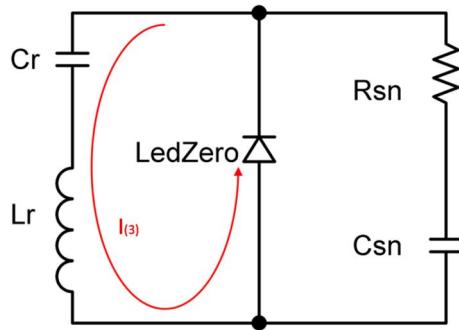


Figura 5.7 – Circuito equivalente do terceiro estágio.

Tabela 5.3 – Condições iniciais e finais para o terceiro estágio do circuito ressonante.

Elemento Ressonante	Valor Inicial (t_2)	Valor Final (t_3)
Tensão no capacitor ressonante C_r	$V_{C_0} - 2 \cdot V_{DC}$	V_{C_0}
Corrente no indutor ressonante L_r	0	0

Pela teoria de circuitos e, considerando-se uma queda de tensão sobre LedZero (V_{LED}), obtém-se a Eq. (5.37).

$$V_{Cr}(t) + V_{Lr}(t) + V_{LED} = 0 \quad (5.37)$$

A Equação (5.37) encontrada é similar à Eq. (5.25) para o segundo estágio de funcionamento. Portanto, as manipulações que se seguem são similares às apresentadas no estágio anterior. Aplicando a transformada de *Laplace*, substituindo na equação de corrente e aplicando as condições iniciais, tem-se:

$$I_{Cr}(s) = C_r \cdot \left[s \cdot \left(-\frac{V_{LED}}{s} - L_r \cdot s \cdot I_{Cr}(s) \right) + 2 \cdot V_{DC} - V_{C_0} \right] \quad (5.38)$$

Isolando o termo $I_{Cr}(s)$ na Eq. (5.38) e aplicando a Eq. (5.2), tem-se:

$$i_C(s) = \frac{C_r \cdot w_0^2 \cdot (2 \cdot V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0})}{s^2 + w_0^2} \quad (5.39)$$

Aplicando a Eq. (5.3) e a transformada inversa de *Laplace* na Eq. (5.39), pode-se obter a equação regente da corrente sobre o capacitor ressonante C_r durante o terceiro estágio de funcionamento.

$$i_{C(3)}(\lambda) = \frac{(2 \cdot V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0})}{Z_0} \cdot \operatorname{sen}(w_0 \cdot \lambda) \quad (5.40)$$

Substituindo a Eq. (5.40) obtida na Eq. (5.37), derivando e isolando o termo $V_{C(3)}(\lambda)$, tem-se então:

$$V_{C(3)}(\lambda) = -V_{LED} - (2 \cdot V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0}) \cdot \cos(w_0 \cdot \lambda) \quad (5.41)$$

O cálculo da tensão no capacitor ressonante C_r no instante t_3 , $V_{Cr}(t_3)$, é feito similarmente ao da tensão final do primeiro estágio, descrito anteriormente.

Igualando a Eq. (5.40) a zero:

$$\frac{(2 \cdot V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0})}{Z_0} \cdot \operatorname{sen}(w_0 \cdot t) = 0 \quad (5.42)$$

Da mesma forma, a equação anterior é satisfeita com $w_0 \cdot t = 0$ ou $w_0 \cdot t = \pi$. Deve se substituir $w_0 \cdot t = \pi$ na Eq. (5.41) e, portanto, o valor final da tensão sobre o capacitor C_r no instante t_3 , $V_{Cr}(t_3)$, é:

$$V_{Cr}(t_3) = 2 \cdot V_{DC} - V_{C_0} - 2 \cdot V_{LED} \quad (5.43)$$

Como a tensão final sobre o capacitor ressonante neste estágio é igual à tensão inicial encontrada no primeiro estágio de funcionamento, tem-se:

$$V_{Cr}(t_3) = V_{C_0} \quad (5.44)$$

Então:

$$V_{C_0} = V_{DC} - V_{LED} \quad (5.45)$$

O cálculo da corrente de pico I_{pico} no terceiro estágio é similar ao apresentado no estágio anterior. Derivando a Eq. (5.40) e igualando a zero:

$$\frac{d[i_{C(3)}(\lambda)]}{dt} = \frac{(2 \cdot V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0})}{Z_0} \cdot w_0 \cdot \cos(w_0 \cdot \lambda) = 0 \quad (5.46)$$

De forma similar, a Eq. (5.46) é satisfeita quando $w_0 \cdot t = \pi/2$. Portanto:

$$I_{\text{pico}_{(3)}} = \frac{(2 \cdot V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0})}{Z_0} \quad (5.47)$$

Sabendo que $w_0 \cdot t = \pi$ satisfaz a Eq. (5.42), tem-se que:

$$t_3 = \Delta t_3 = \frac{\pi}{w_0} \quad (5.48)$$

Por fim, deve-se ressaltar que todas as equações citadas acima consideram os componentes como ideais, portanto, não levam em consideração características como resistência, capacidade ou indutância equivalentes. Para circuitos reais, entretanto, quedas na tensão existem e podem alterar os módulos encontrados, porém, sem distorcer o comportamento (forma de onda) dos sinais elétricos estudados aqui.

5.3.2. Dimensionamento dos Semicondutores

O dimensionamento dos semicondutores de qualquer circuito eletrônico deve ser baseado em, principalmente, três parâmetros: corrente de pico, corrente eficaz e corrente média. É através destes valores que se pode especificar e escolher componentes comercialmente disponíveis adequados ao projeto.

No caso da topologia de acionamento dos diodos laser de alta potência apresentados neste trabalho, um dos requisitos primários para a manutenção da vida útil destes emissores é a utilização de um baixo ciclo de trabalho, ou seja, um ciclo de trabalho de no máximo de 0,1%, como apresentado na Tabela 3.1.

Pelo ciclo de trabalho limite tem-se que o tempo de acionamento, ou a largura de pulso, das chaves Smais e Smenos deve ser, no mínimo, mil vezes menor que o tempo entre dois acionamentos, ou seja, o período de acionamento. Sabendo-se, ainda, que a

corrente se comporta de forma senoidal, pode-se achar uma relação matemática entre as correntes de pico, eficaz e média.

De forma genérica, tem-se a equação da corrente sobre uma chave como:

$$i(t) = I_{\text{pico}} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \quad (5.49)$$

Por definição, a corrente eficaz pode ser calculada por:

$$I_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_0} \cdot \int_{T_0}^{T_2} [i(t)]^2 \cdot dt} \quad (5.50)$$

Sabe-se que a equação da corrente se comporta de forma senoidal apenas durante o tempo de acionamento das chaves, entre T_0 e T_1 , e é nula entre dois acionamentos consecutivos, entre T_1 e T_2 , como mostra a Figura 5.8.

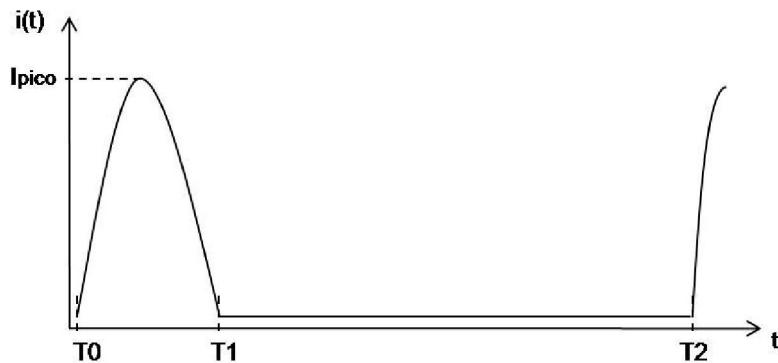


Figura 5.8 – Forma de onda esquemática sobre uma chave durante um ciclo de pulso.

Pode-se, então, substituir a Eq. (5.49) na Eq. (5.50) e expandir a Eq. (5.50) para:

$$I_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_0} \cdot \left[\left(\int_{T_0}^{T_1} [I_{\text{pico}} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)]^2 \cdot dt \right) + \left(\int_{T_1}^{T_2} [0]^2 \cdot dt \right) \right]} \quad (5.51)$$

Aplicando a restrição imposta pelo ciclo de trabalho:

$$T_2 = 1000 \cdot T_1 \quad (5.52)$$

Substituindo a Eq. (5.52) na Eq. (5.51) e resolvendo a integração tem-se que:

$$I_{ef} = \frac{I_{pico}}{\sqrt{2000}} \cong 0,02 \cdot I_{pico} \quad (5.53)$$

Sendo assim, a corrente eficaz que passa por cada chave nesta topologia de acionamento é desprezível quando comparada à corrente de pico e, portanto, pode ser desconsiderada para a escolha dos componentes durante o projeto. O mesmo cálculo pode ser utilizado para a corrente média.

Por definição, a corrente média sobre uma das chaves é dado por:

$$I_{med} = \frac{1}{T_2 - T_0} \cdot \int_{T_0}^{T_2} I(t) \cdot dt \quad (5.54)$$

Expandindo a Eq. (5.54) para os períodos de forma senoidal e nula:

$$I_{med} = \frac{1}{T_2 - T_0} \cdot \left[\left(\int_{T_0}^{T_1} I_{pico} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \cdot dt \right) + \left(\int_{T_1}^{T_2} 0 \cdot dt \right) \right] \quad (5.55)$$

Aplicando a Eq. (5.52) na Eq. (5.55) e resolvendo a integração tem-se:

$$I_{med} = \frac{2 \cdot I_{pico}}{1000 \cdot \pi} \cong 0,0006 \cdot I_{pico} \quad (5.56)$$

Da mesma forma que a corrente eficaz, a corrente média que passa pela chave durante o funcionamento de um ciclo de pulso pode ser considerada desprezível quando comparada à corrente de pico. Portanto, para o dimensionamento dos semicondutores, apenas a corrente de pico deverá ser levada em consideração.

5.3.2.1. Corrente de Pico na chave Smais

A chave Smais está em condução apenas durante o primeiro ciclo de trabalho. A corrente assumida para esta chave durante sua condução segue a forma da corrente sobre o capacitor ressonante C_r descrita pela Eq. (5.14). A corrente de pico, já calculada para o componente ressonante, é:

$$I_{Smais,pico} = \frac{V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0}}{Z_0} \quad (5.57)$$

5.3.2.2. Corrente de Pico na chave Smenos

A chave Smenos está em condução apenas durante o segundo ciclo de trabalho. A corrente assumida para esta chave durante sua condução segue a forma da corrente sobre o capacitor ressonante C_r descrita pela Eq. (5.30). A corrente de pico sobre esta chave durante o segundo estágio, já calculada para o componente ressonante, é:

$$I_{Smenos(pico)} = \frac{(V_{LED} + V_{C_0} - 2 \cdot V_{DC})}{Z_0} \quad (5.58)$$

5.3.2.3. Tensão Reversa em todos os Semicondutores

Durante os três estágios de funcionamento da topologia ressonante, os semicondutores estarão ou em condução ou sofrendo uma tensão reversa sobre eles. Neste caso, o valor máximo de tensão aplicada reversamente sobre qualquer um dos semicondutores é a tensão provinda da fonte, ou seja, V_{DC} .

5.4. Circuitos Auxiliares

A topologia ressonante permite o uso do máximo de corrente em um intervalo de tempo pequeno, ideal para o acionamento dos diodos laser de alta potência. Isto só é possível através do chaveamento de semicondutores em alta frequência, ou seja, é necessário que as chaves semicondutoras recebam sinais de comutação nesta mesma frequência elevada.

Circuitos de controle de chaves semicondutoras podem ser implementados de diversas formas e com diferentes topologias, dependendo principalmente da frequência de trabalho, da própria chave semicondutora que se deseja controlar e do tipo de proteção necessária. Para altas frequências, e quando é necessário o isolamento elétrico entre o circuito de controle e o circuito de potência, os circuitos auxiliares para o comando de comutação de uma chave semicondutora são ilustrados na Figura 5.9.

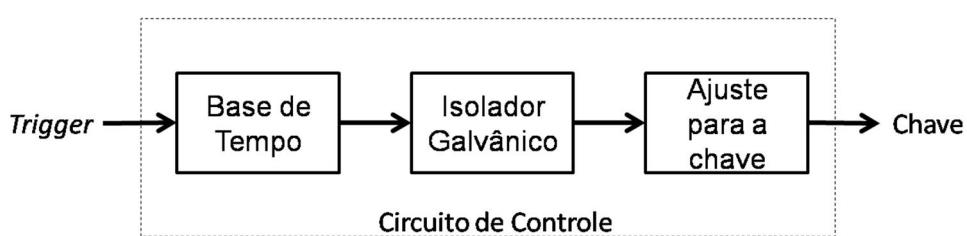


Figura 5.9 – Circuitos auxiliares para a comutação de um chave semicondutora.

O sinal de *trigger*, externo ou interno ao sistema, é a entrada do circuito, geralmente indicando o momento onde a comutação da chave semicondutora deve ser realizado. Este sinal de *trigger* é, normalmente, um sinal de baixa frequência (entre 25 Hz e 1 kHz) e não respeita as limitações impostas pelo diodo laser. Sendo assim, um circuito é projetado para diminuir a duração do pulso de acionamento para a base de tempo desejada, com frequência elevada. Um circuito isolador protege o circuito de controle da alta potência no circuito que é controlado e, um último circuito, ajusta os valores de tensão e corrente para uma melhor comutação da chave semicondutora escolhida.

Para chaves onde o isolamento não é necessário, ou seja, onde as referências dos dois circuitos – controle e potência – estão interligadas, pode-se apenas retirar o circuito intermediário (isolador), sem maiores alterações. Porém, para maior proteção do circuito gerador do *trigger*, manteve-se, neste trabalho, o isolamento galvânico para as duas chaves.

5.4.1. Circuito da Base de Tempo

O circuito inicialmente responsável pela determinação da base de tempo em alta frequência, tempo dado pela limitação do diodo laser utilizado, através de um *trigger* em baixa frequência é ilustrado pela Figura 5.10. É importante ressaltar que o sinal de entrada deve ser do tipo TTL (lógica transistor-transistor).

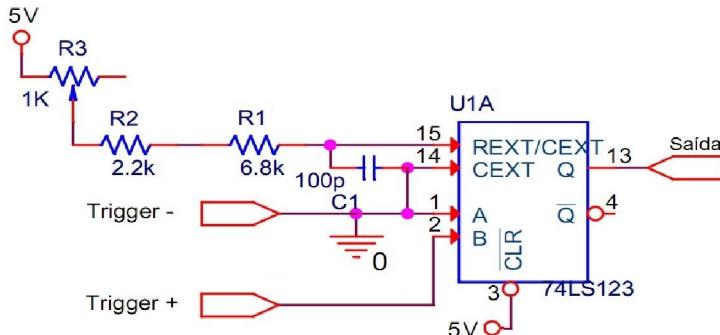


Figura 5.10 – Circuito da base de tempo.

O CI (circuito integrado) 74LS123 é um circuito duplo de multivibradores monoestáveis redispersaráveis capaz de programar um pulso de saída com largura variando de 35 ns até 28 segundos, através da escolha apropriada dos componentes de tempo, R_{ext} e C_{ext} (TEXAS INSTRUMENTS, 2005).

A duração do pulso básico de saída é essencialmente determinada pelos valores externos de capacidade e resistência. De acordo com o fabricante (TEXAS

INSTRUMENTS, 1997), a duração do pulso, t_w , quando $C_{ext} < 1\mu F$ é determinado pela Eq. (5.59).

$$t_w = K \cdot R_{ext} \cdot C_{ext} \quad (5.59)$$

Onde a duração do pulso é dada em ns, K é fator multiplicador adimensional, a resistência é dada em k Ω e a capacitância em pF. Para uma capacitância de $C_{ext} = 100\text{ pF}$ tem-se um fator multiplicador $K=0,55$.

Uma das aplicações para este circuito duplo (dois multivibradores monoestáveis em apenas um circuito integrado) é a geração de duplo pulso com atraso e sobreposição, como é ilustrado na Figura 5.11.

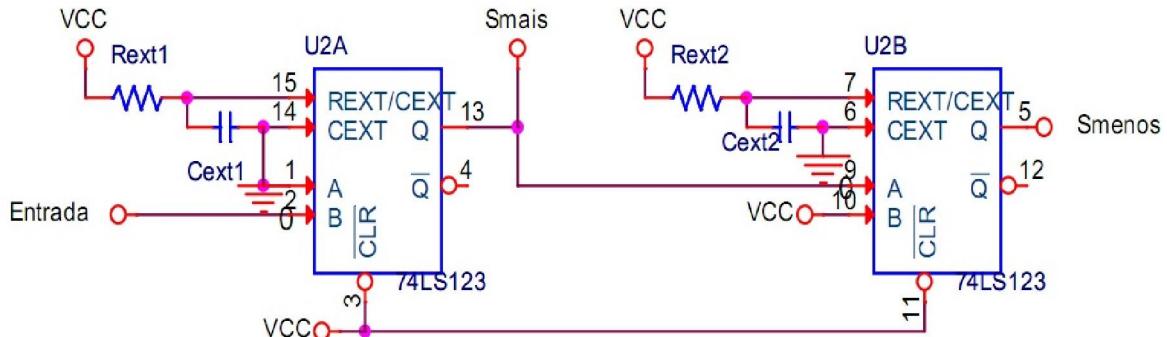


Figura 5.11 – Geração de duplo pulso com atraso e sobreposição.

O primeiro disparador (UA) é responsável pelo disparo da primeira chave (Smais) e determina o tempo de atraso pela escolha dos componentes R_{ext1} e C_{ext1} . O segundo disparador (UB) é direcionado para a segunda chave semicondutora (Smenos) e sua duração é determinada por R_{ext2} e C_{ext2} . A sequência de pulsos pode ser iniciada a qualquer momento pela borda de subida de um pulso de entrada, como visto na Figura 5.12.

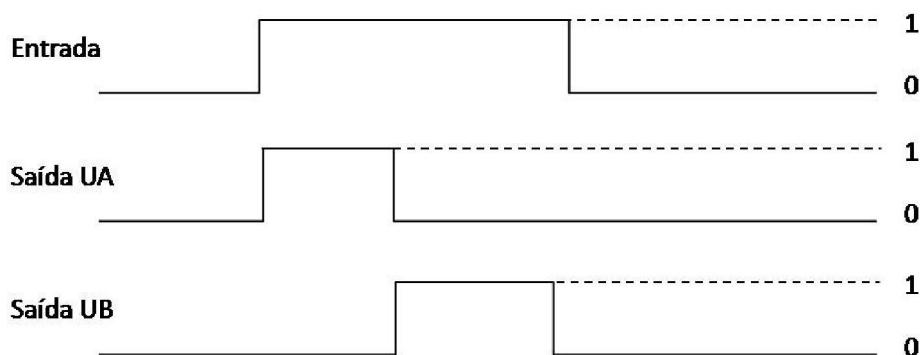


Figura 5.12 – Esquema de pulsos da aplicação de duplo pulso com atraso e sobreposição.

Em testes preliminares do sistema de controle em conjunto com a topologia de acionamento dos diodos laser, o circuito RC de atraso da base de tempo mostrou-se afetado por captação de ruído eletromagnético, gerando sobrechaveamento nas chaves comutadoras. Mesmo com a utilização de uma proteção metálica ao redor do circuito, o ruído eletromagnético não foi eliminado. Uma das soluções encontradas para a diminuição da interferência do circuito de potência sobre o circuito da base de tempo foi a substituição do gerador de duplo pulso com atraso e sobreposição, de caráter analógico (RC), por um circuito gerador de pulsos digital, menos sensível a ruídos externos, através do uso de microcontroladores (MCU).

O microcontrolador de 8 bits 16F877A (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2010) com encapsulamento de 40 ou 44 pinos possui grande capacidade de execução (200 nanosegundos de instrução) contando, ainda, com programação simples. Suas funcionalidades envolvem 256 bytes de memória programável EEPROM, 2 comparadores, 8 canais de conversores analógicos digital (A/D) de 10 bits, 2 funções PWM, entre outras. Estas funcionalidades o tornam ideal para aplicações avançadas de A/D nos setores automotivo, industrial e para consumidores finais.

Através de um timer de 16 bits disponível (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2003) e um *clock* externo adequado, o microprocessador é capaz de “contar” tempos variados, sendo assim, possível a criação do *trigger* interno em baixa frequência (25 a 1000 Hz) necessária para o acionamento das chaves comutadoras. O tempo de instrução de 200 ns permite a criação dos pulsos da base de tempo para as duas chaves de forma consecutiva. O perfil programável do MCU permite, ainda, uma flexibilidade que não seria possível com o circuito analógico apresentado anteriormente, como a utilização de interfaces com o usuário. O circuito simplificado de *trigger* e base de tempo, utilizando-se do MCU 16F877A, é ilustrado na Figura 5.13.

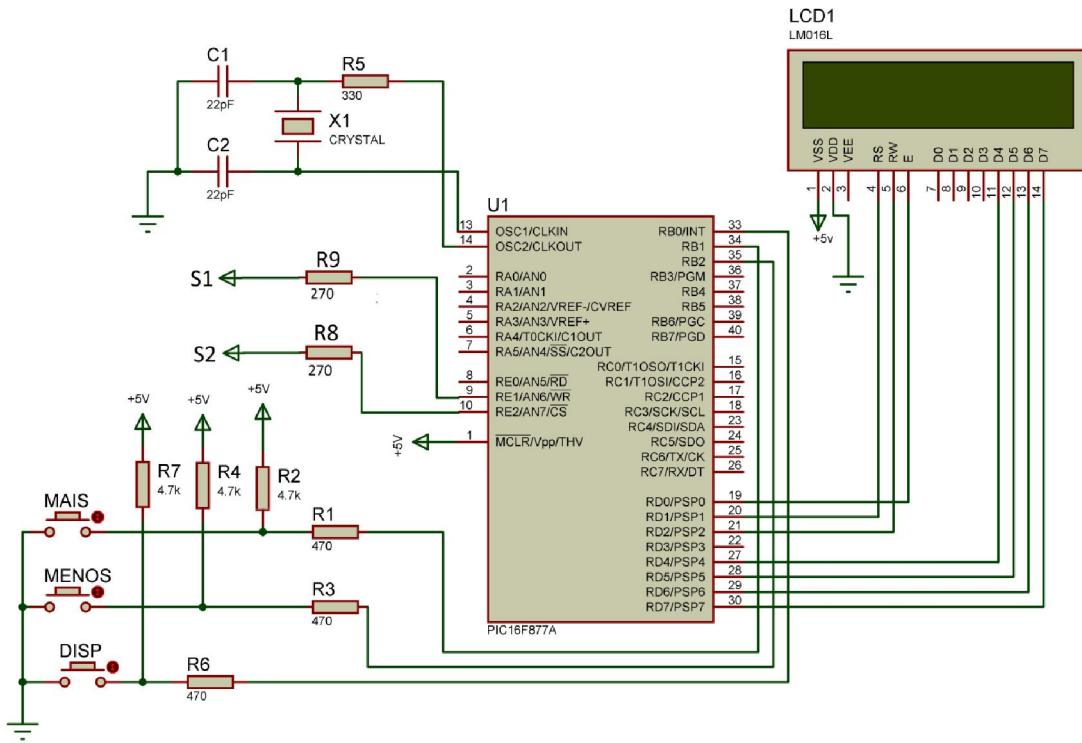


Figura 5.13 – Circuito de controle através do MCU 16F877A.

A frequência base em que ocorre o acionamento dos diodos laser é controlada pelo Timer1 do MCU. Na frequência determinada pelo cristal oscilador externo, o MCU cresce o valor de uma variável determinada, TMR (valor inicial atribuído ao contador do timer 1), e, quando esta variável atinge o valor máximo possível, dependendo do número de bits, ocorre uma interrupção, ilustrado na Figura 5.14. A frequência em que esta interrupção ocorre (Freq) é dada em função do cristal oscilador externo (Fosc), da configuração de bits do timer (BITS), da pré-escala utilizada (PS) e do valor inicial atribuído ao TMR, como mostra a Eq. (5.60).

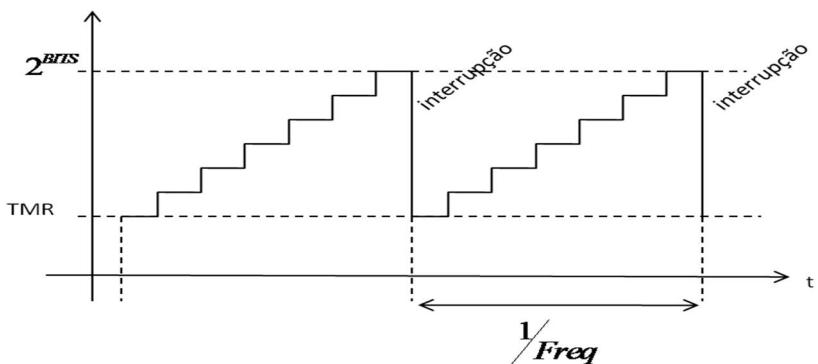


Figura 5.14 – Esquema de interrupção por timer.

$$TMR = 2^{BITS} - \left(\frac{FOSC}{4 \times PS \times Freq} \right) \quad (5.60)$$

O MCU envia pulsos de controle, portanto, para o acionamento das duas chaves comutadoras, Smais e Smenos, em cada interrupção do Timer 1. Além disso, o MCU é responsável pelo controle da aquisição de imagens, ou seja, envia de pulsos para o *trigger* de uma câmera, pelo acionamento de um conjunto relé-LED de segurança e pela geração de um sinal de frequência proporcional à frequência base, para fins de aferição do funcionamento do programa, como resume a Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Configurações das portas de saída do MCU.

Pino	Porta	Função
2	RA0	<i>Trigger</i> câmera
9	RE1	Chave Smais
10	RE2	Chave Smenos
22	RD3	Frequência
40	RB7	Relé-LED

A interface com o usuário é dada pelos três botões – “MAIS”, “MENOS” e “DISP” – e pelo LCD 16x2 indicados na Figura 5.13. Quando o sistema de controle é ligado, o usuário pode ajustar a frequência base de acionamento das chaves comutadoras, inicialmente de 25 Hz, através dos botões “MAIS” e “MENOS” e, pelo botão “DISP”, dar início ou parar este acionamento. O ajuste da frequência pode ser realizado a qualquer momento, desde que o usuário finalize o envio de pulsos para as chaves comutadoras. O LCD dá ao usuário informações como a frequência atual selecionada e o estado de acionamento dos diodos laser – “aguardando disparo” ou “enviando pulsos”. Seguem, da Figura 5.15 a Figura 5.20 os fluxogramas de toda a rotina de programação inserida no MCU para todo o circuito de *trigger* base de tempo.

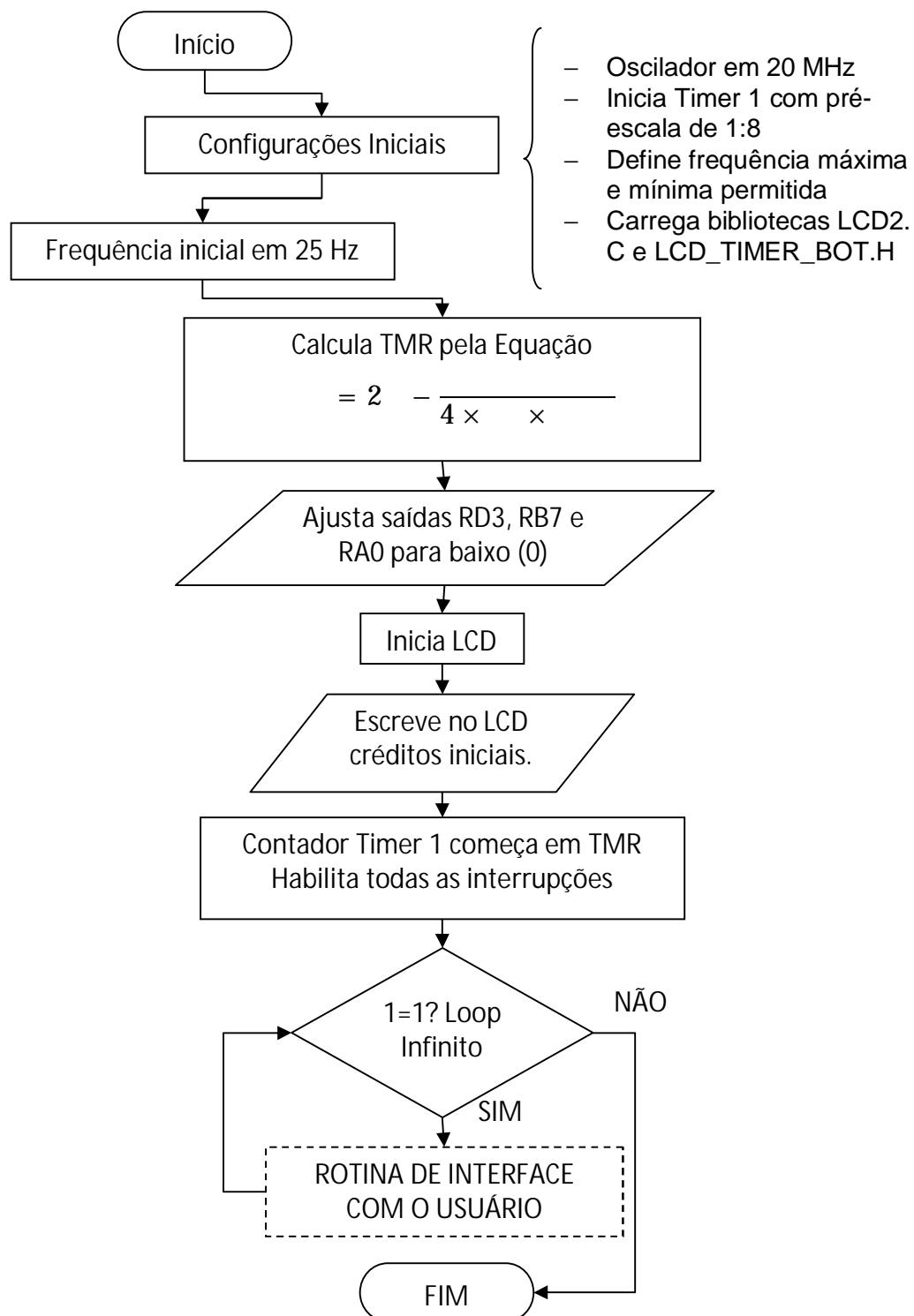


Figura 5.15 – Fluxograma do programa principal.

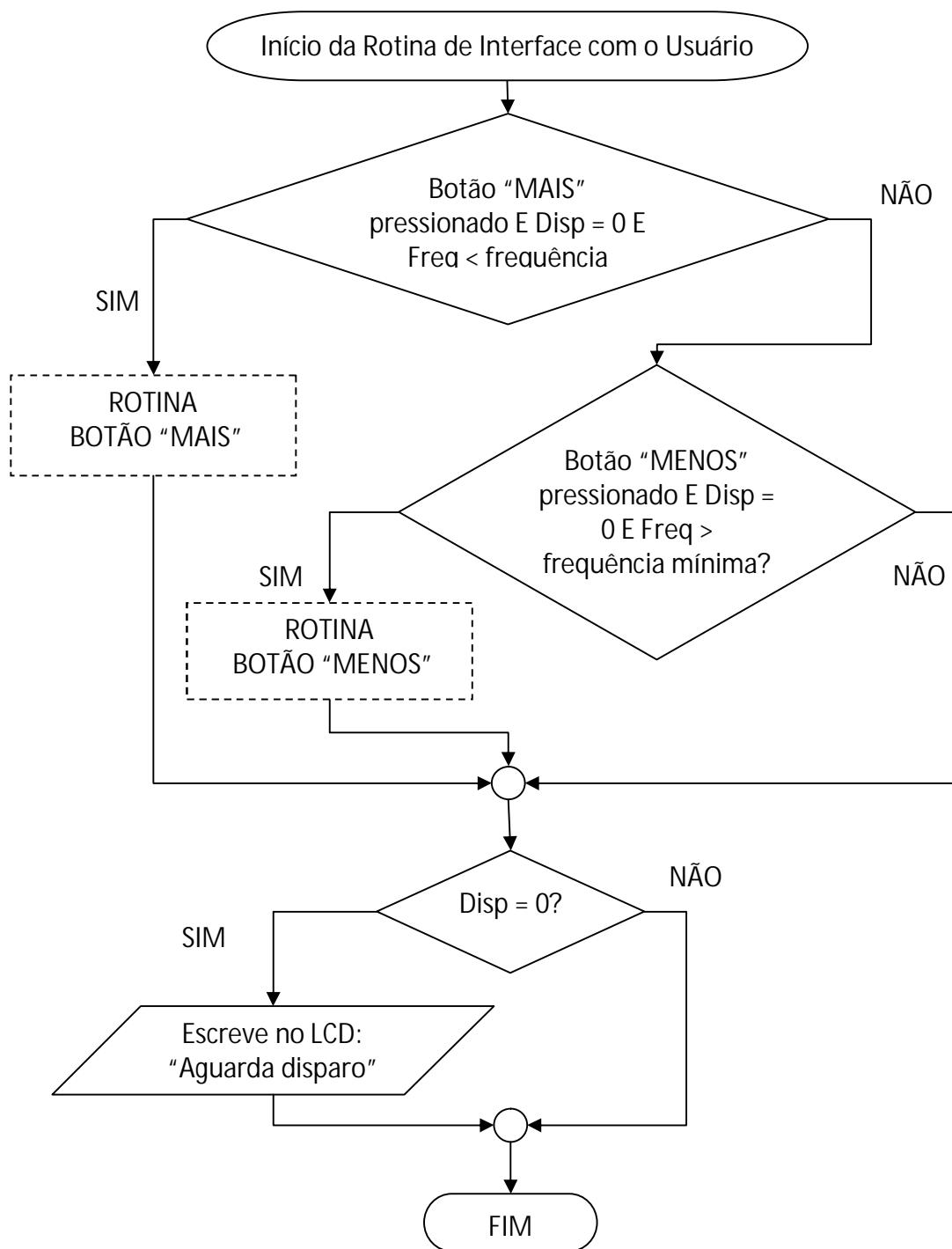


Figura 5.16 – Fluxograma da rotina de interface com o usuário.

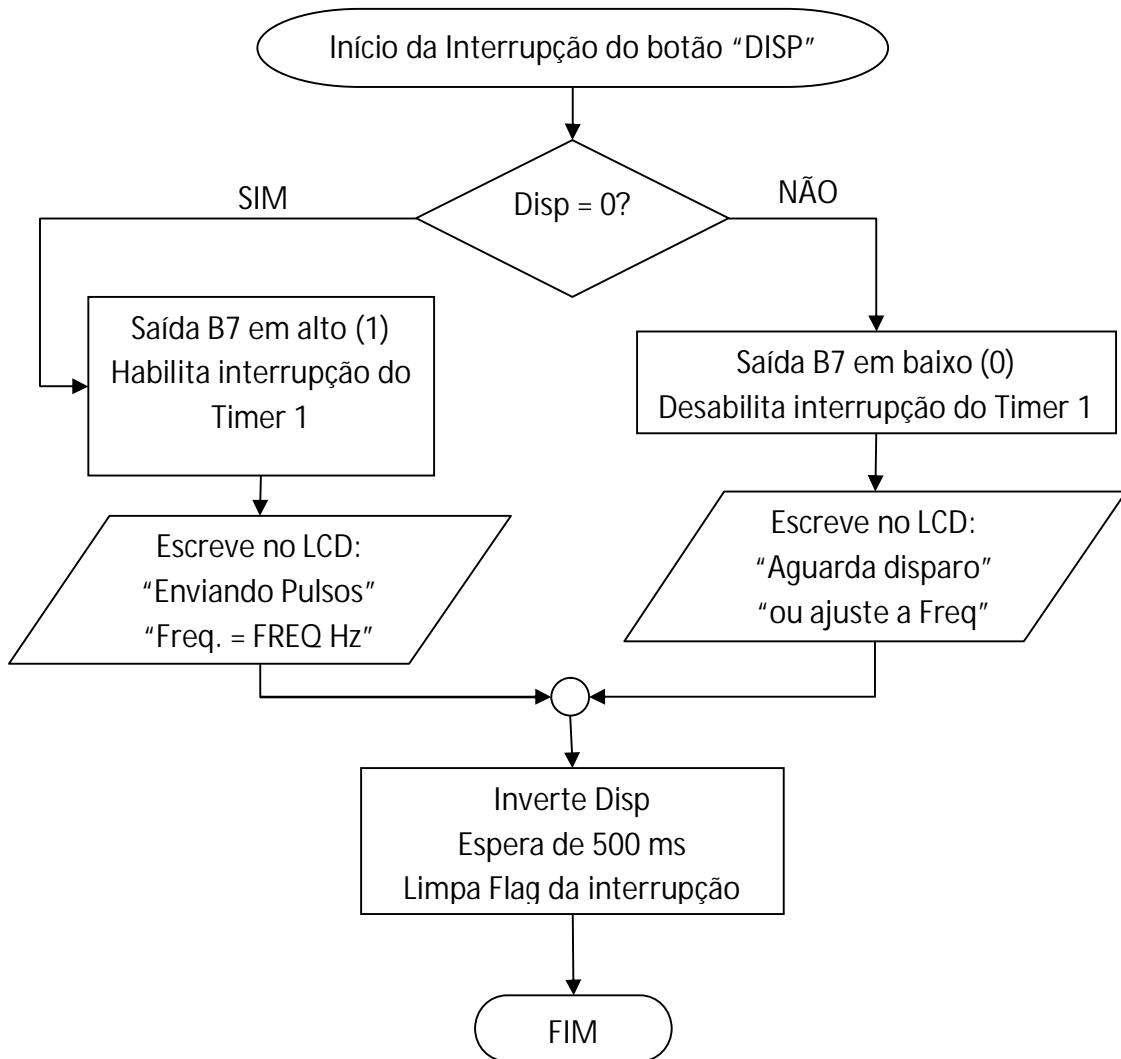


Figura 5.17 – Fluxograma da rotina de interrupção do botão “DISP”.

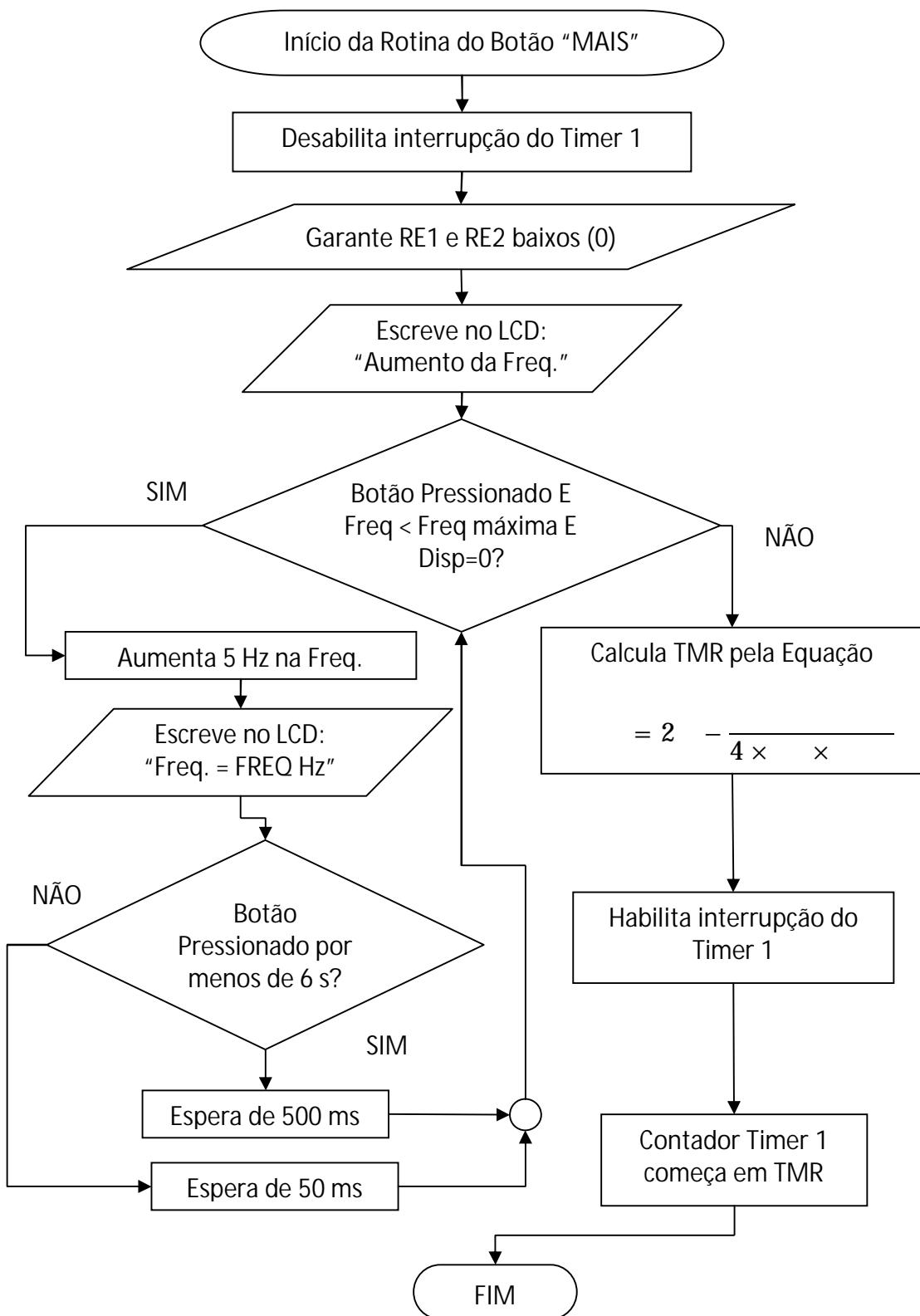


Figura 5.18 – Fluxograma da rotina do botão “MAIS”.

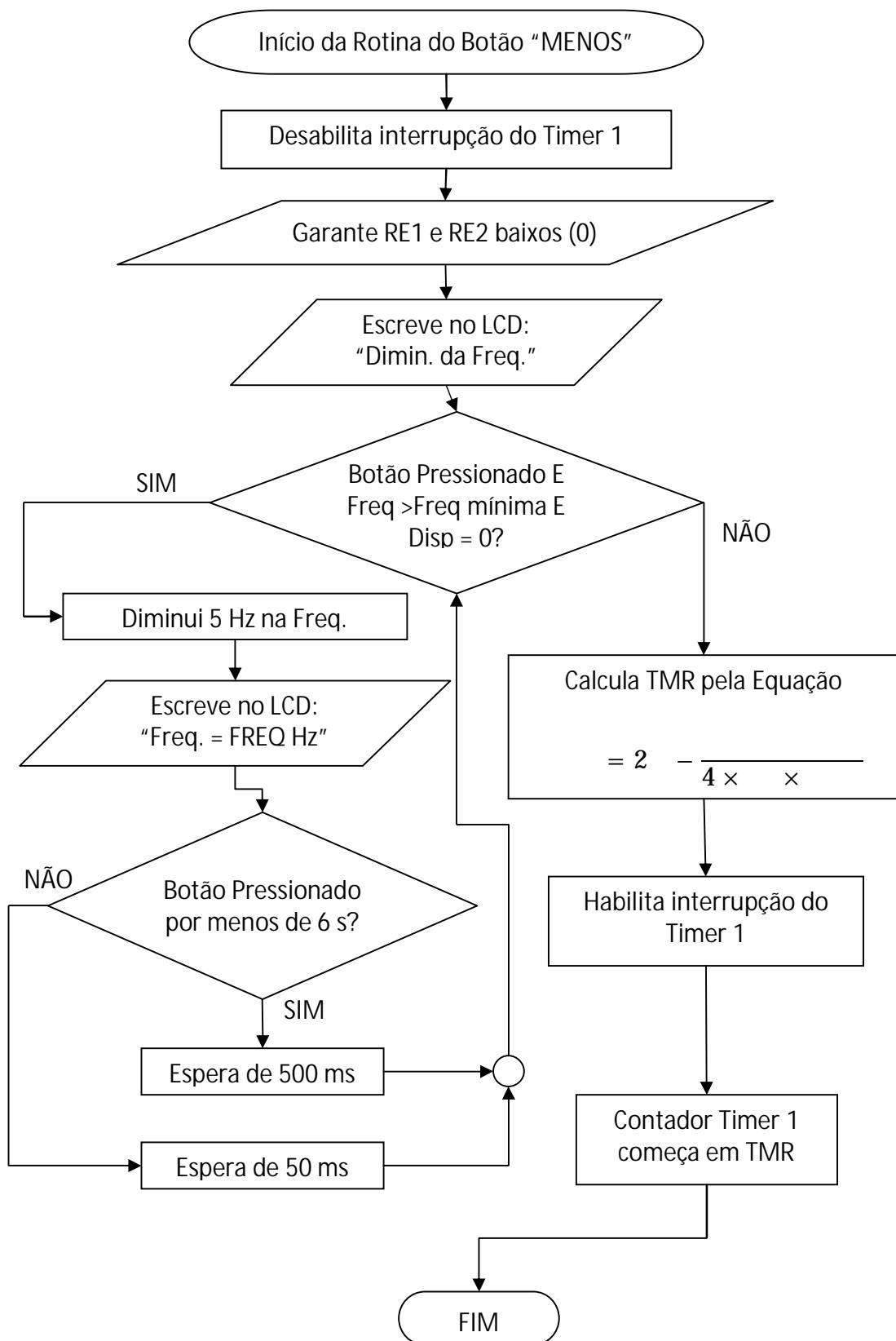


Figura 5.19 – Fluxograma da rotina do botão "MENOS".

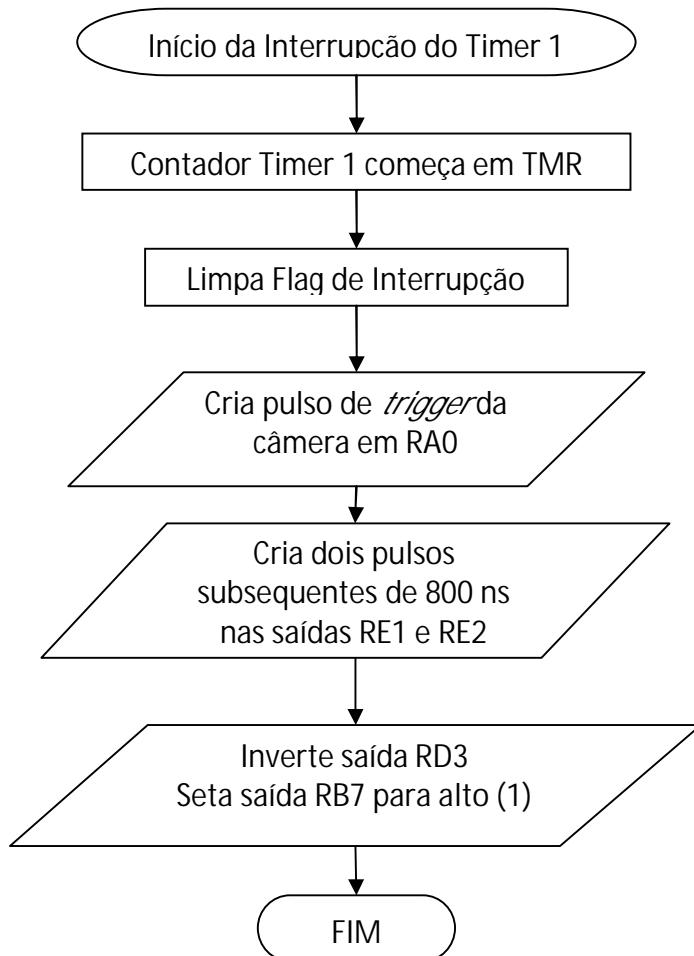


Figura 5.20 – Fluxograma da rotina de interrupção do Timer

5.4.2. Circuito Isolador Galvânico

O circuito isolador galvânico, como o próprio nome explica, promove o isolamento elétrico entre os dois circuitos situados em sua entrada e saída, assim, garantindo que o circuito de potência e o circuito de controle mantenham referenciais isolados. Este tipo de proteção impede a ocorrência de curtos-circuitos entre as duas partes e é ilustrado na Figura 5.21.

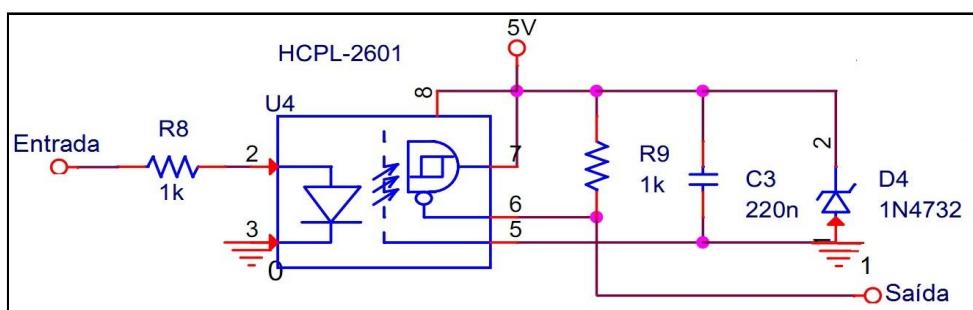


Figura 5.21 – Circuito de Isolamento Galvânico.

O isolamento galvânico propriamente dito é conseguido através do optoacoplador HCPL-2601. Sua alta velocidade de resposta permite sua utilização até mesmo em frequências elevadas, sendo constituído, basicamente, de um diodo emissor e de um receptor, isolados eletricamente.

O sinal de entrada passa por um limitador de corrente e é transmitido opticamente para a saída, de forma invertida, como pode ser visto na Figura 5.22. Um diodo zenner garante que haja a tensão correta sobre os pinos de alimentação e habilitação (FAIRCHILD SEMICONDUCTOR, 2001), 8 e 7 respectivamente. Deve-se ressaltar que a fonte de alimentação deste circuito está em um referencial diferente da fonte do sinal de entrada, evidenciado no esquema anterior.

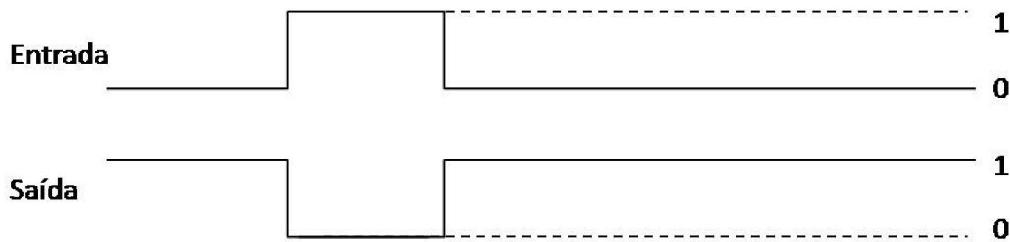


Figura 5.22 – Esquema de pulsos do circuito isolador galvânico.

5.4.3. Circuito de Ajuste para a Chave

Para o acionamento das chaves comutadoras, S_{mais} e S_{menos} , o pulso vindo do circuito de isolamento galvânico deve ser invertido, para recuperar-se a largura de pulso positiva como a saída da base de tempo e ajustado para as tensões e acionamento da chave específica do circuito. Este circuito é mostrado na Figura 5.23.

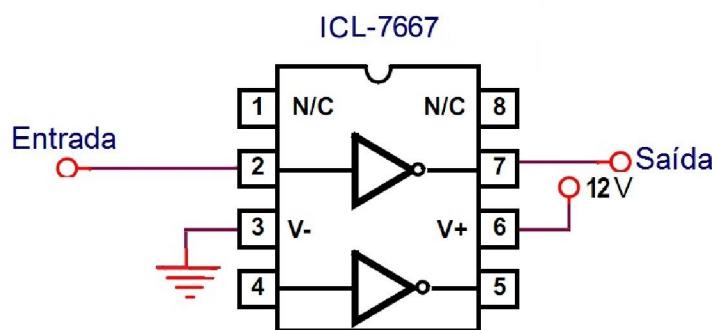


Figura 5.23 – Circuito de Ajuste para a Chave.

O circuito integrado ICL7667 é um *driver* duplo específico para MOSFET, ou seja, um circuito projetado para converter sinais em nível TTL, como o provindo da saída do

isolamento galvânico em sinais de alta corrente e voltagens até 15 V (INTERSIL CORPORATION, 2010). Sendo assim, apenas a alimentação é necessária para que o sinal proveniente do circuito galvânico seja compatível com as chaves. A forma de onda é, também invertida, como pode ser observado na Figura 5.24.

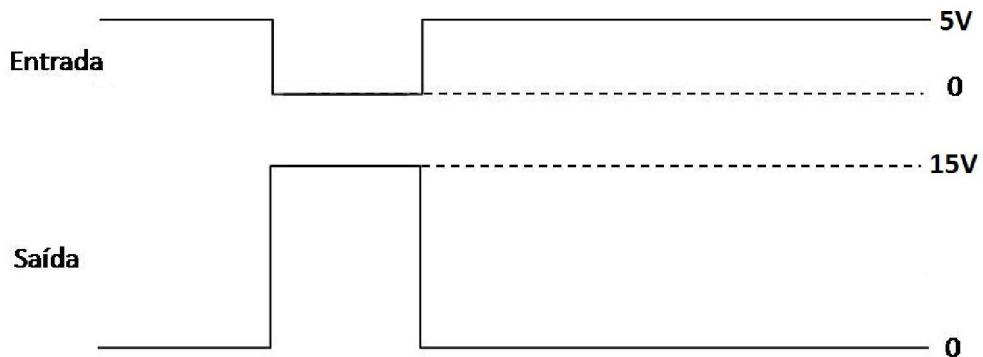


Figura 5.24 – Esquema de pulsos do circuito de ajuste para a chave.

5.5. Roteiro de Projeto da Topologia Ressonante

Nos itens anteriores, foram apresentadas as análises de funcionamento e equacionamento matemático da topologia ressonante de acionamento dos diodos laser. As partir das equações obtidas no item 5.3 e das definições de funcionamento do circuito ressonante, são dimensionados os elementos ressonantes e os semicondutores utilizados nesta topologia de acionamento.

Este item elabora um roteiro simplificado, apresentando os passos necessários para o projeto da topologia ressonante e, de acordo com os requisitos de projeto deste trabalho, é apresentado um exemplo numérico para a implementação de um protótipo.

5.5.1. Requisitos de sistema

Inicialmente devem-se especificar os parâmetros de funcionamento da topologia de acionamento dos diodos laser. A Tabela 5.5 enumera os parâmetros necessários, assim como os valores numéricos empregados neste trabalho.

Para a obtenção da tensão de entrada DC, escolheu-se o valor de 311 V tenso em vista a tensão da rede de 220 Vac retificada (onda completa), facilitando a construção do protótipo. Sabendo que o tempo de abertura mínimo da câmera é muito alto em relação ao tempo de acionamento ideal do diodo laser (100 ns), optou-se pelo aumento do tempo de duração do pulso ressonante. Mesmo com o uso de 800 ns de duração do pulso ressonante,

mantém-se os valores médio e eficaz de trabalho abaixo do recomendado pelo fabricante, como pode ser visto a seguir.

Tabela 5.5 – Requisitos do sistema e seus valores numéricos.

Parâmetro	Símbolo	Valor Numérico
Tensão de entrada DC	V_{DC}	311 V
Duração do pulso ressonante (semi-ciclo)	dt	800 ns
Corrente máxima em cada diodo laser	I_{pico}	30 A
Faixa de frequências de disparo	Freq	25 – 1000 Hz

Consideram-se duas formas de onda, seguindo o comportamento esquemático ilustrado anteriormente na Figura 5.8, sendo que a primeira delas mantém as características recomendadas pelo fabricante (do diodo laser) e, a segunda tem como características os requisitos deste projeto.

Pela recomendação do fabricante e utilizando o ciclo de trabalho recomendado de 0,1% ($I_{pico} = 40 \text{ A}$, $T_1 = 100 \text{ ns}$ e $T_2 = 100 \mu\text{s}$), tem-se que a corrente eficaz no diodo laser, dada pela Eq. (5.50), pode ser expandida para:

$$I_{er(fabricante)} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_0} \cdot \left[\left(\int_{T_0=0}^{T_1=100\text{ns}} [40 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)]^2 \cdot dt \right) + \left(\int_{T_1=100\text{ns}}^{T_2=100\mu\text{s}} [0]^2 \cdot dt \right) \right]} \quad (5.61)$$

Resolvendo a integração na Eq. (5.61), tem-se que:

$$I_{er(fabricante)} \approx 0,89 \text{ A} \quad (5.62)$$

Pelos requisitos deste projeto, para a condição extrema de maior frequência ($I_{pico} = 30 \text{ A}$, $T_1 = 800 \text{ ns}$ e $T_2 = 1 \text{ ms}$), tem-se que a corrente eficaz no diodo laser, dada pela Eq. (5.50), pode ser expandida para:

$$I_{er(requisitos)} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_0} \cdot \left[\left(\int_{T_0=0}^{T_1=800\text{ns}} [30 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)]^2 \cdot dt \right) + \left(\int_{T_1=800\text{ns}}^{T_2=1\text{ms}} [0]^2 \cdot dt \right) \right]} \quad (5.63)$$

Resolvendo a integração na Eq. (5.63), tem-se que:

$$I_{er(requisitos)} = 0,6 \text{ A} \quad (5.64)$$

Da mesma forma, podem-se calcular os valores médios, substituindo as características das formas de onda na Eq. (5.54). Resolvendo as integrações tem-se o valor médio recomendado pelo fabricante na Eq. (5.65) e os requisitos do sistema, para a frequência de 1 kHz, na Eq. (5.66).

$$I_{\text{méd(fabricante)}} = 0,026 \text{ A} \quad (5.65)$$

$$I_{\text{méd(requisitos)}} = 0,019 \text{ A} \quad (5.66)$$

5.5.2. Cálculo dos Elementos Ressonante C_r e L_r

Após a determinação dos requisitos do sistema, devem-se efetuar os cálculos dos elementos ressonantes, C_r e L_r .

Sabe-se, pela análise quantitativa apresentada no item 5.3, a relação entre as correntes de pico nos três estágios de funcionamento e os elementos ressonantes. De acordo com a análise qualitativa apresentada no item 5.2, a tensão inicial do capacitor ressonante no início do segundo estágio supera o valor da tensão de entrada V_{DC} e, portanto, a corrente de pico que circula neste estágio de funcionamento é maior:

$$I_{\text{pico(2)}} > I_{\text{pico(1)}} \quad (5.67)$$

Portanto, substituindo o valor da corrente máxima requisitada na Eq. (5.35), tem-se que:

$$-30 = \frac{V_{LED} + V_{C_0} - 2 \cdot V_{DC}}{Z_0} \quad (5.68)$$

Substituindo-se o valor inicial do capacitor ressonante, Eq. (5.45), na Eq. (5.68), tem-se:

$$-30 = \frac{V_{LED} + (V_{DC} - V_{LED}) - 2 \cdot V_{DC}}{Z_0} \quad (5.69)$$

Portanto, sabe-se que a impedância do circuito ressonante depende apenas do valor da tensão de entrada e da corrente de pico no segundo estágio de funcionamento. Substituindo a definição da impedância, Eq. (5.3), e a tensão de entrada requisitada pelo projeto na Eq. (5.69):

$$10,37 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (5.70)$$

Sendo, assim, tem-se a relação entre os valores da capacitância e indutância ressonante:

$$L_r = 10,37^2 \cdot C_r \quad (5.71)$$

Sabe-se que a duração de um pulso ressonante é apenas metade do período completo da ressonância, ou seja:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \quad (5.72)$$

Substituindo a Eq. (5.1) e a definição da Eq. (5.72) na Eq. (5.2) e simplificando, tem-se que:

$$\frac{\pi}{\Delta t} = \frac{1}{\sqrt{C_r \cdot L_r}} \quad (5.73)$$

Substituindo a relação expressa pela Eq. (5.71) e a duração do pulso Δt requisitado pelo sistema, tem-se:

$$\sqrt{C_r^2 \cdot 10,37^2} = \frac{800 \times 10^{-9}}{\pi} \quad (5.74)$$

Portanto, a capacitância ressonante é:

$$C_r \approx 24 \text{nF} \quad (5.75)$$

Substituindo a Eq.(5.75) na Eq. (5.71), tem-se o valor para a indutância ressonante:

$$L_r \approx 2,6 \mu H \quad (5.76)$$

5.5.3. Dimensionamento dos Semicondutores

O próximo passo deste roteiro é a determinação dos semicondutores presentes na topologia ressonante, de acordo com as tensões e correntes de pico sobre eles, calculadas durante a análise quantitativa, item 5.3.

5.5.3.1. Chaves Smais e Smenos

A corrente de pico que passa pela chave Smais é dada pela Eq. (5.57) e a corrente de pico sobre a chave Smenos é dada pela Eq.(5.58). A corrente máxima, portanto, sobre as chaves Smais e Smenos, pelos requisitos do projeto é:

$$I_{\text{pico(Smais)}} = I_{\text{pico(Smenos)}} = 30 \text{ A} \quad (5.77)$$

A tensão máxima sobre as duas chaves é V_{DC} e, utilizando-se de um fator de segurança de 20 a 50%:

$$V_{\text{Smais}} = V_{\text{Smenos}} > 376 \text{ V} \quad (5.78)$$

Analizando-se as equações (5.77) e (5.78) e comparando-se com os dados de catálogos, tem-se o **MOSFET IRF740**, que aceita picos de corrente de até 40 A e tensão dreno-source de 400 V (ST MICROELECTRONICS, 1998), como modelo escolhido para as chaves comutadoras Smais e Smenos.

5.5.3.2. Diodos D1, D2, D4 e D6

Os diodos de proteção em antiparalelo dos diodos laser a da chave Smais agem apenas como diodos de proteção, impedindo retorno de corrente negativa sobre os semicondutores que protegem.

Sendo assim, seus requisitos de corrente de pico não são significantes para o projeto, porém estes semicondutores devem ser de resposta rápida (diodos ultrarrápidos) e a tensão reversa máxima suportada é a tensão provinda da fonte, V_{DC} , com fator de segurança:

$$V_{D1,D2,D4,D6} > 376 \text{ V} \quad (5.79)$$

Analizando os requisitos descritos acima e na Eq. (5.79), tem-se o diodo avalanche de recuperação rápida **BYV26C**, com tensão contínua reversa de até 600 V e picos não repetitivos de corrente de até 30 A e 30 ns de tempo de recuperação reversa (PHILIPS SEMICONDUCTORS, 1994).

5.5.3.3. Diodos D3 e D5

Os diodos de proteção em série dos diodos laser, D3 e D5,

A corrente de pico que circula pelos diodos de proteção em série é dada pela Eq.(5.58) e, pelos requisitos deste projeto:

$$I_{peak(D3,D5)} = 30A \quad (5.80)$$

Assim como os diodos de proteção em antiparalelo, estes semicondutores devem ser de resposta rápida, de acordo com a frequência ressonante. A tensão máxima suportada é a tensão provinda da fonte, V_{DC} , com fator de segurança:

$$V_{D3,D5} > 376V \quad (5.81)$$

Analizando os requisitos acima, das equações (5.80) e (5.81), e comparando-se com dados de catálogos, têm-se o diodo ultrarrápido, de recuperação suave HFA15TB60, com tensão contínua de até 600 V, corrente contínua de até 15 A, picos não repetitivos de corrente de até 150 A e 19 ns de tempo de recuperação reversa (INTERNATIONAL RECTIFIER, 2003).

5.5.4. Construção do Indutor L_r

O quarto passo é o dimensionamento do indutor ressonante L_r . A corrente de pico que circula pelo indutor nos três estágios de funcionamento é apresentada nas equações (5.20), (5.35) e (5.47), porém a escolha do diâmetro do fio para a construção do indutor é obtido através da tabela de bitolas de fios e da corrente eficaz que passa por ele.

Pela corrente eficaz dos requisitos deste sistema, dada pela Eq. (5.64), o fio escolhido seria o 13 AWG, porém utilizou-se o 21 AWG, superdimensionado, já disponível para a construção, onde o diâmetro do fio é:

$$\phi = 0,0724\text{ cm} \quad (5.82)$$

Como o valor da indutância, Eq. (5.76), é pequeno, será utilizado núcleo de ar para construí-lo. A expressão que define o número de espiras é (FINZI NETO, 1999):

$$L_r[\mu H] = \frac{0,0788 \cdot d_i^2 \cdot n^2}{(3 \cdot d_i) + (9 \cdot l_r) + (10 \cdot 2 \cdot nC \cdot \phi)} \quad (5.83)$$

Onde:

- d_i Diâmetro total do indutor [cm].
- n Número de espiras.

- l_f Comprimento do núcleo [cm].
- nC Número de camadas.

E:

$$l_f = \varphi \cdot n \quad (5.84)$$

$$d_i = d_n + 2 \cdot \varphi \quad (5.85)$$

- d_n Diâmetro do núcleo do indutor.
- φ Diâmetro do fio.

Substituindo a Eq. (5.82) na Eq. (5.85) e supondo um diâmetro do núcleo do indutor $d_n = 1\text{cm}$, tem-se:

$$d_i = 1 + 2 \cdot 0,0724 = 1,1448\text{ cm} \quad (5.86)$$

Aplicando-se as equações (5.76), (5.82), (5.84) e (5.86) na Eq. (5.83) é possível obter o número de espiras do indutor L_r .

$$2,6 = \frac{0,0788 \cdot 1,1448^2 \cdot l_f^2}{(3 \cdot 1,1448) + (9 \cdot 0,0724 \cdot n) + (10 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,0724)} \quad (5.87)$$

Portanto:

$$n \approx 22 \text{ espiras} \quad (5.88)$$

Para a construção real do indutor ressonante, utilizou-se de um núcleo de Technyl® para manter-se a forma cilíndrica e com diâmetro fixo em 10 mm e, após o enrolamento do fio com o número estimado de espiras, colou-se o enrolamento ao núcleo, como mostra a Figura 5.25.



Figura 5.25 – Indutor ressonante real (como escalar adotar diâmetro do núcleo de 10mm).

5.5.5. Escolha do Número de Diodos Laser

Como último passo do roteiro de projeto da topologia ressonante de acionamento dos diodos laser, tem-se a escolha do número de diodos laser. Nesta etapa do projeto deve-se levar em consideração fatores como a área que se deseja iluminar, a energia luminosa exigida e a corrente de pico sobre os diodos laser.

A topologia ilustrada na Figura 5.1 mostra apenas um diodo laser sendo acionado em cada uma das três etapas de funcionamento. Entretanto, é possível o acionamento de um conjunto de diodos laser sem que haja modificações em toda a análise topológica. No uso de diodos laser em paralelo, a queda de tensão sobre eles, V_{LED} , equivale apenas à tensão de condução de um dos diodos laser, aumentando a corrente de pico que passa pelo conjunto, porém essa corrente é dividida, igualmente em uma situação ideal, entre o número de diodos laser presentes. No caso da configuração em série, a queda de tensão é equivalente ao produto do número de diodos laser pela tensão de condução de um deles, mas a corrente que circula entre eles é a mesma que a do uso de um diodo laser só, como resume a Figura 5.26.

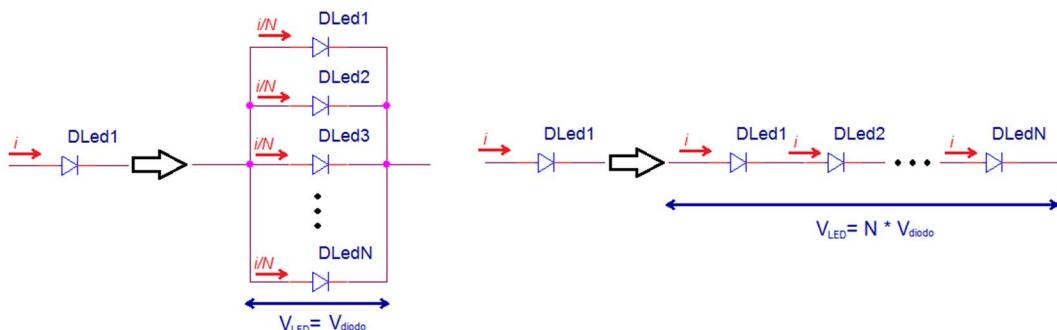


Figura 5.26 – Configuração dos diodos laser em: paralelo (esquerda) e série (direita).

Como a energia luminosa é o que realmente interessa para o propósito deste trabalho, e esta é proporcional à corrente neste semicondutor (OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS, 2006), a configuração em série dos diodos laser é a mais adequada para a topologia ressonante. O objetivo principal em se usar os diodos laser em série é o de garantir que a corrente seja a mesma em todos eles. A associação em paralelo, fora da análise ideal, tem corrente diferentes em cada diodo podendo, em situações limite, ter diodos sem condução e outros a assumindo quase completamente. A associação série irá reduzir a corrente resultante, devido às quedas de tensão, mas mantém a razão unitária entre as correntes em cada diodo laser.

Neste trabalho, porém, não houve um estudo específico de otimização para a determinação da energia luminosa ótima em função do número de diodos laser em cada

semiciclo de trabalho, levando-se em consideração todos os fatores intrínsecos a esta topologia. Este estudo de otimização, portanto, já fica como uma sugestão para trabalhos futuros.

A análise quantitativa, apresentada anteriormente, considera um circuito ressonante ideal para todo o equacionamento, ignorando influências como o do circuito *snubber* e o comportamento real dos semicondutores. Sendo assim, as equações determinadas são aproximações do comportamento real e a influência da queda de tensão dos diodos laser sobre a corrente que passa por eles, neste ponto, não pode ser ignorada.

Portanto, a escolha do número de diodos laser em cada semiciclo da topologia ressonante é determinada pela corrente em circulação (que é em função, por sua vez, da queda de tensão resultante do número de diodos laser), pela área de iluminação desejada, pelo tamanho comercial dos componentes ópticos e, por fim, pelo orçamento disponível para a compra dos diodos laser.

Neste trabalho, especificamente, determinou-se o uso de oito diodos laser em série para a primeira etapa (LedMais) e onze diodos laser em série para a segunda etapa (LedMenos). Como o pico de corrente é maior sobre o segundo conjunto de diodos laser, optou-se por um maior número de diodos e, portanto, uma maior energia luminosa neste intervalo de tempo. O conjunto de dezenove diodos laser preenche uma área circular de cerca de 50 mm de diâmetro, ideal para os componentes ópticos comercialmente disponíveis e área suficiente para a iluminação da zona ativa do arco incluindo a poça de fusão.

O esquema da distribuição dos diodos laser, na área desejada, escolhido para este trabalho é mostrado na Figura 5.27. A distribuição homogênea e simétrica garante uma relação aproximadamente constante de energia luminosa por área iluminada, e sua forma circular sofre menores distorções que a maioria das formas geométricas quando projetada angularmente em uma superfície plana.

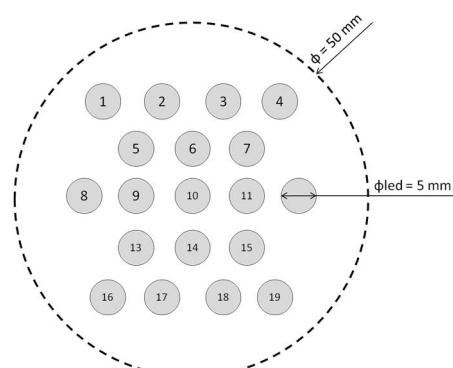


Figura 5.27 – Esquema de distribuição dos diodos laser.

Não há presença de diodos laser na terceira etapa (LedZero), pois este é o estágio com menor energia luminosa. Ao início do terceiro estágio, o circuito *snubber* presente atrasa o início da passagem de corrente pelo conjunto de diodos laser (este deve se descarregar antes que a corrente faça a trajetória final), diminuindo o tempo ativo de luz e a corrente eficaz dentro do período de ressonância, quando comparado aos dois estágios anteriores.

5.5.6. Determinação do circuito snubber

Na construção da topologia ressonante, determinou-se previamente a utilização de um circuito *snubber* não polarizado, já apresentado em conjunto com a chave Smenos (Figura 5.1). Deve-se, portanto, apenas dimensionar os valores do resistor R_{sn} e do capacitor C_{sn} .

Com base em um trabalho já publicado (FINZI NETO, 2003), com características similares de utilização das chaves de comutação escolhidas, escolheu-se os valores para os componentes do circuito *snubber*:

$$R_{sn} = 47\Omega \quad e \quad C_{sn} = 22\text{nF} \quad (5.89)$$

5.6. Simulação da Topologia Ressonante

A simulação do modelo digital da Topologia Ressonante de acionamentos dos diodos laser de alta potência foi feita utilizando-se dos simuladores OrCAD Capture® e PSpice A/D®. Os parâmetros de simulação e projeto utilizados nos experimentos são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Parâmetros utilizados na simulação da topologia ressonante.

Parâmetro	Valor	Unidade
V_{DC}	311	V
C_r	20	nF
L_r	2,2	μH
C_{sn}	1	nF
R_{sn}	47	
dt	840	ns
Freq	125	kHz

A topologia ressonante de acionamento dos diodos laser, em modelo digital para a simulação, é mostrada na Figura 5.28.

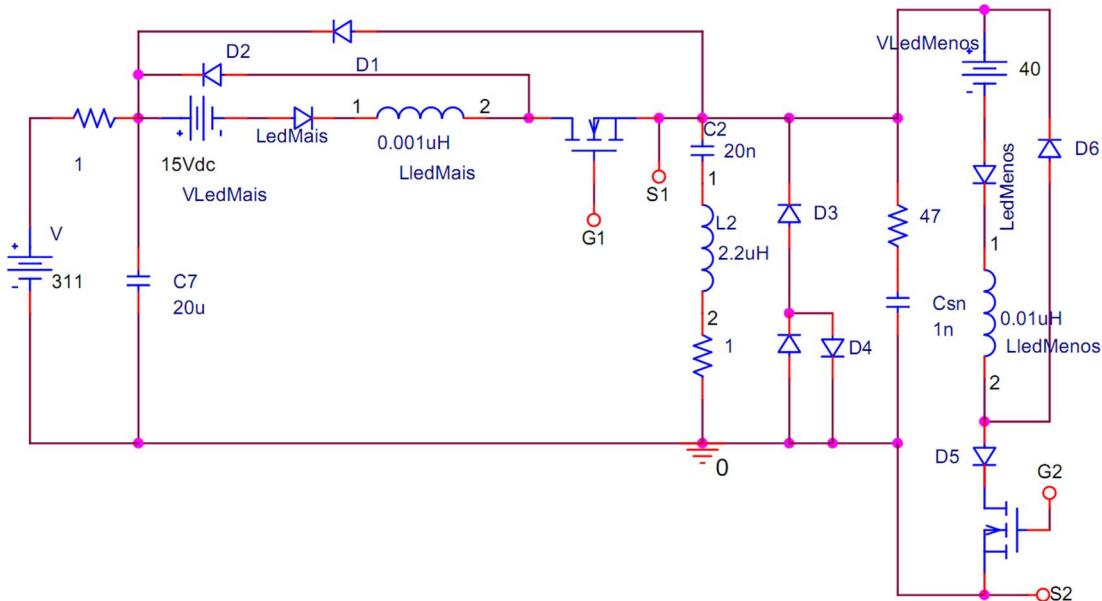


Figura 5.28 – Modelo digital da Topologia Ressonante para simulação.

Observa-se que, no modelo digital, as sequências de diodos laser LedMais e LedMenos são representadas por um conjunto de fonte de tensão DC, um diodo de potência e um indutor. O simulador utilizado neste trabalho não possui em suas bibliotecas o modelo correto do diodo laser de alta potência utilizado, portanto, para uma simulação com maior grau de realidade, substituiu-se cada sequência de diodos laser por um diodo de alta potência em conjunto com a fonte de tensão DC, para representar sua queda de tensão, e um indutor, representando as indutâncias presentes.

O capacitor C7, também presente no projeto para o circuito, é chamado de capacitor de desacoplamento e sua principal função, neste projeto, é armazenar o retorno da energia ressonante. Ou seja, o capacitor age como um reservatório da energia que não foi dissipada durante os três estágios de funcionamento da topologia de acionamento (energia oscilante), provendo, portanto, a corrente de forma rápida para os picos presentes nos diodos laser, tirando essa responsabilidade da rede elétrica (MOHAN *et al.*, 2002).

O modelo digital do circuito de controle, ainda baseado no circuito de base de tempo com o 74LS123, é mostrado na Figura 5.29.

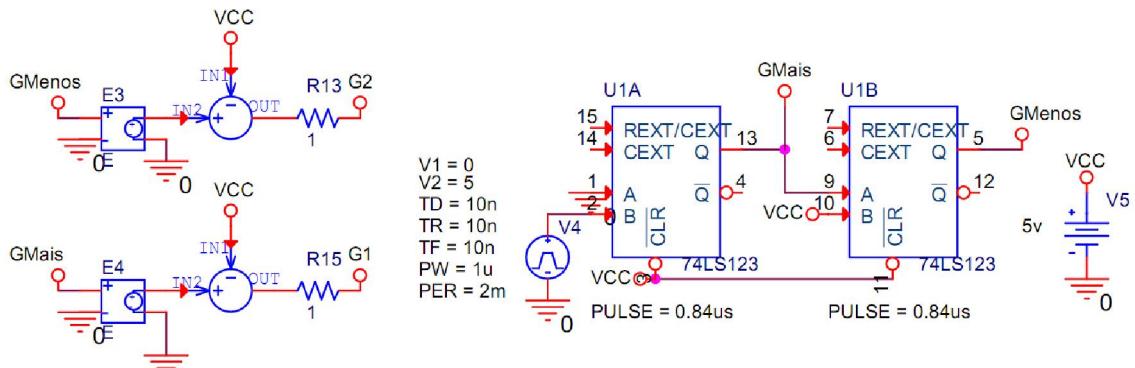


Figura 5.29 – Modelo digital do circuito de controle para simulação.

Na entrada do circuito 74LS123 (U1A e U1B) tem-se uma forma de onda trapezoidal com tempos de subida e descida de 10 ns, duração de 1 μ s e período de 8 μ s, e a duração do pulso de saída configurado em 840 ns. O isolamento é simulado por E3 e E4.

Considera-se importante para a análise deste circuito as seguintes formas de onda: tensão entre os terminais *dreno-source* e *gate-source* das chaves comutadoras Smais e Smenos, tensão e corrente sobre os conjuntos de diodos laser LedMais e LedMenos, tensão sobre o capacitor ressonante e corrente sobre o indutor ressonante.

As tensões de acionamento das chaves Smais e Smenos, tensão entre os pinos *gate* e *source*, através da simulação é ilustrada na Figura 5.30.

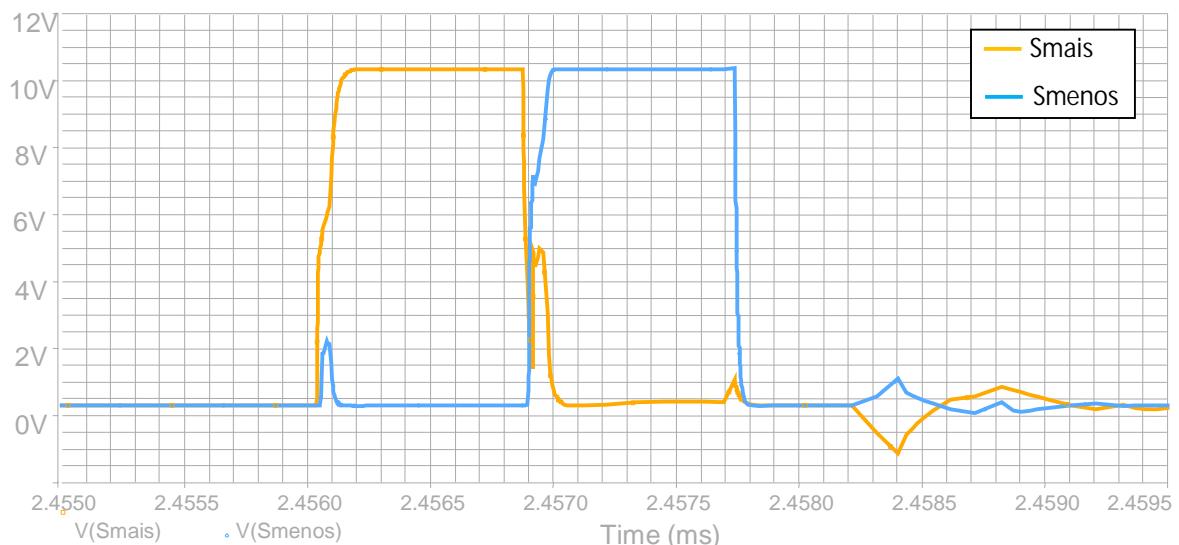


Figura 5.30 – Simulação de tensão Gate-Source: Smais (laranja) e Smenos (azul).

Ao início do primeiro estágio de funcionamento ($t \approx 2,4561\text{ms}$), quando a chave Smais é ligada, observa-se um pico de tensão sobre a chave Smenos e, durante o segundo

estágio de funcionamento ($t \approx 2,4569\text{ ms}$), observa-se um pico de chaveamento sobre a chave Smais. Sabe-se que as chaves de potência possuem capacitâncias entre seus três terminais (*gate-source*, *dreno-source*, e *dreno-gate*) e essas capacitâncias são, de certa forma, interligadas e sofrem cargas e descargas ao longo do funcionamento da topologia. Neste caso, quando uma das chaves é acionada, o circuito de acionamento drena corrente da capacitância *gate-source* do outro MOSFET, gerando picos fora do chaveamento. Este pico, entretanto, é de baixa tensão e não é capaz de superar a tensão limite de acionamento dessas chaves.

Ao final do terceiro estágio de funcionamento, quando as duas chaves comutadoras estão abertas, ainda há energia armazenada no capacitor ressonante e no circuito *snubber*. Quando essa energia tenta retornar aos diodos laser, as chaves comutadoras abertas impedem a passagem de corrente e suas capacitâncias são carregadas, apresentados pequenos picos, que não são capazes de superar a tensão limite de acionamento das chaves.

As formas de onda de tensão e corrente sobre o primeiro conjunto de diodos laser, LedMais, é mostrada na Figura 5.31.

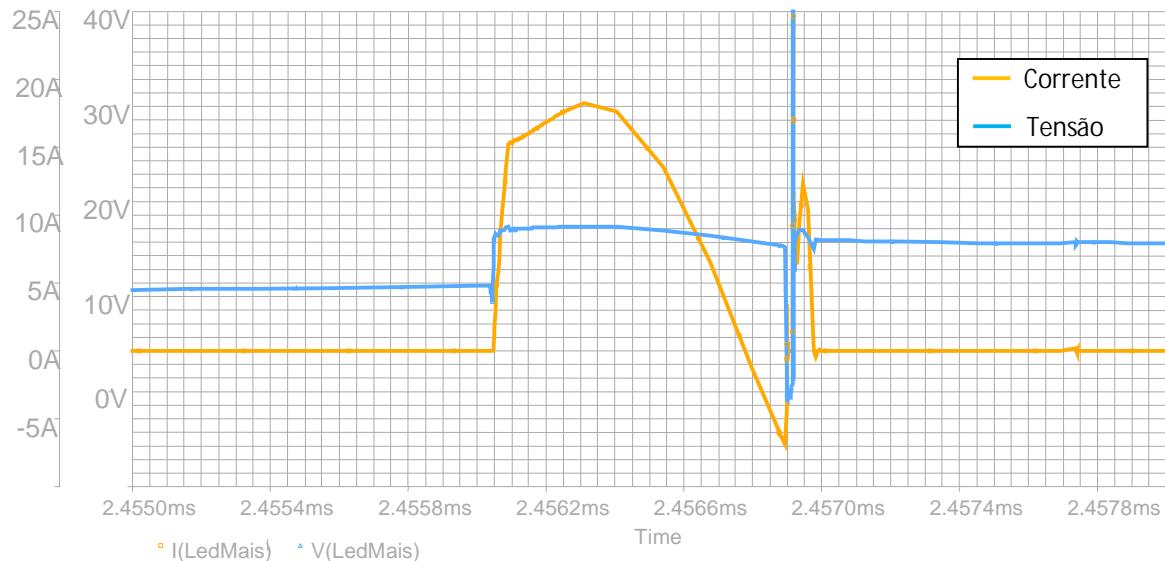


Figura 5.31 – Simulação diodos laser LedMais: corrente (laranja) e tensão (azul).

A corrente de pico sobre os diodos laser é de aproximadamente 18 A e a queda de tensão próxima a 20 V durante o acionamento da primeira chave. Observa-se, através desta simulação, uma saída de comutação suave, pois não há cruzamento entre a saída da chave (refletida na tensão sobre os diodos laser) com a corrente circulante. A capacitância

presente na junção PN do modelo de diodo de potência utilizado na simulação gera uma corrente negativa ao final do primeiro estágio de funcionamento ($t \approx 2,4568\text{ms}$).

Quando a segunda chave é acionada ($t \approx 2,4569\text{ms}$), sua capacitância *dreno-source*, em condições transitórias, é carregada causando um fluxo de corrente (RASHID, 1999) pelo primeiro conjunto de diodos laser, em série com a chave Smenos, por um pequeno intervalo de tempo, mesmo que não ocorra o acionamento da chave Smais.

As formas de onda de tensão e corrente sobre o segundo conjunto de diodos laser, LedMenos, são mostradas na Figura 5.32.

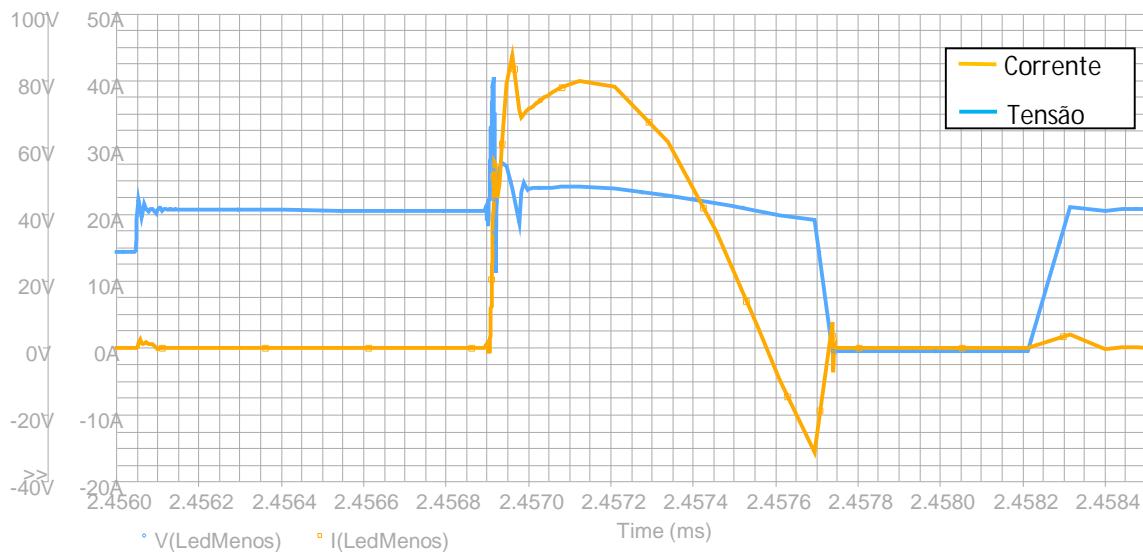


Figura 5.32 – Simulação diodos laser LedMenos: corrente (laranja) e tensão (azul).

A corrente de pico sobre os diodos laser é de aproximadamente 40 A e a queda de tensão próxima à 50 V durante o acionamento da segunda chave. No início do segundo estágio de funcionamento, a capacitância da junção PN do diodo de proteção em série com o conjunto dos diodos laser (D5) é carregada, gerando um fluxo elevado de corrente sobre os diodos laser observado ao início da condução ($t \approx 2,4569\text{ms}$). Observa-se, também, uma saída de comutação suave e uma corrente negativa ao final deste estágio ($t \approx 2,4576\text{ms}$) pela presença da capacitância da junção PN do diodo de potência utilizado na simulação.

A tensão entre os pinos de dreno e source das duas chaves comutadoras são ilustradas na Figura 5.33.

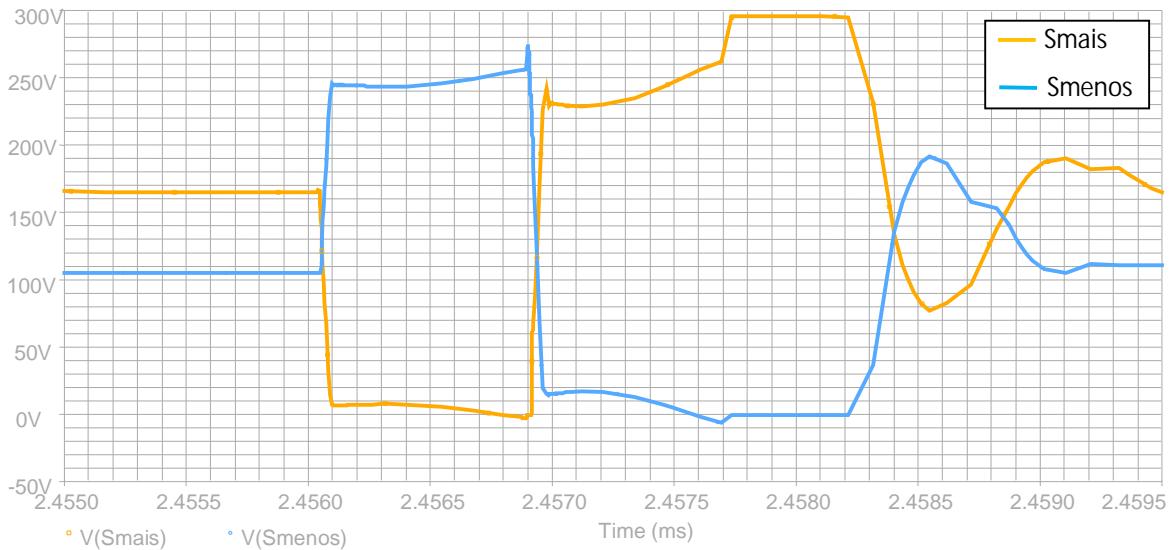


Figura 5.33 – Simulação de tensão Dreno-Source: Smais (laranja) e Smenos (azul).

Inicialmente as duas chaves comutadoras estão carregadas com a divisão da tensão provinda da fonte, considerando algumas perdas do circuito. Quando o primeiro estágio de funcionamento ($t \approx 2,4561\text{ms}$), a tensão sobre a chave Smais, em condução, é levada praticamente à zero e a chave Smenos é subtida à toda tensão sobre seus terminais dreno e *source*. No início do segundo estágio ($t \approx 2,4569\text{ms}$), a chave Smenos entra em condução e sua tensão é levada à zero enquanto a chave Smais sofre a maior carga entre seus terminais.

Ao final de segundo estágio e início do terceiro ($t \approx 2,4577\text{ms}$), a corrente circula no sentido de condução de LedZero e apenas a chave Smais recebe a tensão sobre seus terminais e, após o término deste estágio ($t \approx 2,4584\text{ms}$), as tensões sobre as duas chaves se comportam de acordo com o circuito ressonante, sendo rapidamente eliminadas pelo circuito *snubber* pelo capacitor de desacoplamento, e retornando ao valor inicial de carga para o início do próximo acionamento.

A tensão simulada sobre o capacitor ressonante é mostrada na Figura 5.34 e a corrente simulada que passa pelo indutor ressonante é mostrada na Figura 5.35.

A corrente que circula pelo indutor ressonante reflete, com boa aproximação, as correntes que passam pelos conjuntos de diodos laser durante todo o funcionamento da topologia. Durante o primeiro estágio ($t \approx 2,4561$ a $2,4569\text{ms}$), o pico de corrente sobre o indutor é de aproximadamente 15 A e, no segundo estágio ($t \approx 2,4569$ a $2,4576\text{ms}$), observa-se um pico de mais de 30 A. Quando as duas chaves são abertas a corrente ainda

oscila pelo indutor ressonante e é gradualmente dissipada pelo circuito *snubber* e redirecionada para o capacitor de acoplamento.

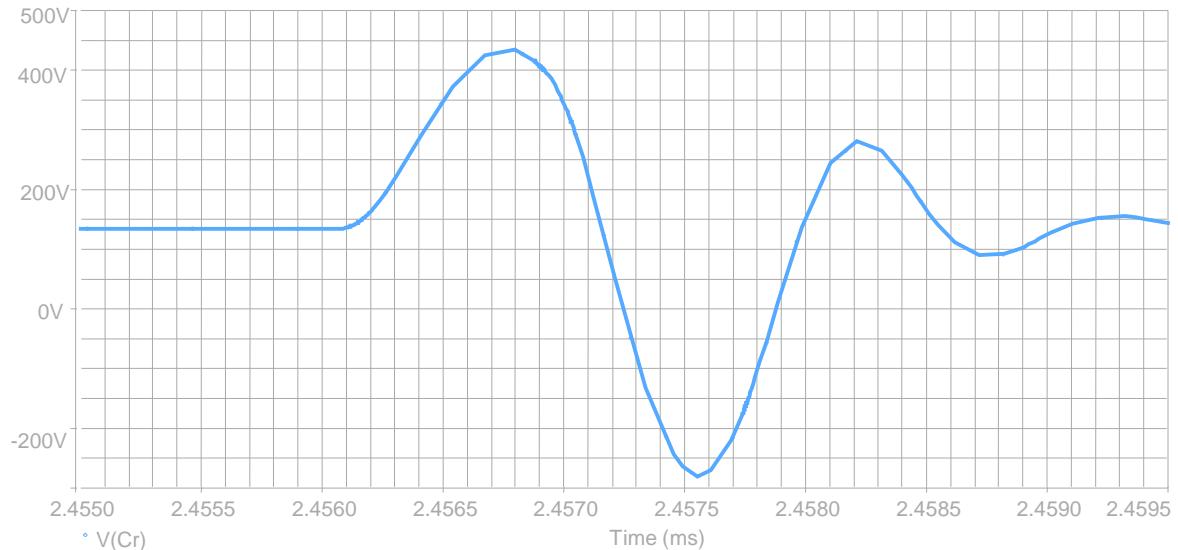


Figura 5.34 – Simulação de tensão sobre o capacitor ressonante V_{cr} .

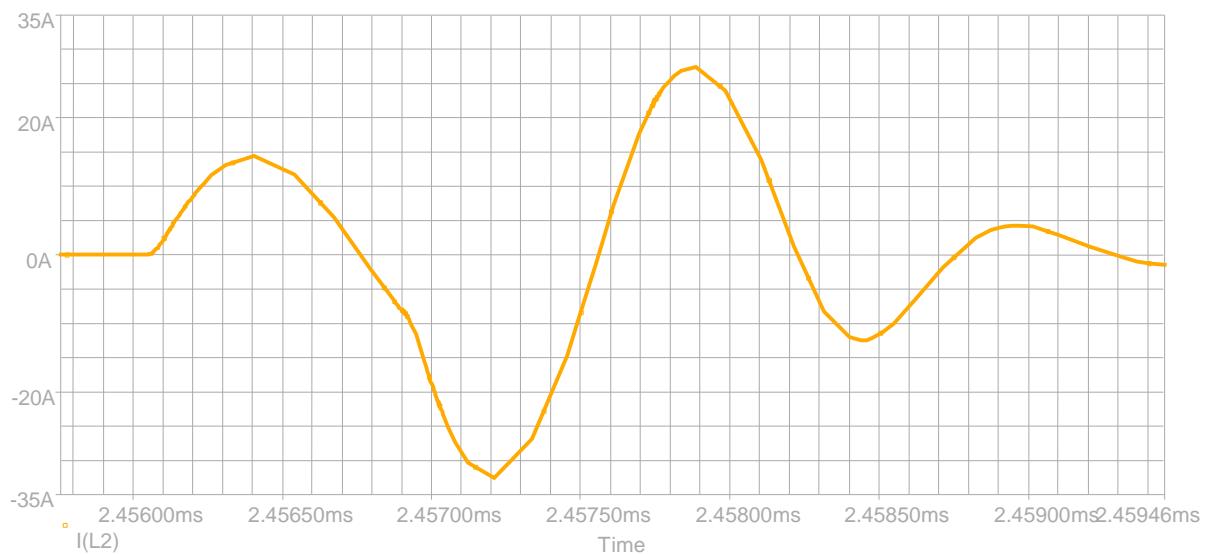


Figura 5.35 – Simulação da corrente sobre o indutor ressonante I_{Lr} .

Através das formas de onda mostradas neste item, pode-se concluir que a topologia ressonante comporta-se como o esperado pelas análises qualitativa e quantitativa, adequando-se perfeitamente para os requisitos necessários de projeto e para o acionamento do modelo de diodo laser de alta potência escolhido.

5.7. Projeto do Sistema Óptico

Com uma técnica de acionamento dos diodos laser para a iluminação bem definida e estabelecida é muito importante, por fim, definir a forma com que a energia luminosa obtida pelo sistema será projetada na área de interesse de iluminação (zona ativa do arco incluindo a poça de fusão), para que esta energia seja aproveitada sem a existência de grandes perdas.

Inicialmente, determinou-se que o sistema de visão deve estar afastado da região iluminada por, no mínimo, 250 mm. Essa distância permite a segurança do equipamento contra, por exemplo, respingos durante o processo de soldagem ou o aquecimento pela proximidade da região do arco.

Em um primeiro momento, supõe-se a inexistência de um sistema óptico para projeção da iluminação dos diodos laser. Utilizando-se da distância de segurança estabelecida, e sabendo que o ângulo total de divergência do feixe de luz é de 11° (Tabela 3.1), a projeção esquemática das áreas de iluminação do conjunto de dezenove diodos laser é ilustrada na Figura 5.36, abaixo.

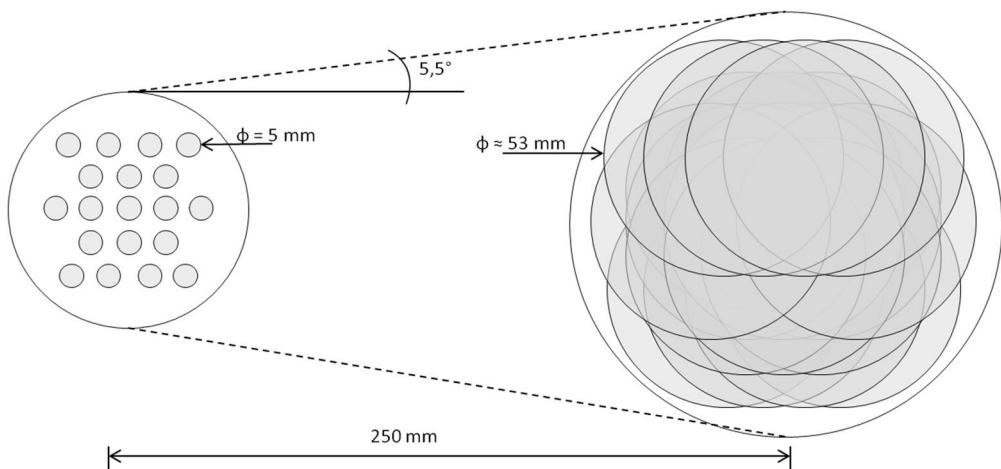


Figura 5.36 – Esquema de projeção da área de iluminação dos diodos laser sem uso de sistema óptico.

A projeção do feixe de luz infravermelha de cada diodo laser em um plano paralelo situado a 250 mm do plano de emissão tem um aumento em seu diâmetro superior a 10 vezes o diâmetro do encapsulamento do semicondutor. Considerando-se a densidade luminosa como sendo a razão da energia luminosa pela área projetada, têm-se uma queda aproximada de 100 vezes desta para a emitida pelos diodos laser. A sobreposição das áreas projetadas faz com que a densidade luminosa seja completamente disforme ao longo

de toda a área iluminada, desigualdades que podem prejudicar no processo de obtenção das imagens com boa qualidade.

Portanto, tendo em vista um melhor aproveitamento da energia luminosa emitida pelos diodos laser sobre e, ainda, com o objetivo de uniformizar a distribuição da densidade luminosa na área de interesse, projetou-se um sistema óptico de projeção da luz no infravermelho próximo, como ilustra a Figura 5.37.

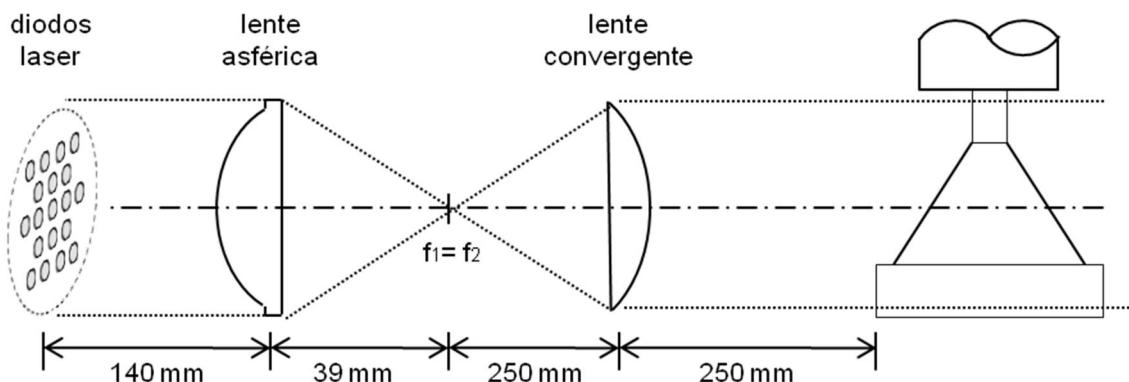


Figura 5.37 – Sistema óptico de projeção da luz emitida pelos diodos laser.

Os diodos laser são situados a uma distância de aproximadamente 140 mm de uma lente asférica (com distância focal de 39 mm) e, pelo ângulo pequeno de divergência, considera-se um feixe paralelo. A lente asférica é responsável por condensar e projetar a luz, homogeneizando a distribuição da densidade luminosa sobre o seu foco. A lente convergente (com distância focal de 250 mm) tem seu foco coincidente com o foco da lente asférica e, portanto, o feixe de luz é finalmente projetado de forma paralela para o plano de iluminação, situado a 250 mm do final do sistema óptico.

O protótipo foi construído em alumínio, diminuindo a perda de energia luminosa ao longo do sistema óptico pela reflexão da luz em suas paredes, como ilustra a Figura 5.38.

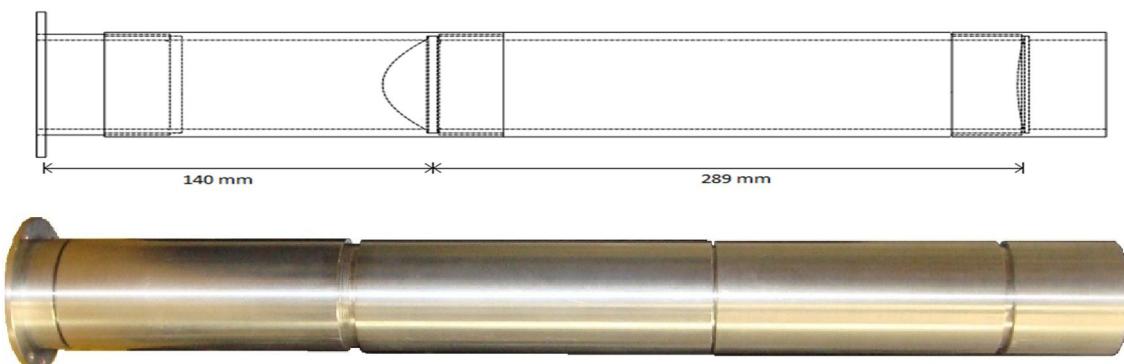


Figura 5.38 – Sistema óptico: projeto técnico (cima) e protótipo construído (baixo).

5.8. Retificação de Imagens Inclinadas

Finalizado o processo de projeto do sistema de visão para processos de soldagem, resta a criação de um algoritmo capaz de corrigir as distorções nas imagens provocadas pela inclinação da câmera em sincronia com o acionamento dos diodos laser. Este item, portanto, apresenta esquematicamente o algoritmo de retificação de imagens inclinadas e, por fim, valida seu funcionamento através de imagens distorcidas obtidas de um objeto padrão.

Para a validação do funcionamento do algoritmo, determinou-se um objeto padrão para a realização de medições: um círculo com diâmetro de 80 mm concêntrico a um retângulo de lados de 100 e 140 mm. Mediú-se, para comparação com os valores reais, os dois lados do retângulo e suas duas diagonais, além do diâmetro do círculo e as menores distâncias entre o círculo e ambos os lados do retângulo, como mostra a Figura 5.39.

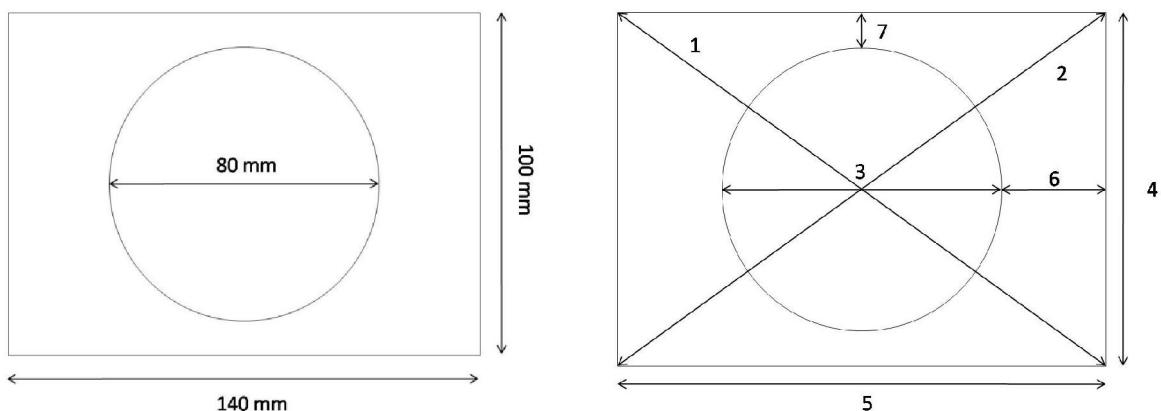


Figura 5.39 – Objeto padrão (esquerda) e medidas usadas (direita) para validação do algoritmo de retificação de imagens inclinadas.

O programa utiliza funções do Matlab® e, através da escolha dos quatro pontos de controle – os quatro vértices do retângulo – feita pelo usuário e do uso funções pré-existentes para transformações geométricas projetivas, é possível retificar uma imagem inclinada, eliminando suas distorções e possibilitando medições reais dos objetos presentes na imagem, como ilustra a Figura 5.40. O código do programa pode ser visto no ANEXO II.

Após a realização da transformação projetiva responsável pela retificação da imagem, o usuário é responsável pela escolha dos sete pares de pontos – através de cliques sobre a imagem retificada com o mouse – para o cálculo das distâncias projetadas e sua relação com o objeto real. Por fim, o algoritmo retorna uma tabela contendo os valores

reais das sete medidas definidas, os valores medidos pelo usuário sobre a imagem retificada e o erro relativo entre estas.

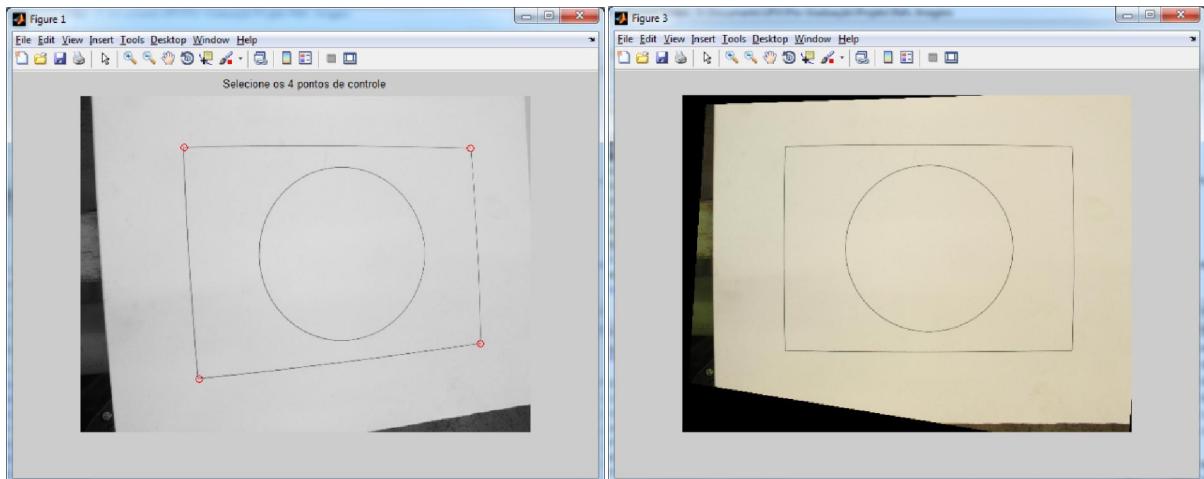


Figura 5.40 – Exemplo de aplicação do algoritmo de retificação: imagem inclinada com pontos de controle (esquerda) e imagem retificada (direita).

O fluxograma simplificado do algoritmo de retificação de imagens inclinadas é mostrado na Figura 5.41.

O objeto padrão foi impresso em uma folha branca do tipo A4 em uma impressora de boa qualidade e, com o auxílio de um tripé profissional para câmeras fotográficas com ajuste de inclinação para os três eixos, foi obtida uma sequência de imagens inclinadas, como resume a Tabela 5.7, a seguir.

Tabela 5.7 – Detalhamento de inclinação da câmera para obtenção das imagens utilizadas para validação do algoritmo de retificação.

Imagen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
(1)	0°	0°	30°	15°	45°	0°	0°	0°	0°	10°	30°
(1)	0°	0°	0°	0°	0°	15°	20°	0°	0°	15°	30°
(1)	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	15°	30°	10°	30°

⁽¹⁾ ângulos de rotação em relação aos três eixos definidos na Figura 2.18.

Deve-se ressaltar que as imagens foram retiradas com resolução de 3264x2448 pixels pela câmera Canon PowerShot® A630 configurada com as mesmas características. A Figura 5.40 ilustra passos do funcionamento do algoritmo criado, detalhando a escolha dos quatro pontos de controle e o resultado do processo de transformação geométrica projetiva.

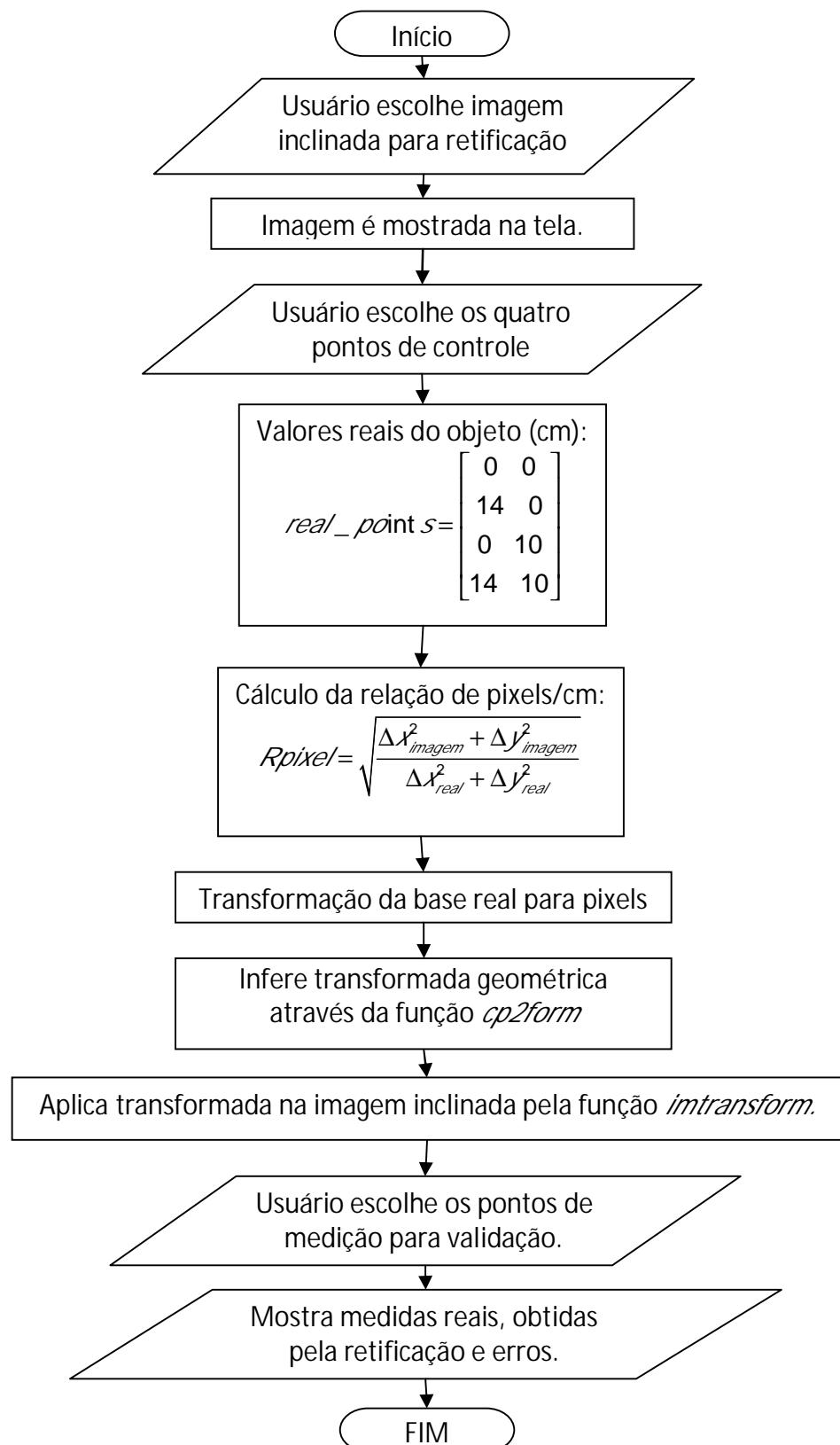


Figura 5.41 – Fluxograma do algoritmo de retificação de imagens inclinadas.

O algoritmo foi aplicado a cada uma das imagens inclinadas obtidas e, sobre cada retificação, foram realizadas as sete medições determinadas. Os erros relativos entre os valores medidos nas imagens retificadas e os valores reais são mostrados na Figura 5.42, abaixo.

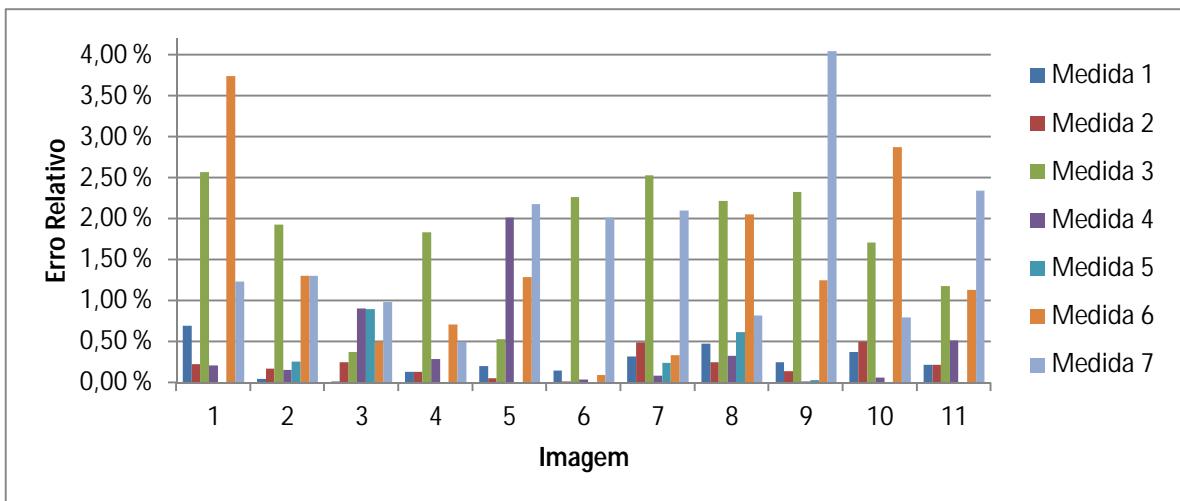


Figura 5.42 – Erros relativos entre valores reais e de imagens retificadas.

Observou-se que, de uma forma geral, o algoritmo apresentou bons resultados na retificação de imagens inclinadas, sem apresentar relação direta com o ângulo de inclinação, ou o eixo de rotação ou a sobreposição de inclinações em eixos distintos.

Os erros relativos das medidas determinadas mostraram-se satisfatórios, todos abaixo de 5%, sendo que boa parte está, ainda, abaixo de 0,5%. Os maiores erros ocorreram nas medidas do raio do círculo e na distância entre o círculo e os lados do retângulo (medidas 3, 6 e 7, respectivamente), podendo ilustrar o acúmulo de erro devido à dificuldade de escolha dos pontos para a medição apenas com ajuda visual. A escolha dos pontos de controle e pequenas distorções nas lentes da câmera podem, ainda, contribuir para o aumento do erro relativo resultante.

Portanto, o algoritmo de retificação de imagens inclinadas criado neste item é válido para sua aplicação em futuras filmagens dos processos de soldagem, sendo possível, através dele, retirar informações como largura de junta, DBCP, largura do cordão de forma, entre outras, de forma *off-line*, diretamente das imagens retificadas.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Validação da Topologia Ressonante

Após a realização do projeto da topologia ressonante, escolha de seus componentes principais e a obtenção do comportamento da tensão e da corrente sobre os diodos laser de alta potência através de simulação computacional, pode-se iniciar o processo de construção dos circuitos elétricos (controle e potência) em placas para testes.

Neste item, especificamente, serão detalhados os diversos testes realizados com o protótipo elétrico construído. Inicialmente, utilizando diodos LEDs de alto brilho na cor vermelha, passando pela obtenção das formas de onda de tensão e corrente nos principais componentes e comparando-os com os resultados da simulação computacional e, por fim testes de longa duração e de *stress*.

6.1.1. Teste com LEDs Vermelhos

Com o intuito de realizar testes iniciais nos circuitos de controle de potência, e evitar riscos de queima de diodos laser de alta potência (de custo muito superior aos LEDs comuns), foram utilizados LEDs de alto brilho na cor vermelha no lugar daqueles. Com mesmo diâmetro do semicondutor original e espectro mais próximo possível da emissão NIR utilizada, porém ainda visível, facilitou-se inspeções visuais do funcionamento da topologia e do projeto dos componentes ópticos. Tem-se a placa de circuito de teste na Figura 6.1.

Os testes iniciais foram realizados com a utilização do circuito de controle baseado no 74LS123 com tensão de entrada de 110 Vac. A fim de minimizar a interferência de ruído eletromagnético do circuito de potência sobre este, a placa confeccionada para o controle foi posicionada no interior de uma proteção metálica.

Observaram-se picos de tensão sobre os semicondutores, gerados por indutâncias parasitas na placa de controle confeccionada. Pequenas modificações foram realizadas nos circuitos de base de tempo e no isolador galvânico, corrigindo este problema.

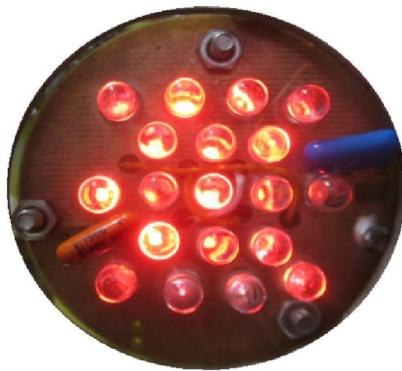


Figura 6.1 – Placa para testes iniciais com LEDs vermelhos de alto brilho.

A interferência eletromagnética gerou sobrechaveamento das chaves comutadoras, ou seja, repetição dos picos de comutação (tensão sobre os terminais *gate-source*) além do previsto pelo sistema. Sendo este transitório e ligado apenas a um comportamento em degrau da tensão de entrada (ao ligar e desligar o sistema), foi possível, ainda avaliar a topologia ressonante, quando não afetada pelo ruído.

As formas de onda da topologia ressonante e do circuito de controle, quando não afetado pelo ruído, foram adquiridas e analisadas e, após a modificação do circuito de base de tempo para o circuito utilizando o MCU (descrito no Item 5.4), considerou-se o sistema pronto para testes com os diodos laser de alta potência.

6.1.2. Teste de Stress da Topologia Ressonante

Após da validação da topologia ressonante e do circuito de controle através da simulação computacional e dos testes iniciais utilizando LEDs vermelhos de alto brilho, realizou-se o primeiro teste de durabilidade e eficiência do sistema de visão utilizando o diodo laser de alta potência.

Utilizando a estrutura programável do circuito de controle baseado no uso de MCUs, criou-se uma situação de sobrechaveamento dos diodos laser de potência a fim de verificar sua eficiência em uma situação de maior carga, ou seja, verificou-se a capacidade do sistema de visão em responder ao *stress* sem que haja queima de qualquer dos semicondutores ou perda significativa da vida útil desses.

Realizou-se este teste de *stress* com um diodo laser de alta potência para cada semiciclo, com tensão de entrada de 220 Vac e 15 pulsos subsequentes sobre os diodos

laser com duração de 800 ns cada. As imagens frontais dos diodos laser foram obtidas através da câmera PL-B776U, em uma frequência de 26 quadros por segundo, sincronizadas com o acionamento dos diodos laser pelo *trigger* da porta RA0 do MUC (Tabela 5.4). O teste teve duração de 16 horas sem interrupção do acionamento.

A comparação da eficiência do sistema de visão foi realizada através do perfil médio de intensidade dos pixels das imagens frontais dos diodos laser obtidas ao longo do teste. Ou seja, em uma mesma área da imagem, calculou-se a média das intensidades dos pixels por coluna, resultando em um perfil de intensidades ao longo de x. A integral do perfil de intensidade é utilizada como o valor de comparação. Deve-se ressaltar que todas as imagens foram adquiridas pela mesma câmera com configurações idênticas e que as imagens apresentam profundidade de cor de 8 bits (0 a 255).

As imagens obtidas no início de teste de *stress* e após 16 horas de funcionamento são mostradas na Figura 6.2.

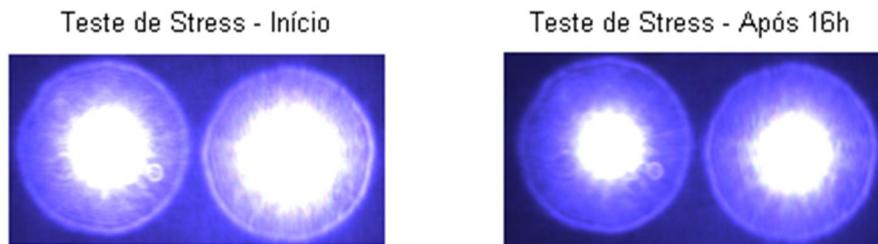


Figura 6.2 – Imagens frontais dos diodos laser obtidas durante o teste de *stress*.

Observa-se, mesmo sem o cálculo do perfil de intensidades e sua integral, que após 16 horas de funcionamento, os diodos laser de alta potência têm uma queda drástica em sua eficiência luminosa (razão da potência elétrica de entrada pela radiação luminosa emitida), sugerindo a diminuição da vida útil deste semicondutor, caso esta queda seja considerada permanente.

Após um período de descanso de 5 horas do sistema, entretanto, os diodos laser apresentaram um retorno do perfil de radiação luminosa próximo ao encontrado no início deste teste de *stress*, como ilustram a Figura 6.3, a Figura 6.4 e a Tabela 6.1.

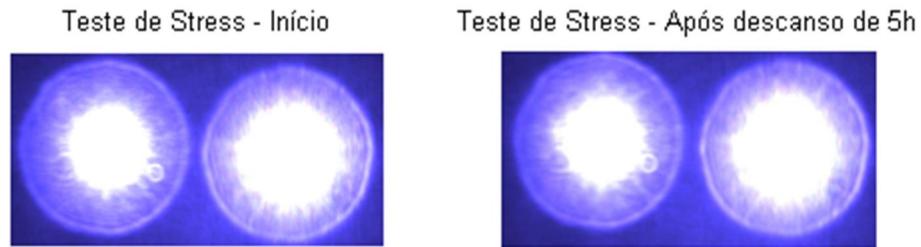


Figura 6.3 – Imagens frontais dos diodos laser obtidas no início e após o teste de *stress*.

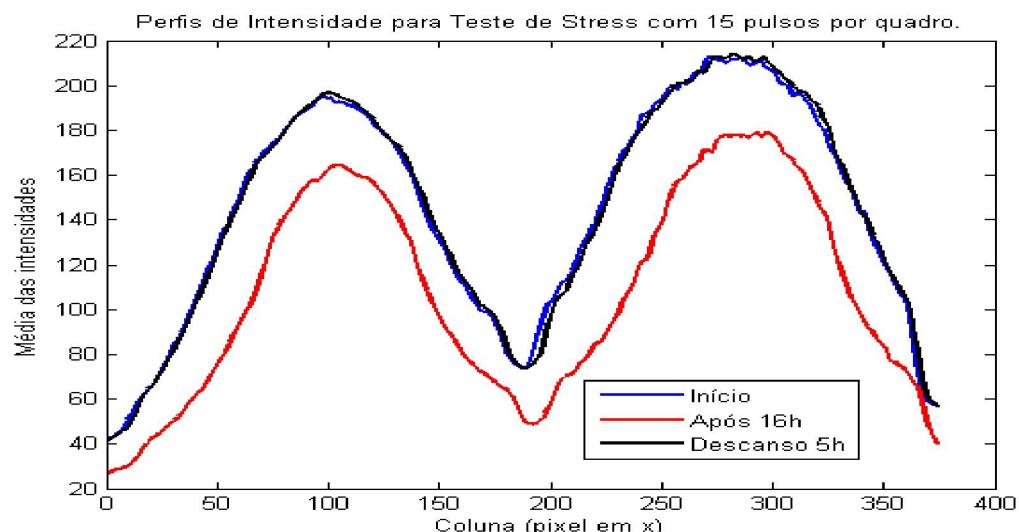


Figura 6.4 – Perfis de intensidade para teste de *stress*.

Tabela 6.1 – Resultados numéricos comparativos do teste de *stress*.

Instante	Integral do Perfil de Intensidades	Relação com valor inicial
Início	5.4371e+004	100%
Após 16 horas	4.0442e+004	75%
Descanso de 5 horas	5.4439e+004	100%

O fenômeno conhecido como queda de eficiência (*efficiency-droop*) é definida pela ocorrência da redução da eficiência da emissão luminosa com o aumento da injeção de corrente ou sob condições de alta densidade de corrente. Muitos trabalhos sugerem os mecanismos responsáveis para explicar este efeito, incluindo aquecimento da junção do semicondutor através de efeito Joule (SHAO *et al.*, 2011). Portanto, é certo dizer que este fenômeno é o responsável pela queda temporária do perfil de radiação luminosa, podendo descartar-se a possibilidade de degradação da vida útil do semicondutor.

6.1.3. Teste de Longa Duração (*Burn-in*)

Como uma forma de estimar a vida útil do sistema de visão como um todo e, mais especificamente, a duração da vida útil dos diodos laser da alta potência, desenvolveu-se um teste de longa duração. A ideia principal deste é, através dos parâmetros nominais de funcionamento (um pico de 800 ns, 25 quadros por segundo e tensão de entrada de 220 Vac), com um diodo laser de alta potência em cada semiciclo, determinar o perfil de intensidade das imagens frontais obtidas dos diodos de alta potência, da mesma forma como foi realizado no item anterior.

. Com a duração deste teste 77 horas de acionamento ininterrupto e as imagens frontais dos diodos laser obtidas em um intervalo de uma hora, pode-se estimar a queda da eficiência da junção PN do diodo laser e, nessas condições, estimar a vida útil aproximada do conjunto de semicondutores emissores, sendo ainda possível a queima ou perda total de radiação luminosa durante o longo intervalo de tempo.

As integrais normalizadas dos perfis de intensidade média ao longo do teste de *burn-in* são mostradas na Figura 6.5, abaixo.

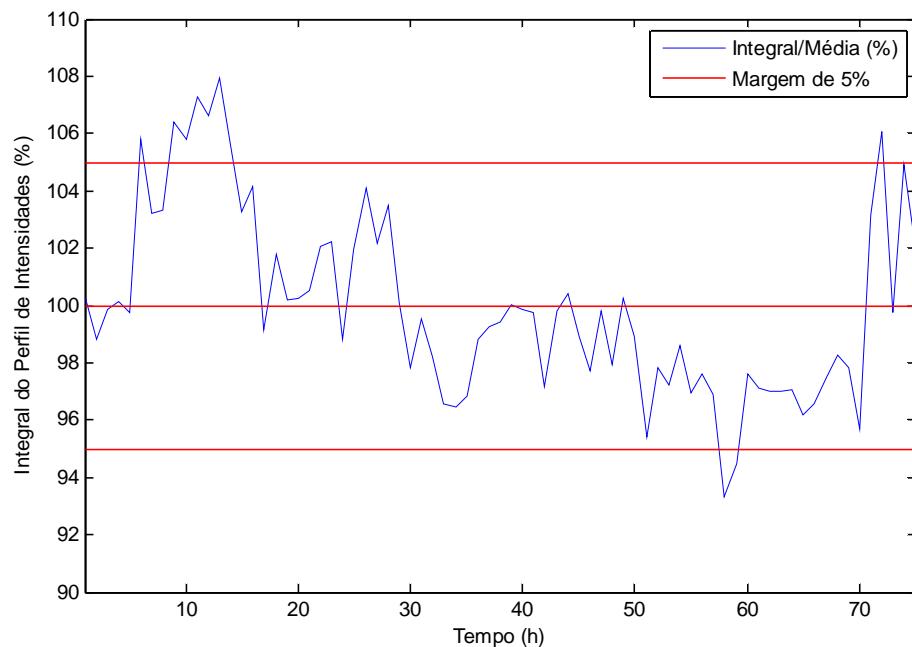


Figura 6.5 – Integral normalizada dos perfis de intensidade para teste de *burn-in*.

Observa-se que, quando o sistema não está sob o *stress* do sobrechaveamento, não há queda significativa da eficiência luminosa do diodo laser ao longo do tempo, apresentando variações de pouco mais de cinco por cento nos instantes dos picos máximo e mínimo para a média de integral nominal. A diferença entre as imagens com maior e menor perfil de intensidade é ilustrada na Figura 6.6.

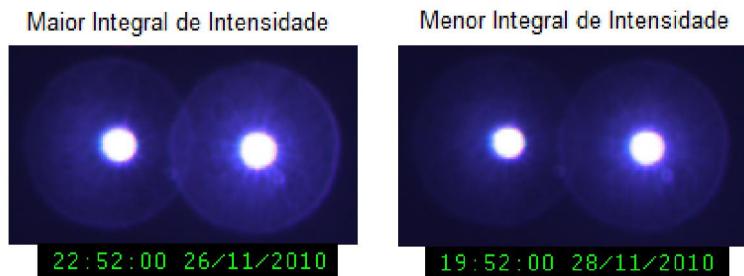


Figura 6.6 – Imagens com maior e menor perfil de intensidade do teste de *burn-in*.

A radiação luminosa observada pelo perfil de intensidade não mostra comportamento linear ao longo do tempo, apesar de apresentar decaimento em sua média ao longo das primeiras 60 horas. Como a corrente que passa pelos diodos laser tem perfil senoidal e não é possível garantir que a imagem frontal é obtida exatamente no mesmo instante ao longo do acionamento, pequenas diferenças podem ocorrer de uma imagem para a outra, mesmo que com características semelhantes de emissão.

Não foi possível estimar, durante este teste de *burn-in*, a vida útil dos componentes emissores, sem a determinação de uma queda significante do perfil de intensidades ao longo do tempo. Não houve, também, queima ou extinção da emissão luminosa de nenhum dos diodos laser testados, garantindo que o sistema de visão não degrada intencionalmente o semicondutor e, portanto, sua vida útil deve ser obtida através da previsão do próprio fabricante.

6.1.4. Validação Através das Formas de Onda

Utilizando-se do osciloscópio digital Tektronix® TPS2012, com quatro canais isolados e armazenamento em um cartão (TEKTRONIX, 2009), adquiriu-se as formas de onda: tensão entre os terminais *drain-source* e *gate-source* das chaves comutadoras Smais e Smenos, tensão e corrente sobre os conjuntos de diodos laser LedMais e LedMenos, tensão sobre o capacitor ressonante e corrente sobre o indutor ressonante.

Deve-se reassaltar que as medições sobre o circuito de potência, com tensão de entrada da rede de 220 Vac, devem sempre ser realizadas com um osciloscópio isolado, ou algum tipo de isolamento do osciloscópio para a rede elétrica, para que não haja interconexão entre uma das fases da tensão de entrada com a referência do próprio osciloscópio.

Os testes experimentais para validação foram realizados com dez diodos de potência (5 em cada conjunto), pulsos subsequentes de acionamento das chaves com 800

ns de duração a uma frequência de 25 Hz. A cada período de acionamento, porém, programou-se o MCU para o acionamento repetitivo (10 acionamento por período) a fim de verificar a resistência do sistema a uma situação extrema.

As tensões de acionamento das duas chaves comutadoras (*gate-source*) retiradas do circuito protótipo e sua comparação com a simulação são mostradas na Figura 6.7.

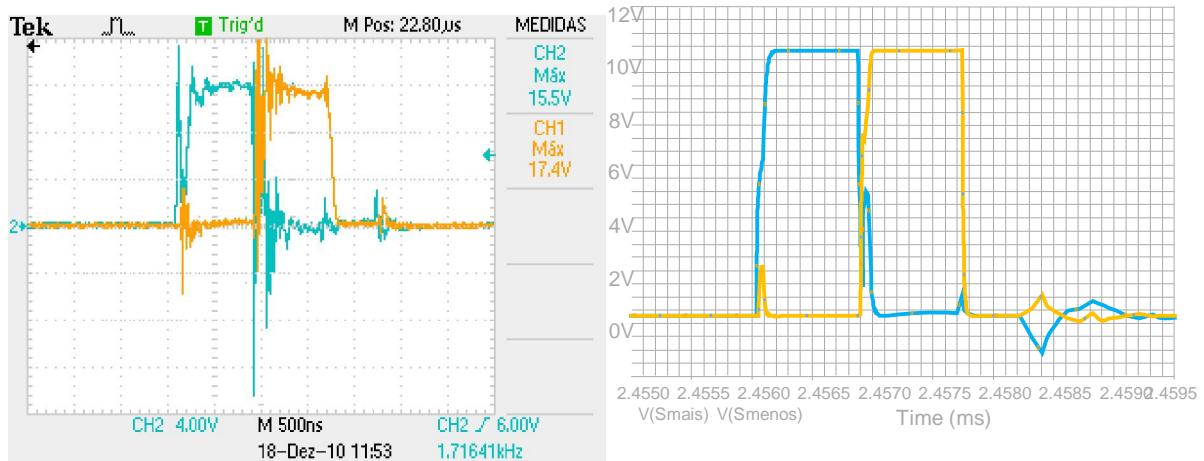


Figura 6.7 – Tensão *gate-source* das chaves Smais e Smenos obtida no circuito protótipo (esquerda) e sua simulação (direita).

O sobrechaveamento forçado pela repetição dos pulsos em um mesmo período (dez pulsos com um intervalo de 4 μ s entre eles) faz com que as tensões *gate-source* se apresentem mais ruidosas, porém este não é suficiente para denegrir o funcionamento do circuito, não sendo observados acionamentos além do previsto ou qualquer aquecimento dos semicondutores.

As tensões *gate-source* das chaves Smais e Smenos são considerados, portanto, adequados para o acionamento correto dessas, sendo subsequentes, sem cruzamento entre eles, subida e descida aproximadamente em degrau e atingindo um valor ideal de tensão de pico, bem acima da tensão limite de acionamento da chave. Observa-se, da mesma forma que a simulação, a influência do chaveamento de uma chave sobre a outra e o carregamento das capacitâncias ao final do terceiro estágio de funcionamento.

A corrente sobre o primeiro conjunto de diodos laser, LedMais, e a tensão sobre eles adquiridas no protótipo e sua comparação com a simulação são mostrados na Figura 6.8.

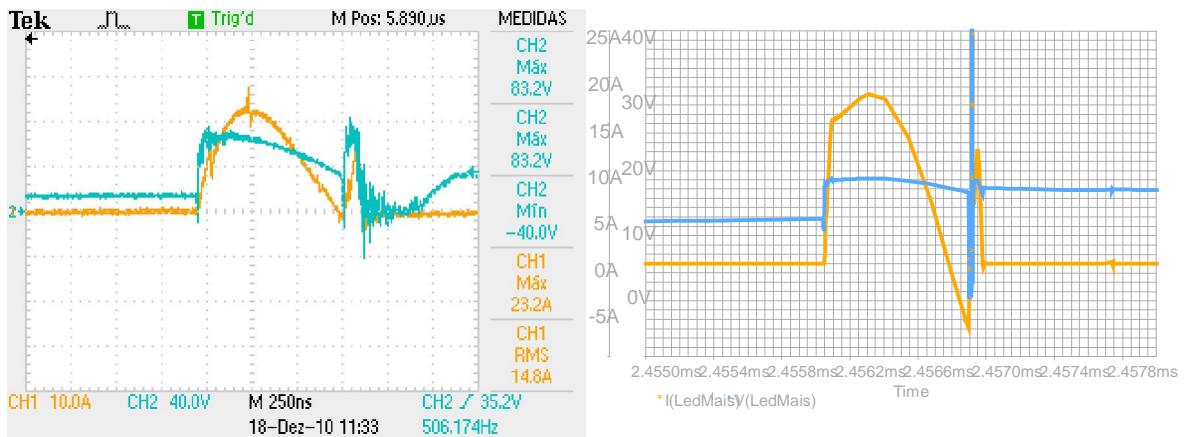


Figura 6.8 – Tensão e corrente do conjunto LedMais obtidos no circuito protótipo (esquerda) e sua simulação (direita).

O uso de um modelo aproximado do diodo laser durante a simulação gera as diferenças nos valores sobre os diodos laser, porém é possível perceber que o comportamento em geral das formas de onda, tanto de tensão quanto de corrente simulados são fiéis ao comportamento obtido em medições experimentais.

A corrente sobre o segundo conjunto de diodos laser, LedMenos, e a tensão sobre eles adquiridas no protótipo e sua comparação com a simulação são mostrados na Figura 6.9.

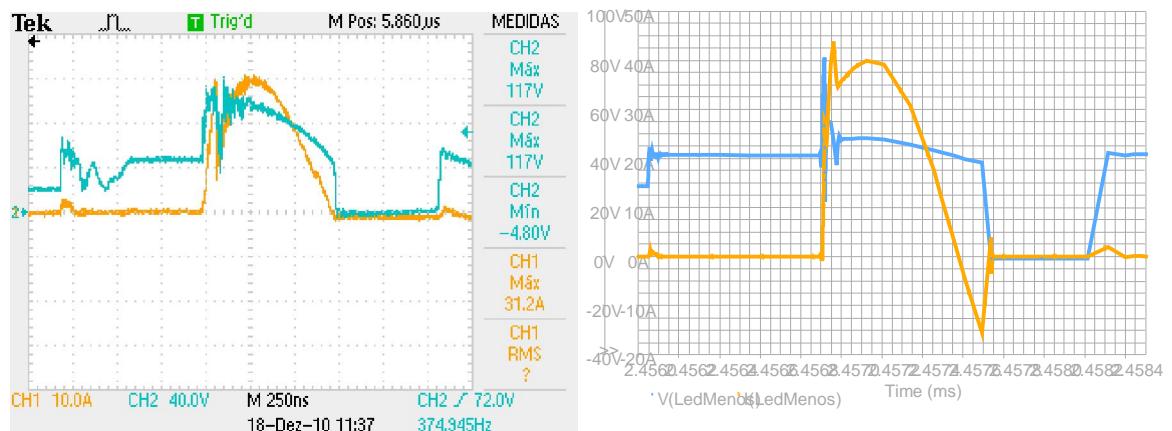


Figura 6.9 – Tensão e corrente do conjunto LedMenos obtidos no circuito protótipo (esquerda) e sua simulação (direita).

Nota-se que a corrente negativa ao final do ciclo no circuito real é muito menor do que apresentada na simulação e que as formas de onda são fiéis às obtidas em simulação, assim como ocorre para o LedMais, com diferenças dos valores devido ao modelo simplificado do diodo laser se potência utilizado na simulação.

As tensões sobre os terminais *dreno-source* das duas chaves de comutação e sua comparação com a simulação são mostradas na Figura 6.10.

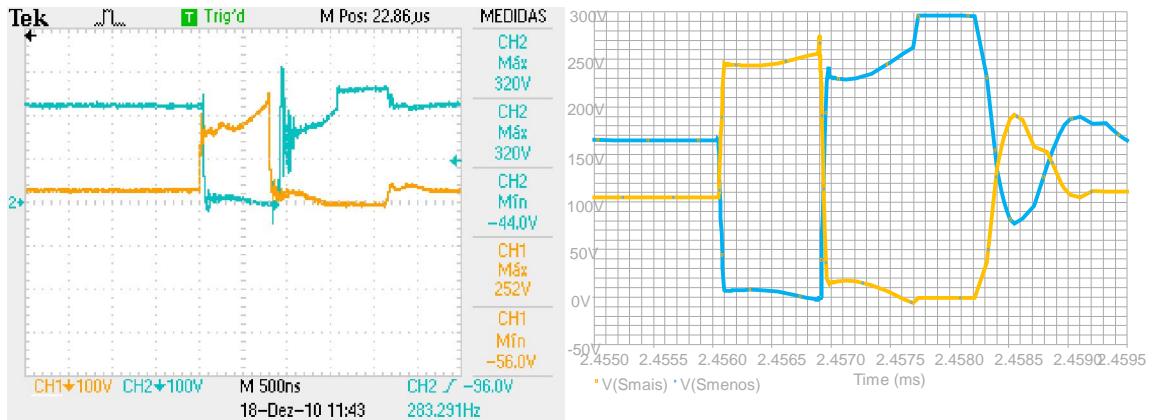


Figura 6.10 – Tensão *dreno-source* das chaves Smais e Smenos obtida no circuito protótipo (esquerda) e sua simulação (direita).

Ambas as chaves comutadoras comportam-se como o esperado pela simulação, apresentando-se ruidosas pela presença do sobrechaveamento forçado para o teste de situações extremas. Todos os valores de tensão do resultado experimental apresentaram-se próximos dos valores simulados, garantido, portanto, o chaveamento correto do modelo escolhido para este trabalho.

A tensão sobre o capacitor ressonante e sua comparação com a simulação é mostrada na Figura 6.11.

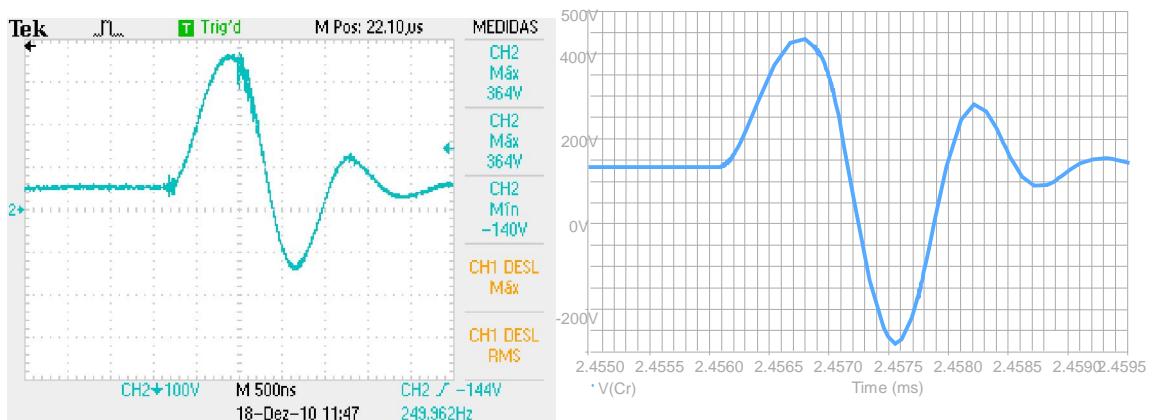


Figura 6.11 – Tensão sobre o capacitor ressonante obtida no circuito protótipo (esquerda) e sua simulação (direita).

O resultado experimental da tensão sobre o capacitor ressonante apresentou comportamento semelhante ao esperado pela simulação, mantendo sua característica senoidal em função do tempo de ciclo. O pico máximo de tensão sobre o capacitor, em cerca de 350 V, é responsável pelo maior pico de corrente no segundo conjunto de diodos laser, como o previsto pela análise inicial da topologia ressonante.

Como não é possível se obter a corrente que passa pelo indutor, através de uma ponteira de corrente, sem grandes modificações do circuito, optou-se pela medição da tensão sobre o indutor, $V_{Lr}(t)$. Pela da Equação (5.4), isolando o termo relacionado à corrente, tem-se que:

$$\frac{V_{Lr}(\lambda)}{Lr} \cdot dt = d[i_{Lr}(\lambda)] \quad (6.1)$$

Aplicando a integral dos dois lados tem-se, portanto:

$$i_{Lr}(\lambda) = \frac{1}{Lr} \cdot \int V_{Lr}(\lambda) \cdot dt \quad (6.2)$$

Sendo assim, a razão da integração numérica da forma de onda da tensão sobre o indutor pelo valor da indutância ressonante é igual à corrente que passa pelo componente. Utilizou-se a função *cumtrapz* do Matlab® para o cálculo da integral numérica da tensão sobre o indutor e a forma de onda encontrada para a corrente é mostrada na Figura 6.12.

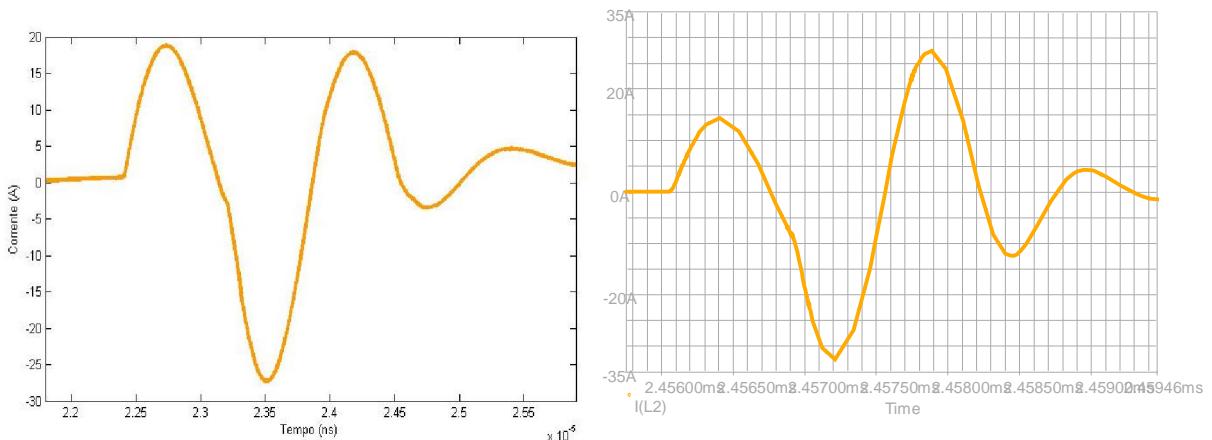


Figura 6.12 – Corrente sobre o indutor ressonante calculada do circuito protótipo (esquerda) e sua simulação (direita).

Observa-se que as duas formas de onda apresentam comportamentos (formato) semelhantes e valores de pico próximos. As pequenas diferenças apresentadas são

resultado da falta do modelo real do diodo laser para a simulação e as indutâncias presentes nas trilhas do protótipo.

Sendo assim, os resultados experimentais obtidos neste item validam toda a simulação computacional realizada e afirmam a elegibilidade da topologia ressonante apresentada neste trabalho para o acionamento dos diodos laser de alta potência.

6.2. Estudo da Emissão do Diodo Laser de Alta Potência

Com a topologia ressonante de acionamento apta para a passagem de corrente de forma correta sobre os diodos laser de potência escolhidos e, com os resultados do estudo da emissão de luz infravermelha do arco elétrico nos processos de soldagem TIG e MIG/MAG (demonstrados no item 3.3), deve-se realizar, portanto, o estudo da emissão infravermelha dos diodos laser.

6.2.1. Influência do Número de Diodos Laser

Inicialmente, procurou-se determinar, qualitativamente, a influência do número de diodos laser sobre a energia luminosa infravermelha emitida pelo sistema de visão. Sabe-se, pela descrição do funcionamento da topologia ressonante, que o aumento do número de diodos laser gera uma queda na corrente que passa por ele.

Dadas as mesmas características de funcionamento do sistema de visão (tensão de entrada de 220 Vac, frequência de acionamento de 25 Hz), aumentou-se gradativamente o número de semicondutores luminosos, de 2 a 10 diodos com aumento de 2 em cada medida, afim de determinar sua parcela de influência na energia luminosa emitida.

Para a obtenção do espectro de emissão do sistema de visão, utilizou-se o programa em ambiente LabView® apresentado no estudo de emissão dos processos da soldagem (Figura 4.4) com as calibrações e bibliotecas fornecidas pelo fabricante do espectrômetro. Para a aquisição deste, utilizou-se os seguintes dados de entrada: tempo de integração de 4 ms, 50 médias, 1000 ms de intervalo de tempo entre duas amostras e 20 amostras a serem gravadas.

Deve-se ressaltar que o sistema de visão foi acoplado ao sistema óptico de lentes projetado no item 5.7 e o conjunto, por fim, foi alinhado horizontalmente com o suporte para fibra óptica e lentes com a presença do filtro passa-faixa em 905 nm (Figura 4.1), a uma distância de 250 mm entre eles. Neste caso, verificou-se a iluminação direta dos diodos laser e não a reflexão da luz infravermelha em uma superfície.

Os valores da integração numérica, na faixa de comprimentos de 880 e 930 nm, obtidos após a coleta e interpretação dos espectros para o número de diodos laser inseridos no sistema de visão (distribuídos igualmente nos dois semi-ciclos) são mostrados na Figura 6.13.

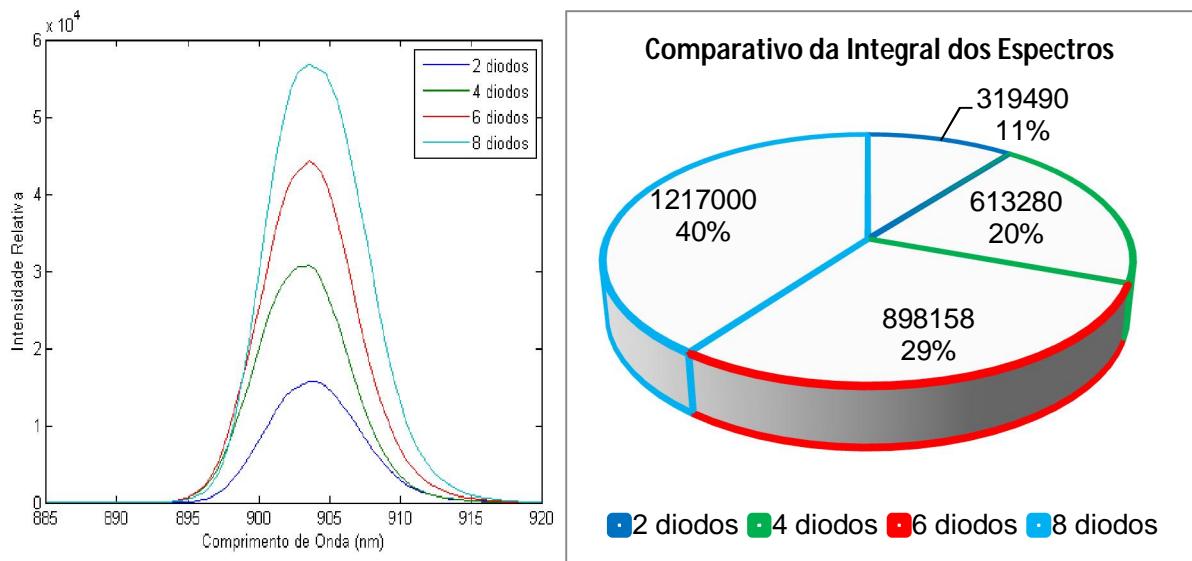


Figura 6.13 – Espectros de emissão dos diodos laser (esquerda) e comparativo das integrais destes (direita).

Observou-se que o pico de emissão relativa é diretamente proporcional à quantidade de diodos laser inserida no sistema de visão. As integrais obtidas pelos espectros demonstraram que o aumento de duas vezes na quantidade de diodo laser em dobrou a energia luminosa captada pelo espetrômetro, sendo então diretamente proporcional a esta. A queda da corrente (que passa pelo conjunto de diodos) provocada pela inserção de semicondutores foi, portanto, balanceada com a geração extra de luz infravermelha.

Com a inserção de 10 diodos laser houve a saturação do CCD do espetrômetro e, portanto, não foi possível determinar a influência de um número maior de diodos laser sobre a energia luminosa emitida pelo sistema de visão.

6.2.2. Emissão Reflexiva do Diodo Laser de Alta Potência

Para determinar a potência luminosa emitida pelo conjunto de dezenove diodos laser no sistema de visão e, qualitativamente, sua capacidade de superar a emissão infravermelha do arco de solda, realizou-se o estudo da emissão em infravermelho próximo dos diodos laser de alta potência.

Como a técnica de iluminação direta foi escolhida inicialmente como configuração de utilização do sistema de visão, ou seja, a iluminação infravermelha é projetada na região da junta e refletida para a câmera, a obtenção dos espetros dos diodos laser foi realizada através da reflexão do feixe de luz sobre uma chapa de aço lixada, como ilustra a Figura 6.14.

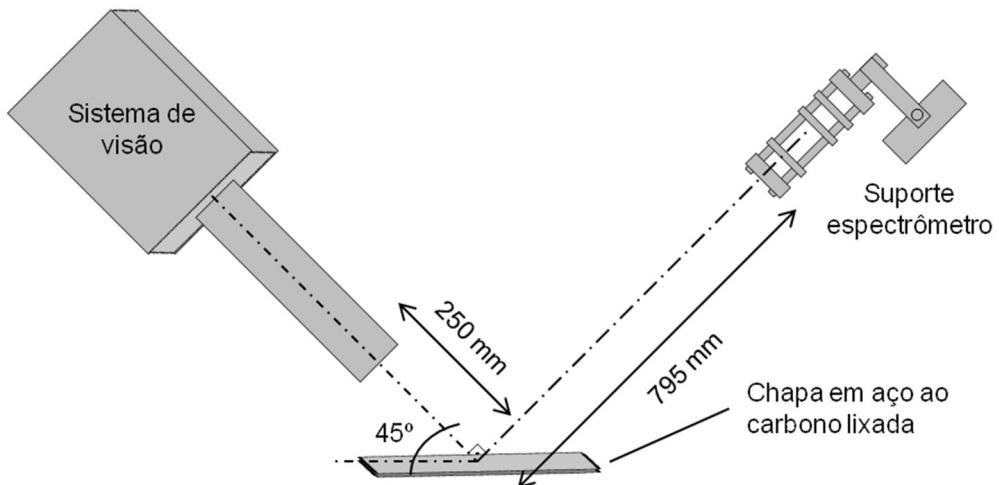


Figura 6.14 – Montagem experimental para estudo da emissão NIR dos diodos laser.

Para possibilitar a comparação do espectro de emissão dos diodos laser e do estudo dos processos de soldagem (realizados no Capítulo 3.3), a distância entre o espectrômetro e a chapa lixada, $D = 795$ mm, foi a mesma utilizada nos ensaios para os processos de soldagem. A chapa de aço ao carbono foi lixada para proporcionar maior flexibilidade, maximizando a energia da luz infravermelha proveniente do sistema de visão que alcança o CCD do espectrômetro.

Deve-se ressaltar que ambos os sistemas situavam-se a uma inclinação de 45º do plano de reflexão da chapa, e o sistema de visão encontra-se na distância de trabalho estabelecida (250 mm). O alinhamento correto entre o sistema de visão e o espectrômetro é fundamental na obtenção do espectro de emissão e qualquer alteração na montagem pode alterar de forma significativa os resultados obtidos.

Para a obtenção do espectro de emissão refletida, utilizou-se o programa em ambiente LabView® apresentado no estudo de emissão dos processos da soldagem (Figura 4.4) com os seguintes dados de entrada: tempo de integração de 1000 ms, 1 média, 1000 ms de intervalo de tempo entre duas amostras e 10 amostras a serem gravadas.

O MCU foi programado para enviar 40 pulsos de acionamento por quadro, a uma frequência de 25 Hz. Durante todo o tempo de abertura do CCD do espectrômetro (1 segundo), portanto, são somados os espetros de 1000 pulsos com duração de 1,6 μ s (800

ns por semiciclo), ou seja, o equivalente a um total de 1,6 ms de emissão dos diodos laser contínuo, como pode ser visto na Figura 6.15. A título de comparação, os processos de soldagem foram adquiridos a um tempo de abertura de 40 ms contínuo, portanto, tempo 25 vezes maior de emissão captada pelo espectrômetro neste caso.

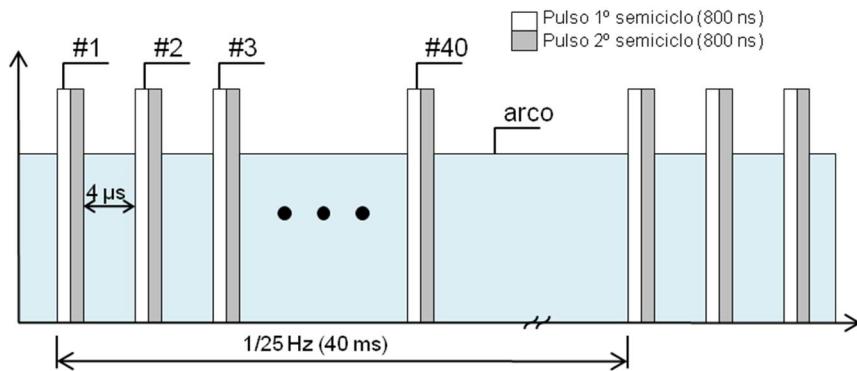


Figura 6.15 – Esquema de acionamento dos diodos laser para comparativo de espectros.

O espectro médio obtido pela emissão refletida dos diodos laser e sua comparação aos espectros obtidos em processos de soldagem são mostrados na Figura 6.16.

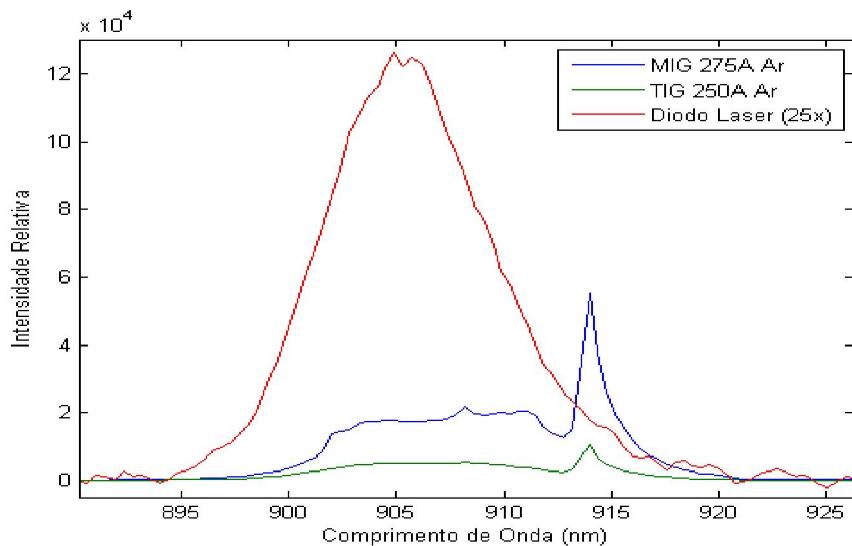


Figura 6.16 – Comparativo de espectros de processos de soldagem e do sistema de visão.

O perfil corrigido do espectro emitido pelos diodos laser - multiplica-se o perfil encontrado por 25 para simular uma radiação luminosa contínua de 40 ms - mostra-se superior aos espectros de processos de soldagem com gás de proteção de Argônio puro (maior emissão no espectro permitido pelo filtro passa-faixa) e com correntes de 250 A.

Em uma condição extrema de sobrechaveamento, podem-se acionar os diodos laser de potência cerca de 18 vezes por quadro com o intervalo de 4 μ s entre eles, a fim de aumentar o somatório de luz proveniente do sistema de visão para o excessivo tempo de abertura da câmera (100 μ s) e sem que haja prejuízo no funcionamento da topologia ressonante, Figura 6.17. Sendo assim, tem-se, efetivamente 28,8 μ s de tempo somado de emissão dos diodos laser.

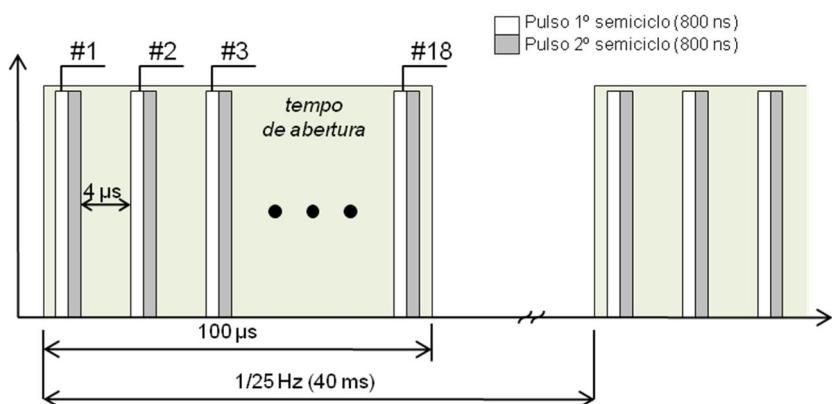


Figura 6.17 – Esquema de sobrechaveamento dos diodos laser para compensação do alto tempo de abertura da câmera.

Portanto, para uma sobreposição do arco de solda, que emite continuamente durante todo o tempo de abertura de um quadro, a energia luminosa emitida pelos diodos laser deve superar a energia do arco em, no mínimo 3 vezes a energia desse. Ou seja, a integral do espectro dos diodos laser deve ser 3 vezes maior que a integral do processo de soldagem. Para os espectros ilustrados na Figura 6.16, os valores da energia luminosa são mostrados na Figura 6.18.

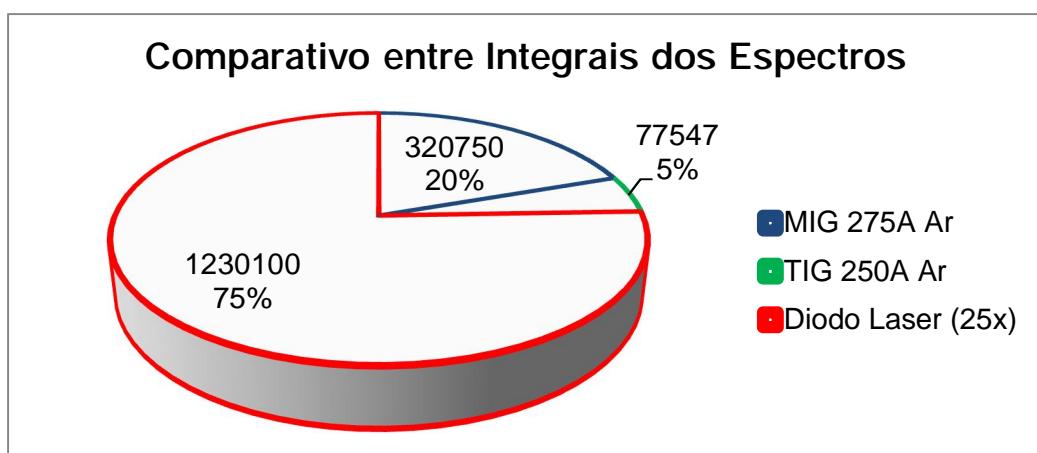


Figura 6.18 – Comparativo de energia luminosa (integral dos espectros) de processos de soldagem e do sistema de visão.

Através do comparativo entre os estudos de emissão de infravermelho próximo de processos de soldagem e do sistema de visão, pode-se concluir que a luz que é emitida pelo sistema é suficientemente forte para sobrepor a luz do arco no processo TIG (cerca de 15 vezes maior) e do processo MIG/MAG (cerca de 3,5 vezes maior), para as condições de sobrechaveamento da topologia ressonante e tempo de abertura de 100 µs por quadro.

Por fim, um ponto muito importante observado durante a realização dos ensaios de emissão reflexiva, foi que as máscaras de solda com escurecimento automático mostraram-se sensíveis à radiação luminosa infravermelha do diodo laser. Ou seja, quando o sistema de visão é ligado, o operador utilizando a máscara de solda tem seu visor escurecido mesmo sem estar diretamente à frente do sistema de visão. Qualitativamente, pode-se concluir que a luz dos diodos laser é tão ou mais forte que a radiação luminosa do arco para que o fechamento automático da máscara de solda seja acionado. Esta observação também é importante para reforçar os cuidados com a visão do operador, cujos olhos podem sofrer danos (queimaduras), caso não se utilize EPI apropriado.

6.3. Uso do Sistema de Visão em Soldagem TIG

Para o teste do protótipo do sistema de visão em soldagens TIG, procurou-se inicialmente um menor nível de corrente e, consequentemente, menor nível de emissão luminosa do arco. Os parâmetros selecionados para o processo de soldagem e a configuração do sistema de visão são listados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Parâmetros selecionados para o teste do sistema de visão em Soldagem TIG.

	Parâmetro	Valor Médio	Unidade
Soldagem	Gás de Proteção	Ar puro	---
	Corrente	107	A
	Tensão	12,9	V
	Velocidade de Soldagem	10	cm/min
	DEP (distância entre eletrodo e peça)	3	mm
Sistema de Visão	Frequência de Açãoamento	25	Hz
	Tempo de pulso	1,6	µs
	Intervalo entre pulsos	4	µs
	Tensão de entrada	220	Vac
	Sobrechaveamento	18	Pulsos /quadro

Segue lista dos equipamentos e consumíveis utilizados durante a realização dos testes para a soldagem TIG:

- Filtro Óptico Comar 905 IH 25;
- Câmera Pixelink® PL-B776U;
- Mesa movimentadora;
- Fonte ESAB U5000IW;
- Eletrodo EWTh-2 com diâmetro de 2,4 mm;
- Chapas de aço ao carbono lixadas com espessura de $\frac{1}{2}$ ";
- Óculos de proteção modelo 620.P1002.00 Skyline.

A câmera foi configurada, através do programa fornecido pelo fabricante Pixelink Capture OEM, para a aquisição de um vídeo em formato AVI com resolução de 800x600 pixels, tempo de abertura de 100 μ s, com o total de 100 quadros (4 segundo de vídeo final com 25 fps) controlado através de trigger externo. Utilizou-se um algoritmo em Matlab® para a decomposição do vídeo em uma sequência de imagens.

A Figura 6.19, a seguir, ilustra a montagem do sistema de visão e da câmera em relação à chapa de teste para a aquisição das imagens em todos os testes de soldagens (TIG e MIG/MAG).

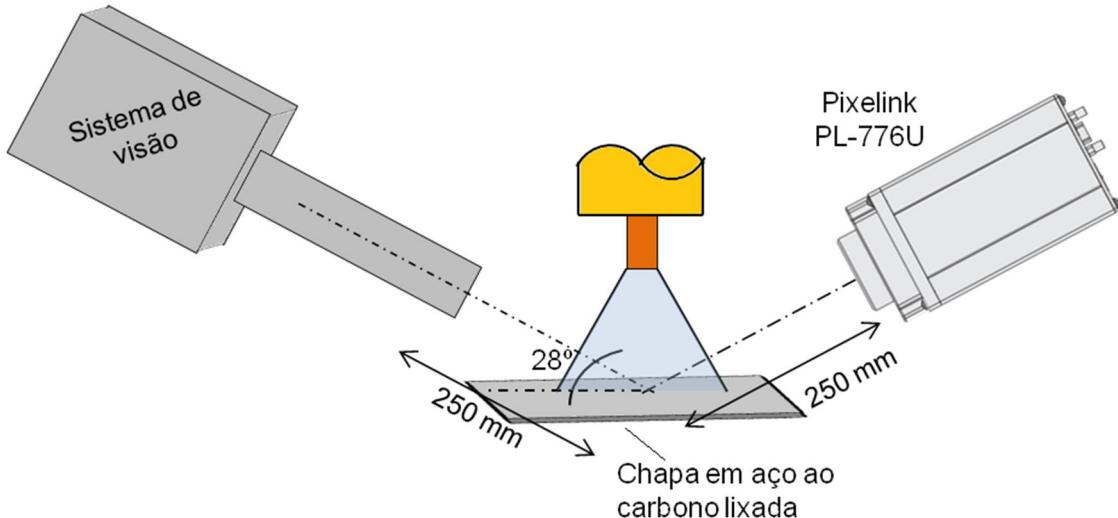


Figura 6.19 – Esquema de montagem para a aquisição das imagens em soldagens TIG e MIG/MAG através do uso do sistema de visão.

Ambos os sistemas foram posicionados a uma mesma distância da área de interesse, sendo esta a distância mínima de segurança estabelecida anteriormente (250 mm). A iluminação é projetada na superfície da chapa com um ângulo de aproximadamente

28º, sendo a câmera posicionada para receber a reflexão máxima da luz do diodo laser, ou seja, com um ângulo semelhante em relação ao plano da chapa.

Exemplos dos quadros obtidos durante o uso do sistema de visão na soldagem TIG são mostrados na Figura 6.20. A título de obtenção de escala, deve-se considerar que o diâmetro do eletrodo de 2,4 mm.

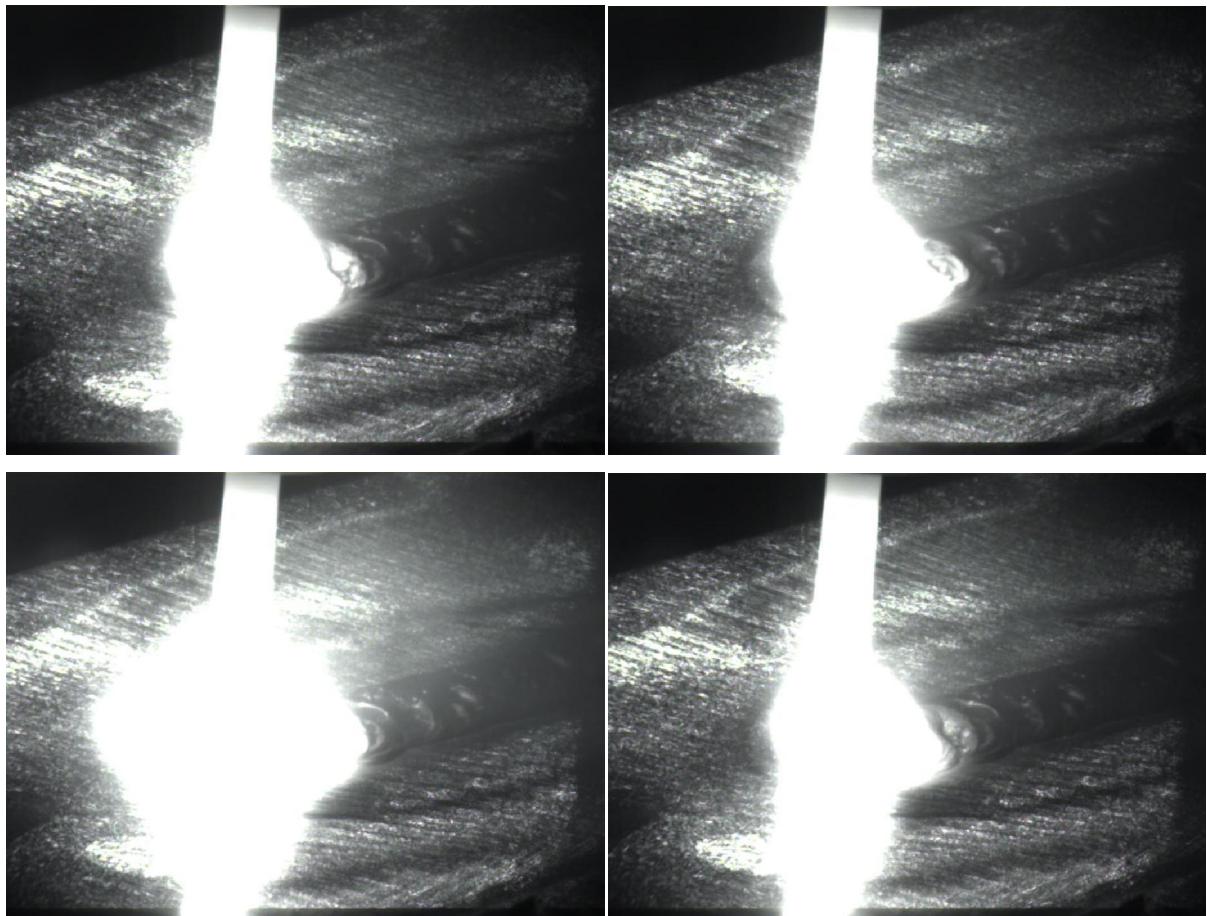


Figura 6.20 – Imagens obtidas pelo sistema de visão em soldagem TIG (100 A, Ar puro – como escala adotar diâmetro do eletrodo igual a 2,4 mm).

Observa-se, inicialmente, que a luz proveniente do sistema de visão não foi suficiente para sobrepor totalmente a luz do arco para o processo TIG com correntes em cerca de 100 A. A superfície reflexiva da chapa lixada comportou-se como um refletor da luz infravermelha provinda do arco, saturando os pixels do CMOS da câmera durante toda a soldagem na região central inferior.

A título de comparação a trabalhos similares tem-se a Figura 6.21, ilustrando bons resultados obtidos com um sistema de visão baseado nos mesmos diodos laser de alta potência (HOUGHTON *et al.*, 2007; VILARINHO *et al.*, 2009; VILARINHO *et al.*, 2010). Nestes trabalhos foi utilizada uma câmera com menor tempo de abertura (10

microsegundos) e se extrapolou os limites de utilização do diodo laser dados pelo fabricante com respeito ao ciclo de trabalho (maior que 100 %). Assim, estas opções destes autores auxiliaram na obtenção da sobreposição do arco em soldagens TIG para o sistema de visão utilizado nos referidos trabalhos.

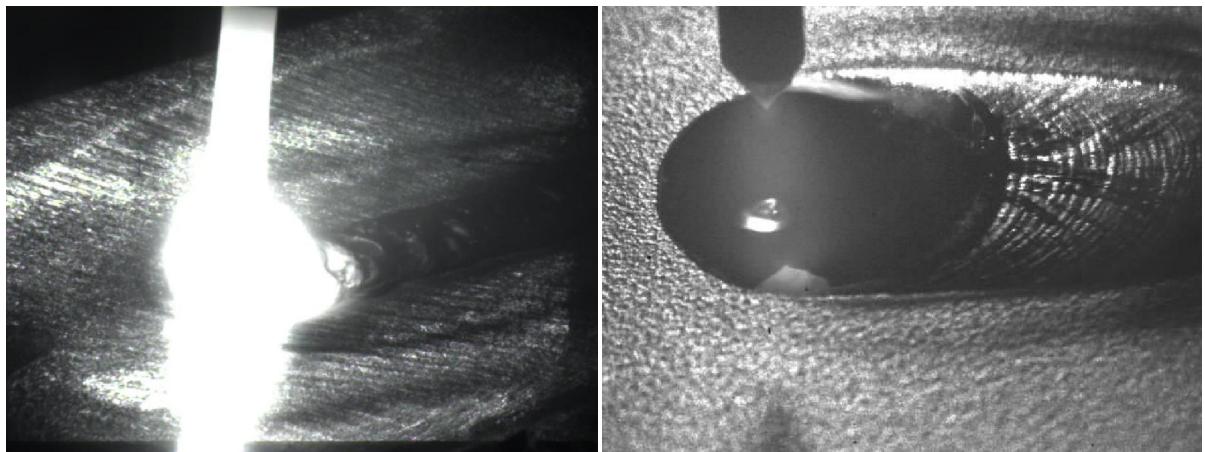


Figura 6.21 – Comparação entre sistemas de visão em TIG: topologia ressonante (esquerda) e literatura (direita) (VILARINHO *et al.*, 2009; VILARINHO *et al.*, 2010).

Em contrapartida, pelos quadros ilustrados inicialmente (Figura 6.20), obtidos em diferentes instantes da aquisição, é possível observar que não há oscilação do perfil de iluminação da área da junta, indicando uma boa sincronização entre a emissão dos pulsos de NIR dos diodos laser e a abertura do *shutter* da câmera para a obtenção da imagem.

Pode-se observar ainda que a área real da imagem obtida para o sistema de comparação é bem menor que a iluminação da topologia ressonante proposta (comparação do tamanho da poça de fusão). A geração da imagem em uma câmera CMOS é relativa à atribuição de um valor de pixel a um nível de iluminação, ou seja, para o plano de trabalho, normaliza-se as intensidades dos pixels de acordo com a radiação luminosa presente. Sendo assim, é possível ainda utilizar um maior *zoom* óptico para reduzir a contribuição da radiação fornecida pelo arco e, consequentemente, melhorar o contraste e a parcela de luz provinda do sistema de visão.

De toda forma, como o sistema não foi capaz de sobrepor o arco para soldagem TIG com uma situação de menor emissão NIR (corrente baixa), conclui-se que não seria necessária a realização de novos testes com o aumento da emissão infravermelha ou em diferentes situações.

6.4. Uso do Sistema de Visão em Soldagem MIG/MAG

Para o teste do protótipo do sistema de visão em soldagem MIG/MAG, procurou-se inicialmente um menor nível de velocidade de alimentação (e consequentemente corrente) e menor tensão (transferência metálica por curto-círcuito) para se obter um menor nível de emissão luminosa do arco. Escolheu-se, inicialmente o gás de proteção com menor pico relativo de emissão no intervalo de espectro permitido pelo filtro de interferência, ou seja, CO₂ puro. Os parâmetros selecionados para o processo de soldagem e a configuração do sistema de visão são listados na Tabela 6.3.

Segue lista dos equipamentos e consumíveis utilizados durante a realização dos testes para a soldagem MIG/MAG:

- Filtro Óptico Comar 905 IH 25;
- Câmera Pixelink® PL-B776U;
- Mesa movimentadora;
- Fonte ESAB U5000IW;
- Cabeçote ESAB 30-W4 M0;
- Arame ER70S6 com diâmetro de 1,2 mm
- Chapas de aço ao carbono lixadas com espessura de ½”.
- Óculos de proteção modelo 620.P1002.00 Skyline.

Tabela 6.3 – Parâmetros medidos para o teste do sistema de visão em soldagem MIG/MAG.

	Parâmetro	Valor Médio	Unidade
Soldagem	Gás de Proteção	CO ₂ puro	---
	Corrente	100	A
	Tensão	17,5	V
	Velocidade de Alimentação	2	m/min
	Velocidade de Soldagem	20	cm/min
	DBCP	12	mm
Sistema de Visão	Frequência de Acionamento	25	Hz
	Tempo de pulso	1,6	µs
	Intervalo entre pulsos	4	µs
	Tensão de entrada	220	Vac
	Sobrechaveamento	18	pulsos/quadro

A câmera foi configurada de forma semelhante ao teste realizado com a soldagem TIG e, da mesma forma o vídeo foi convertido para uma sequência de imagens através de um algoritmo em linguagem Matlab®. Ambos os sistemas foram posicionados a uma mesma distância da área de interesse, sendo esta a distância mínima de segurança estabelecida anteriormente (250 mm), semelhante ao utilizado no uso do sistema para soldagens TIG (Figura 6.19).

Exemplos dos quadros obtidos durante o uso do sistema de visão na soldagem MIG/MAG são mostrados na Figura 6.22. A título de obtenção de escala, deve-se considerar que o diâmetro do arame é de 1,2 mm.

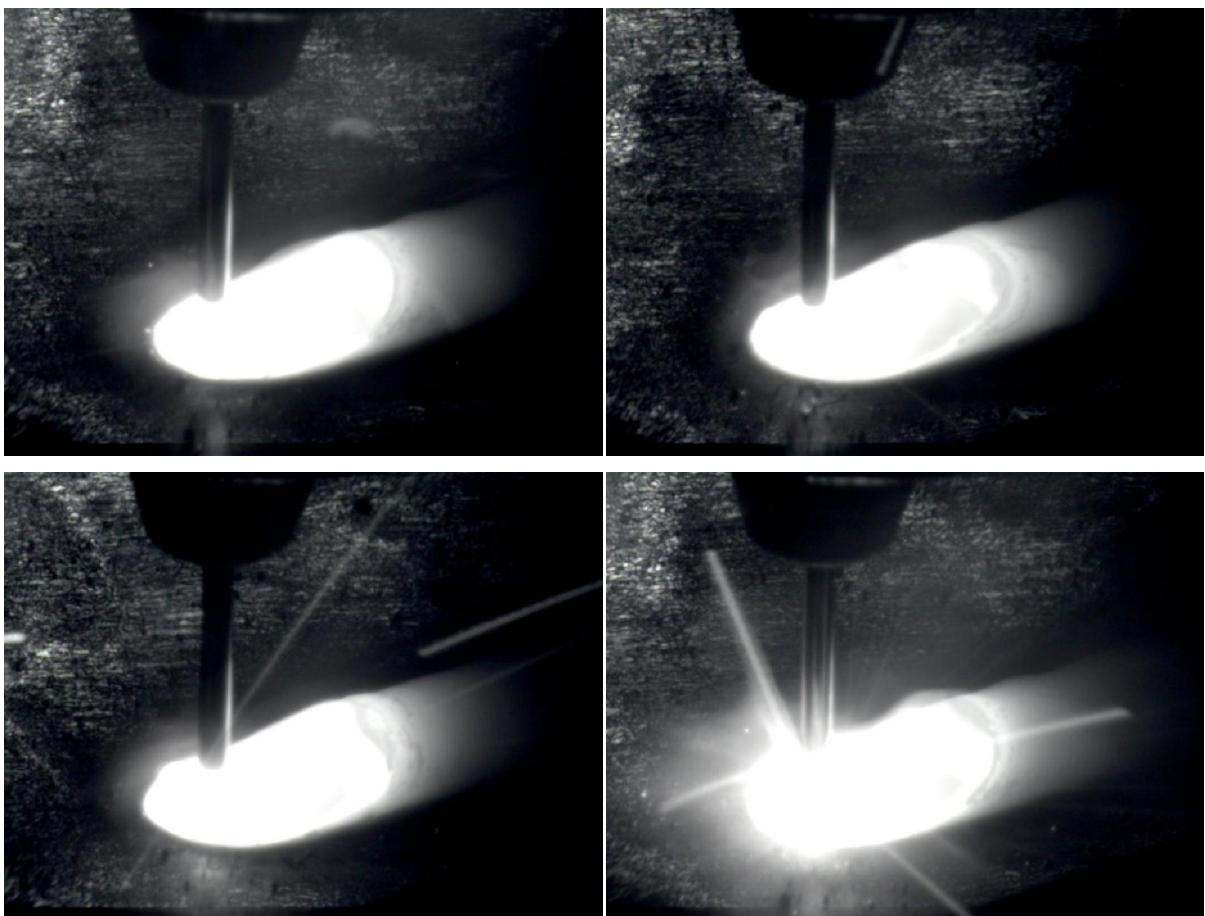


Figura 6.22 – Imagens obtidas pelo sistema de visão em soldagem MAG (100 A, CO₂ puro – como escala adotar diâmetro do arame igual a 1,2 mm).

Observa-se, inicialmente, que a luz proveniente do sistema de visão não foi suficiente para sobrepor totalmente a luz do arco para o processo MIG/MAG com correntes em cerca de 100 A. Neste caso, utilizou-se um obturador mais fechado, permitindo menor entrada de luz quando comparado ao processo TIG. Não houve reflexão do arco sobre a

chapa lixada, porém a poça fundida apresentou intensidades de pixels próximos à saturação do CMOS da câmera.

Pode-se considerar, neste ponto, duas possibilidades para a coloração “branca” da poça fundida. A primeira delas, semelhante ao que ocorre no processo TIG, seria a reflexão da luz do arco na superfície espelhada do metal fundido e, a segunda, seria a emissão do aço em altas temperaturas. Para uma poça fluida, em temperaturas acima de 1200 °C, o aço mantém uma coloração branca (CHALLONER, 1997), portanto, emitindo em todos os espectros de cor e, portanto, é bem possível que a emissão do aço nessa faixa de temperatura tenha componentes no infravermelho próximo, passando pelo filtro de interferência e alcançando o CMOS.

A título de comparação a trabalhos similares, tem-se a Figura 6.23, ilustrando resultados obtidos com um sistema de visão baseado nos mesmos diodos laser de alta potência para processos MIG/MAG (HOUGHTON *et al.*, 2007; VILARINHO *et al.*, 2009; VILARINHO *et al.*, 2010).

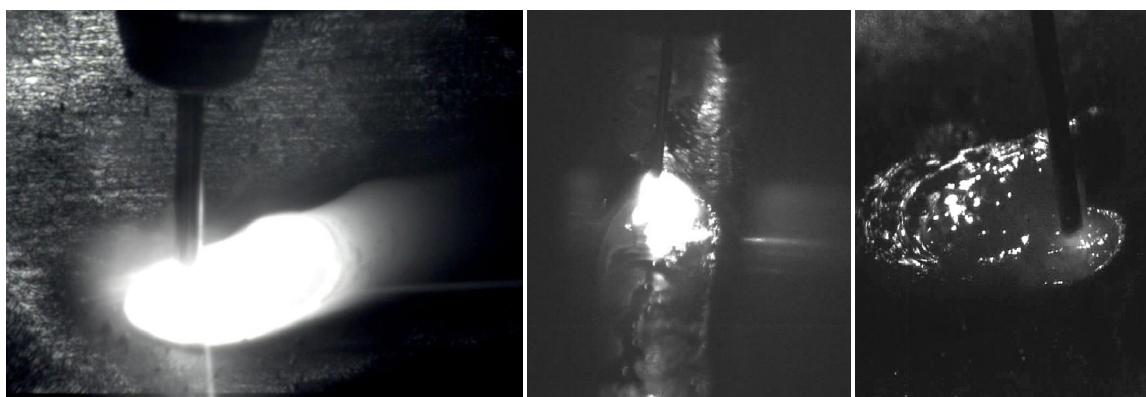


Figura 6.23 – Comparaçao entre sistemas de visão em MIG/MAG: topologia ressonante (esquerda) e literatura (centro e direita) (VILARINHO *et al.*, 2009; VILARINHO *et al.*, 2010).

Observa-se que, assim como a topologia ressonante, o sistema de visão não foi capaz de sobrepor-se a luz infravermelha próxima vinda do arco em processo MIG/MAG, comportando-se de forma semelhante ao processo TIG.

Assim como ocorrido nos testes em processos TIG, o sistema de visão mostrou-se com boa sincronização com o tempo de abertura para a aquisição dos quadros e sua iluminação provou-se, também, homogeneizada ao longo da área de projeção da luz no plano da chapa. O sistema óptico projetado neste trabalho promoveu uma melhor iluminação da região de interesse, resultando em imagens de melhor qualidade, melhor contraste e maior nível de detalhes quando comparado ao sistema de visão de referência.

Como o sistema não foi capaz de sobrepor o arco para soldagem MIG/MAG com uma situação de menor emissão NIR (corrente baixa e gás de proteção com menor emissão

no espectro do filtro de interferência), conclui-se que não seria necessária a realização de novos testes com o aumento da emissão infravermelha ou em diferentes situações. Este sistema, portanto, para essas condições de soldagem e iluminação se encontra completamente apto para aplicações como seguidor de juntas.

6.5. Conclusões Gerais sobre o uso de Sistema de Visão em Soldagens TIG e MIG/MAG

Acredita-se que o uso de uma câmera CMOS com o tempo de abertura (*exposure time* ou *shutter*) muito superior ao tempo de acionamento máximo dos diodos laser é o principal responsável pela incapacidade do sistema de visão em sobrepor-se à luz provinda do arco. Mesmo com a utilização de sobrechaveamento, como ocorreu nos testes apresentados neste item e no anterior, a proporção de tempo de emissão contínua do arco desfavorece a influência dos picos de luz infravermelha provindos do diodo laser. Acredita-se também que, a situação ideal, em todo o tempo de abertura da câmera haja luz proveniente dos diodos laser de alta potência.

Observou-se que, ao longo do processo de soldagem, não há oscilação na iluminação gerada pelo acionamento dos diodos laser de alta potência, resultando em quadros com perfis de iluminação semelhante ao longo de todos os vídeos adquiridos. A homogeneização da iluminação ao longo dos quadros é um forte indicador que a sincronia temporal entre o acionamento dos diodos e a obtenção das imagens foi realizada de forma correta.

É possível se observar, também, que o sistema óptico foi capaz de homogeneizar a densidade de energia luminosa sobre a área de junta, sendo responsável pela capacidade de visualização de toda a região ao redor do arco, como o cordão de solda e, caso houvesse, a junta e seus arredores, tanto para as soldagens TIG quanto para soldagens MIG/MAG. Este sistema, portanto, para as condições de soldagem e iluminação apresentadas se encontra completamente apto para aplicações como seguidor de juntas.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Partindo-se do objetivo principal de desenvolver um sistema de visão para processos de soldagem através da utilização de diodos laser de alta potência no infravermelho próximo como iluminação de auxílio, de baixo custo e flexível, é possível concluir que:

a) Em relação à radiação do arco elétrico:

- O aumento da corrente, em um mesmo processo, para o mesmo tamanho de arco, gera um aumento da energia luminosa emitida pelo arco, tanto na parcela provinda da emissão dos átomos excitados do gás de proteção como na parcela envolvendo a emissão dos corpos negros na região da junta soldada;
- O processo MIG/MAG tem maior energia luminosa quando comparado ao processo TIG com características similares. Em relação aos gases de proteção, observou-se que o Argônio puro apresenta maior energia luminosa, seguido pelo Argônio com adição de CO₂ e, por fim Argônio com adição de Oxigênio, em condições semelhantes de corrente. Os picos de emissão dos átomos excitados em diferentes comprimentos de onda são os principais responsáveis pelas diferenças entre estes. O pico de Argônio, situado em 912 nm, é o principal concorrente à emissão dos diodos laser.

b) Em relação aos componentes selecionados para o sistema:

- O diodo laser de alta potência selecionado (modelo SPL-PL90_3 da OSRAM®) com 75W de pico e emissão em 905 nm, ou seja, infravermelho próximo, mostrou-se adequado para iluminar os arredores da poça de fusão;

- A câmera selecionada para a aquisição de imagens (Pixelink® PL-B776U), por sua disponibilidade imediata em laboratório e boa flexibilidade correlacionada a um custo baixo, não se mostrou adequada dada o grande tempo de exposição (*shutter*) igual a 100 microsegundos.
- c) *Em relação ao projeto elétrico do sistema de visão:*
- A topologia ressonante desenvolvida (simulada, equacionada e validada) para o acionamento dos diodos laser respeita as limitações de uso do componente, maximizando a potência luminosa emitida e, ainda, com alta eficiência energética e sem grandes demandas da rede elétrica;
 - Os circuitos responsáveis pelo controle de chaveamento das chaves comutadoras foram projetados com a criação e controle do *trigger* através de um microcontrolador de 8 bits 16F877A. O MCU é, ainda responsável pelo envio de sinal de sincronia para a câmera, e seu algoritmo e sua natureza programável permite grande flexibilidade na aplicabilidade do sistema de visão em diferentes situações.
- d) *Em relação ao projeto final:*
- O sistema óptico projetado foi capaz de gerar uma iluminação homogênea em sua projeção na área de interesse. O uso de uma lente asférica em conjunto com uma lente convergente foi responsável pela condensação dos feixes provenientes das diferentes fontes pontuais;
 - O sistema de visão desenvolvido apresenta custo relativamente baixo, onde, incluindo todos os seus componentes, este é inferior a US\$ 5.000, resultando em um sistema três vezes mais barato do que sistemas semelhantes desenvolvidos com os mesmos diodos laser.
- e) *Em relação à avaliação do sistema durante a soldagem:*
- O protótipo não foi capaz de sobrepor a luz do arco em nenhum dos testes realizados, com baixa corrente. Porém, sua iluminação provou-se homogênea, iluminando toda a região ao redor do arco e gerando um bom contraste nas imagens, com sincronização adequada entre a iluminação e a captura das imagens;
 - As imagens para o processo TIG se mostraram inferiores ao obtidos em trabalhos semelhantes, porém as imagens para o processo MIG/MAG tiveram resultados semelhantes à literatura que utilizam diodos laser em relação ao contraste e à

iluminação de toda a área da junta. Neste contexto, sugere-se a utilização do protótipo, para as condições utilizadas nos testes, como um sistema de visão na forma de um seguidor de juntas.

CAPÍTULO VIII

TRABALHOS FUTUROS

Como estudos e desenvolvimentos futuros, para a melhoria do sistema de visão para processos de soldagens em sua eficiência de sobreposição à radiação de arcos de processos TIG e MIG/MAG e sua flexibilização, sugere-se os seguintes tópicos:

- Utilização uma câmera com o menor tempo de exposição possível, preferencialmente, na faixa de 0,1 a 5 µs, e adaptação da topologia de acionamento para a emissão contínua de luz infravermelha do conjunto de diodos laser ao longo todo o tempo de abertura;
- Projeto de um novo sistema óptico visando a diminuição de sua estrutura física, porém aplicando os mesmos princípios para condensação e homogeneização da luz provinda das diferentes fontes pontuais;
- Projeto de um novo arranjo do sistema de visão, cuja aquisição de imagens e iluminação seja concêntrica (como câmeras de segurança com visão noturna), com o intuído de diminuir o espaço físico necessário para a montagem do sistema como um todo e melhor acesso a diferentes tipos de junta;
- Estudo da influência do tratamento da superfície da chapa, e sua reflexibilidade, na eficiência da iluminação do sistema de visão como um todo;
- Estudo e projeto de um sistema de lentes ópticas capaz de, além de condensar e homogeneizar a iluminação das diversas fontes pontuais, projetar toda a energia luminosa dos diodos laser em uma área correspondente apenas à região próxima da junta (cerca de 25 mm de diâmetro) com o intuito de aumentar a densidade luminosa na região de interesse;

- Estudo da utilização de *zooms* ópticos para a maior aproximação possível da região de interesse, diminuindo ao máximo a entrada de luz infravermelha que não seja de interesse e, portanto, melhor balanceamento e contraste nas imagens adquiridas por câmeras de tipo CMOS;
- Caso haja desenvolvimento de novos componentes comerciais, escolha de um diodo laser de alta potência com emissão em comprimento de onda superior ao NIR atualmente utilizado (905 nm), com o intuito de evitar o pico de emissão nesta faixa para o átomo excitado de argônio, presente nas composições gasosas de grande parte das soldagens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, B. M.; SMITH, J. S.; LUCAS, W.; LUCAS, J.; HOUGHTON, M. A Low Cost Vision System for Real-Time Monitoring os Welding Applications. 14th International COnference on the Joining of Materials & the 5th International Conference on Education in Welding, 2007. Helsingor, Denmark. 29th of April - 2nd of May. 13 p.
- ABDULLAH, B. M.; SMITH, J. S.; LUCAS, W.; LUCAS, J.; MALEK, F. Monitoring of TIG Welding using Laser and Diode Illumination Sources: a Comparison Study International Conference on Eletronic Desing, 2008. Perang, Malasya. December 1-3. 4 p.
- BALFOUR, C.; SMITH, J. S.; AL-SHAMMA'A, A. I. A Novel Edge Feature Correlation Algorithm for Real-Time Computer Vision-Based Molten Weld Pool Measurements. *Welding Research,Suplement of Welding Journal*, p. 1 - 8, January 2006.
- BÁLSAMO, P. S. S.; VILARINHO, L. O.; VILELA, M.; SCOTTI, A. Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: synchronized shadowgraphy. *Int. J. for the Joining of Materials* 2000.
- BARNETT, R. J.; COOK, G. E.; STRAUSS, A. M.; ANDERSEN, K.; SPRINGFIELD, J. F. A Vision-Based Weld Quality Evaluation System. *Trends in Welding Research, Proceedings of 4th International Conference*, 1995. Gatlinburg, Tennessee. 5-8 June. 4 p.
- BASKORO, A. S.; MASUDA, R.; KABUTOMORI, M.; SUGA, Y. Welding Penetration Control for Aluminum Pipe Welding Using Omnidirectional Vison-based Monitoring of Molten Pool. *8th Internation Welding Symposium*, 2008. Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan. 16-18 November. 1 p.

BOILLOT, J.-P.; NORUK, J. Intellinget Sensing Systems opens door to Greener Welding. 8th Internation Welding Symposium, 2008. Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan. 16-18 November. 1 p.

BOVIK, A. **The Essential Guide to Image Processing**. London: Academic Press of Elsevier Inc., 2009. 853 p. p. ISBN 978-0-12-374457-9.

BOYLESTAD, R. L. **Introdução à Análise de Circuitos**. 10^a Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 827 p. ISBN 85-87918-18-4.

CANTOR, D. A. R.; NORRISH, J.; NICHOLSON, A. Vision Based system for Rapid Robot program generation for weld repair. 2007. 7 p.

CHALLONER, J. **Atlas Visuais: Física**. São Paulo: Ática, 1997. 64 p.

CHEN, H.; LV, F.; LIN, T.; CHEN, S. Closed-Loop Control of Robotic Arc Welding System with Full-penetration Monitoring. **J Intell Robot Syst**, n. 56, p. 565 - 578, 2009.

DA SILVA, D. C. Retificação de Imagens Digitais de Fachadas com Pré-Correção das Distorções das Lentes. **Bol. Ciênc. Geod., sec. Comunicações**, v. 12, n. 1, p. 123-138, jan-jun 2006.

DISPERATI, A. A. **Fotografias Aéreas Inclinadas**. Curitiba: Ed. da UFPR, 1995. p.

DONOSO, J. P. **Transferência de Calor por Radiação**. Apostila USP - IFSC: 26 p. 2010. Disponível em:

DUFFEY, T. P.; SLOAN, S. E.; MAZUMDER, J. Measurement of Free Surface Deformation by Reflective Topography. **Trends in Welding Research, Proceedings of 4th International Conference**, 1995. Gatlinburg, Tennessee. 5-8 June. 10 p.

ELOUARDI, A.; BOUAZIZ, S.; DUPRET, A.; LACASSAGNE, L.; AND, J. O. K.; REYNAUD, R. A smart sensor-based vision system: implementation and evaluation. **J. Phys. D: Appl. Phys.**, n. 39, p. 1691 - 1705, 2006.

EN60825. Safety of laser products. Equipment classification and requirements. 2007. 104 p. Norma: EN60825:2007.

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. **High Speed - 10MBit/s Logic Gate Optocouplers**. 2001. 11 p. Datasheet: DS300202.

FAN, H.; RAVALA, N. K.; HOWARD C., W. I.; CHIN, B. A. Low-cost infrared sensing system for monitoring the welding process in the presence of plate inclination angle. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 140, p. 668 - 675, 2003.

FINZI NETO, R. M. Desenvolvimento de um inversor trifásico utilizando as técnicas de chaveamento suave e imposição de corrente para acionamento do motor de indução. 1999. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FINZI NETO, R. M. Um Carregador De Baterias Inteligente, Alta Potência, Usando Tecnologia De Fontes Chaveadas Com Comutação Não Dissipativa E Correção Do Fator De Potência. 2003. 237 f. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FRANCO, L. D. N. Sincronização, Captura e Análise de Imagens da Poça de Soldagem no processo GMAW convencional, no modo de transferência metálica por curto-circuito. 2007. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília - UNB, Brasília.

HARA, K.; SUGA, Y. Penetration Control by Monitoring of Molten Pool Condition in TIG Welding of Thin Steel Metal. 8th Internation Welding Symposium, 2008. Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan. 16-18 November. 1 p.

HASEGAWA, J. K.; DE ARRUDA JUNIOR, E. R. Mosaico Com Imagens Digitais. **Bol. Ciênc. Geod. sec. Artigos**, v. 10, n. 1, p. 31-50, jan-jun 2004.

HOUGHTON, M. A.; VILARINHO, L. O.; LUCAS, B.; LUCAS, J. J. Vision Systems for Monitoring and Control of Arc Welding Operations. **Soldagem e Inspeção**, v. 12, n. 4, p. 283-299, Out/Dez 2007.

INCROPERA; DEWITT; BERGMAN; LAVINE. **Fundamentals os Heat and Mass Transfer**. Sixth Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2002. 999 p.

INTERNATIONAL RECTIFIER. **HFA15TB60 - Ultrafast, Soft Recovery Diode**. California, 2003. 7 p. Datasheet: PD-2.334 rev. C.

INTERSIL CORPORATION. **ICL7667 - Dual Power MOSFET Driver**. 2010. 10 p. Datasheet: FN2853.6.

ISHIDE, T.; SHONO, S.; IIDA, Y.; FUJIWARA, M.; KAMO, K.; KONDO, Y. Development of Visual Sensor for Gas Shieldning Arc Welding. IIW Asian Pacific Regional Welding Congress and 36th Annual A.W.I. Conference, Australian Weldig Institute, 1988. 593-602 p.

ISO3834. Quality requirements for fusion welding of metellic materials. 2005. 66 p.
Norma: ISO3834:2005.

LI, Y.; WU, L.; CHANG, D.; MIDDLE, J. E. Machine Vision Analysis of The Welding Region ans Its Application to Seam Tracking in GTAW and GMAW. **International Trends in Science and Technology**, p. 1021 - 1025, 1992.

MAO, W.; KATSUKI, M. Development of Automatic Welding System Using a Visual Sensor. 8th Internation Welding Symposium, 2008. Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan. 16-18 November. 1 p.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. PIC16F877A. 2010. Disponível em: <<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010242>>. Acesso em: 13 de janeiro de 2010.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **PIC16F87XA Data Sheet - 28/40/44 Pin Enhanced Flash Microcontrollers.** 2003. 234 p. Datasheet: DS39582B.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. O. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design.** 3^a edição. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2002. 824 p. ISBN 0-471-22693-9.

MOTA, C. P.; NETO, R. M. F.; VILARINHO, L. O.; GALLO, C. A. Topologia De Acionamento De Diodos Laser De Alta Potência Visando Sua Utilização Em Auxílio Visual A Processos De Soldagem. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), 2010. Campina Grande, Paraíba. 18-21 Agosto. 10 p.

NIST. NIST Atomic Spectra Database Lines Data (version 3.1.5), 2010. Disponível em: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html>. Acesso em: março de 2010.

NORUK, J. Optimizing Shipyard Welding with Intelligent Process Controls. **Welding Journal**, v. February 2011, p. 46-49, fev. 2011.

OGAWA, Y. Observation of Weld Pool Behavior on TIG Welding. Proceedings of OMAE99, 18th International Conference On Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1999. St. Johns, Newfoundland, Canada. July 11–16. 13 p.

OGAWA, Y.; MORITA, T. Effect Of Shielding Gas And Wire Electrode On Mig Welding. Proceedings of OMAE99, 18th International Conference On Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1999. St. Johns, Newfoundland, Canada. July 11–16. 13 p.

OKAGAITO, T.; OHJI, T.; MIYASAKA, F. UV Radiation thermometry of TIG weld pool J.JWS, 2004.

ONISHI, T.; KAWAHITO, Y.; KATAYAMA, S. In-Process Monitoring and Adaptative Control in Micro Welding with Fiber Laser. 8th Internation Welding Symposium, 2008. Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan. 16-18 November. 1 p.

OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS. Nanostack Pulsed Laser Diode in Plastic Package 75 W Peak Power. Regensburg, 2006. 6 p. Datasheet: SPL PL90_3.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. *Análise de Imagens Digitais - Princípios, Algoritmos e Aplicações*. Editora Thomson Learning, 2007. 528 p. ISBN 9788522105953.

PHILIPS SEMICONDUCTORS. BYV26 series - Fast Soft-recovery Controlled Avalanche Rectifiers. 1994. 13 p. Datasheet: BYV26C.

PIXELINK. PL-B776F Firewire, PL-B776G Gigabit Ethernet, PL-B776U USB 2.0. Ontario, 3 p. Datasheet: 776.

RASHID, M. H. *Eletrônica de Potência: circuitos, dispositivos e aplicações*. São Paulo: Makron Books, 1999. 844 p. ISBN 85-346-0598-X.

SAEED, G.; ZHANG, Y. M.; JAYMES, C. A Compact Sensor for Welding Process Control. Procedings os the 7th International Conference on Trends in Welding Research, 2005a. Callaway Garndes Resort, Pine Mountain, Georgia. May 16-20, 2005. p.671 - 676.

SAEED, G.; ZHANG, Y. M.; JAYMES, C. Weld Pool Surface Monitoring and Depth Extration Using a Calibrated CCD Sensor. Procedings os the 7th International Conference on Trends in Welding Research, 2005b. Callaway Garndes Resort, Pine Mountain, Georgia. May 16-20, 2005. p.665 - 670.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. São Paulo: Artliber Editora 2008. 284 p.

SHAO, X.; YAN, D.; LU, H.; CHEN, D.; ZHANG, R.; ZHENG, Y. Efficiency droop behavior of GaN-based light emitting diodes under reverse-current and high-temperature stress. *Solid-State Electronics*, In Press, Corrected Proof, p. 5, jan. 2011.

SHI, Y. H.; WANG, G. R. Vision based seam tracking system for underwater flux cored arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 11, n. 3, p. 271 - 278, 2006.

SHINOZAKI, K.; YAMAMOTO, M.; KADOI, K.; NAGASHIMA, T.; KANAZAWA, T. Melting phenomenon of hot-wire GTA and hot-wire laser welding process. *IIW Doc. XII - 1994 - 10*, p. 9, 2010.

SILVA, C. E. F. *Desenvolvimento de um sistema mecatrônico para soldagem multipasses monitorado por visão computadorizada*. 1997. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Pós- Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos.

SLAMA, C. C. *Manual of Photogrammetry*. 4º Edition. Fall Church: American Society of Photogrammetry, 1980. 1056 p.

SMITH, J. S.; BALFOUR, C.; AMIN-NEJAD, S. Advances in Sensor Technology for Controlling Arc Welding Processes *IIW Doc. No. XII-1790-2004* p. 13, 2004.

ST MICROELECTRONICS. *IRF740 - N-Channel 400V - 0.48 - 10 A - TO-220 PowerMESH MOSFET*. Italy, 1998. 9 p. Datasheet: IFR740.

SUNG, K.; LEE, H.; CHOI, Y. S.; RHEE, S. Development of a Multiline Laser Vision Sensor for Joint Tracking in Welding. *Welding Research,Suplement of Welding Journal*, p. 79s - 85s, April 2009.

TAYLOR, G.; KLEEMAN, L. *Visual Perception and Robotic Manipulation: 3D Object Recognition, Tracking and Hand-Eye Coordination*. Springer, 2006. p. ISBN 3540334548.

TEKTRONIX. *DigitalStorage Oscilloscopes TPS2012,TPS2014, TPS2024 Data Sheet*. Melrose, 2009. 12 p. Datasheet: 3MW-17750-4.

TEXAS INSTRUMENTS. *Designing With the SN54/74LS123*. Dallas, 1997. 20 p. App Note: SDLA006A.

TEXAS INSTRUMENTS. SN54121, SN74121 Monostable Multivibrators with Schmitt-Trigger Inputs. Dallas, 2005. 15 p. Datasheet: SDLS042A.

UMEHARA, Y.; SUZUKI, R.; NAKANO, T. Development of the Innovative GMW wire Improving the Flow Direction of Molten Pool. 8th International Welding Symposium, 2008. Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan. 16-18 November. 1 p.

VANZETTI, R. Practical Applications of Infrared Techniques. First Edition. John Wiley & Sons Inc, 1972. 374 p. ISBN 978-0471903604.

VILARINHO, L. O. O arco TIG a 100 A e argônio puro é um arco especial? **Soldagem e Inspeção**, v. 14, n. 4, p. 353-357, Out/Dez 2009. ISSN 0104-9224.

VILARINHO, L. O.; LUCAS, B. Comunicação eletrônica privada. 2009.

VILARINHO, L. O.; LUCAS, B.; HOUGHTON, M.; LUCAS, J. J.; RAGHUNATHAN, S. Sistema de Visão por infravermelho próximo Dedicado ao Monitoramento de Processo de Soldagem. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), 2010. Gramado, RS, Brasil. Agosto 18-21. 8 p.

VILARINHO, L. O.; LUCAS, B.; RAGHUNATHAN, S.; HOUGHTON, M.; LUCAS, J. J. Dedicated Near-Infrared Vision System for Monitoring Welding Processes. 20th International Congress of Mechanical Engineering, 2009. Gramado, RS, Brasil. November 15-20. 7 p.

WALDER, J. M. M. **Espectro Eletromagnético:** 5 p. 2011. Disponível em: <http://web.cena.usp.br/apostilas/Julio/>.

WALL, W. A.; STEPHENS, D. L. Automatic Closed Circuit Television Electrode Guidance for Welding. **Welding Journal**, p. 713-720, 1969.

WU, C. S.; GAO, J. Q.; WANG, D. M. Observation of Weld Pool Profiles in Short-Circuiting Gas Metal Arc Welding IIW Doc. XII-1990-10, p. 26, 2010.

YAMAZAKI, K.; YAMAMOTO, E.; SUZUKI, K.; KOSHIISHI, F.; TASHIRO, S.; TANAKA, M.; NAKATA, K. Measurement of surface temperature of weld pools by infrared two colour pyrometry. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 15, n. 1, p. 40 - 48, 2010.

ZHANG, G.; YAN, Z.; WU , L. Reconstructing a three-dimensional P-GMAW weld pool shape from a two-dimensional visual image. **Measurement Science And Technology**, n. 17, p. 1877-1882, 2006.

ZHANG, Y. M. **Real-time weld process monitoring.** Cambridge: Woodhead Publishing and Maney Publishing, 2008. 310 p.

ZHANG, Y. M.; KOVACEVIC, R.; LI, L. Adaptive Control of Full Penetration Gas Tungsten Arc Welding. **IEEE Transactions On Control Systems Technology**, v. 4, n. 4, July 1996.

ZHANG, Y. M.; LI, L.; KOVACEVIC, R. Monitoring of Weld Pool Appearance for Penetration Control. Trends in Welding Research, Proceedings of 4th International Conference, 1995. Gatlinburg, Tennessee. 5-8 June. 4 p.

ZHANG, Y. M.; SONG, H. S.; SAEED, G. Observation of a dynamic specular weld pool surface. **Measurement Science And Technology**, n. 17, p. L9 - L12, 2006.

ANEXO I

PROGRAMA DE CONTROLE (PIC 18F877A)

```
#include <16F877.h>
#device adc=8

#FUSES NOWDT          //No Watch Dog Timer
#FUSES HS             //High speed Osc (> 4mhz)
#FUSES NOPUT          //No Power Up Timer
#FUSES NOPROTECT      //Code not protected from reading
#FUSES BROWNOUT       //Reset when brownout detected
#FUSES NOLVP           //No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18) used for I/O
#FUSES NOCPD          //No EE protection
#FUSES NOWRT          //Program memory not write protected
#FUSES NODEBUG         //No Debug mode for ICD

#use delay(clock=20000000)

#include "C:\Documents and
Settings\Eletronica\Desktop\Carolina\16F877\Multipulso\multiuso.h"
#include <math.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <LCD.C>

#define FOSC    625000    //Freq de oscilacao/4/PS (PS=8)
#define tempo1  500        //tempo de espera de 500 ms
#define tempo2  100        //tempo de espera de 50 ms
#define fini    25         //frequencia inicial
#define fmin    5          //frequencia minima
#define fmax    100         //frequencia maxima
#define df     1           //df - aumento da freq.

#define fast_io(E)
#define fast_io(A)

unsigned int16 FREQ;
unsigned int16 TMR;
```

```

unsigned int DISP;
unsigned int16 i=0;
unsigned int16 dt=0;

#define TIMER1
void TIMER1_isr()           //interrupção do timer
{
    set_timer1(TMR);
    clear_interrupt(int_timer1);
    output_toggle(PIN_D3);
    output_high(PIN_B7);
    output_high(PIN_A0);
    // delay_us(5);
    for (i=0;i<40;i++){
        output_high(PIN_E1); // dt pulsos = 800ns
        delay_cycles(2);
        #asm
        movf 0x04,W
        movwf 0x09
        #endasm
        delay_cycles(3);
        output_low(PIN_E2);
        delay_cycles(7); //intervalo de 4 us entre pulsos
    }
    output_low(PIN_A0);
    delay_us(10);
    for (i=0;i<dt;i++)
    {
        output_high(PIN_A0);
        delay_us(40);
        output_low(PIN_A0);
        delay_us(10);
    }
}

#define EXT
void EXT_isr()
{
    clear_interrupt(INT_EXT);
    disable_interrupts(int_ext);
    if (DISP==0)
    {
        output_high(PIN_B7);
        enable_interrupts(int_timer1);
        set_timer1(TMR);
        lcd_gotoxy(1,1);
        lcd_putc("Enviando Pulso");
        lcd_gotoxy(1,2);
        printf(lcd_putc,"Freq = %4Lu Hz ",FREQ);
        DISP^=1;
    }
    else if (DISP==1)
    {
        output_low(PIN_B7);
    }
}

```

```

disable_interrupts(int_timer1);
lcd_gotoxy(1,2);
lcd_putc("ou ajuste a Freq");
lcd_gotoxy(1,1);
lcd_putc("Aguarda Disparo ");
DISP^=1;
}
delay_ms(500);
enable_interrupts(int_ext);
}

void intro()
{
lcd_gotoxy(1,1);
lcd_putc(" LAPROSOLDA/UFU ");
lcd_gotoxy(1,2);
lcd_putc("--- VIASOLDA ---");
delay_ms(5000);
lcd_gotoxy(1,1);
lcd_putc("SISTEMA DE VISAO");
lcd_gotoxy(1,2);
lcd_putc("P/ PROC SOLDAGEM");
delay_ms(5000);
lcd_gotoxy(1,1);
lcd_putc("Carolina P. Mota");
lcd_gotoxy(1,2);
lcd_putc(" MSc. 2009/2011 ");
delay_ms(5000);
}

void main()
{
setup_adc_ports(NO_ANALOGS);
setup_adc(ADC_OFF);
setup_psp(PSP_DISABLED);
setup_spi(FALSE);
setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_8);
setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);

// TODO: USER CODE!!
lcd_init();

ext_int_edge(H_TO_L);
SET_TRIS_B( 0x07 );      //apenas RB0, RB1 e RB2 setado como entrada
SET_TRIS_E( 0x00 );      //Porta E como saída
SET_TRIS_A( 0x00 );      //Porta A como saída (A0)
DISP=0;
FREQ = fini;
dt=11850/FREQ;
TMR=655536-(FOSC/FREQ);
TMR=TMR-176;
output_low(PIN_D3);      //frequencimetro
output_low(PIN_B7);      //acionador do rele de potencia
}

```

```

output_low(PIN_A0);      //acionador da câmera
intro();
lcd_gotoxy(1,2);
lcd_putc("ou ajuste a Freq");
lcd_gotoxy(1,1);
lcd_putc("Aguarda Disparo ");
delay_ms(1000);
lcd_gotoxy(1,2);
printf(lcd_putc,"Freq = %4Lu Hz ",FREQ);
// enable_interrupts(INT_RTCC);
enable_interrupts(INT_EXT);
enable_interrupts(GLOBAL);
while(1)
{
    if (!input(PIN_B1) && DISP==0 && (FREQ<fmax))
    {
        int count;
        count=0;
        disable_interrupts(INT_EXT);
        output_low(PIN_E1);
        output_low(PIN_E2);
        lcd_gotoxy(1,1);
        lcd_putc("Aumento da Freq.");
        while(!input(PIN_B1) && (FREQ<fmax)&& DISP==0)
        {
            set_timer1(0);
            FREQ = FREQ + df;
            lcd_gotoxy(1,2);
            printf(lcd_putc,"Freq = %4Lu Hz ",FREQ);
            if (count<14)
            {
                delay_ms(tempo1);
                count++;
            }
            else {delay_ms(tempo2);}
        }
        TMR=655536-(FOSC/FREQ);
        TMR=TMR-176;
        dt=11850/FREQ;
        clear_interrupt(INT_EXT);
        enable_interrupts(INT_EXT);
    }
    else if(!input(PIN_B2) && DISP==0 && (FREQ>fmin))
    {
        int count;
        count=0;
        disable_interrupts(INT_EXT);
        output_low(PIN_E1);
        output_low(PIN_E2);
        lcd_gotoxy(1,1);
        lcd_putc("Dimin. da Freq. ");
        while(!input(PIN_B2) && (FREQ>fmin)&& DISP==0)
        {
            set_timer1(0);

```

```
FREQ = FREQ - df;
lcd_gotoxy(1,2);
printf(lcd_putc,"Freq = %4Lu Hz ",FREQ);
if (count<14)
{
    delay_ms(tempo1);
    count++;
}
else {delay_ms(tempo2);}
}
TMR=655536-(FOSC/FREQ);
TMR=TMR-176;
dt=11850/FREQ;
clear_interrupt(INT_EXT);
enable_interrupts(INT_EXT);
}
if(DISP==0)
{
lcd_gotoxy(1,1);
lcd_putc("Aguarda Disparo ");
}
}
```

ANEXO II

PROGRAMA EM MATLAB® PARA RETIFICAÇÃO DE IMAGENS

```
%% Registering an Aerial Photo to an Orthophoto
clc
clear all
close all
%% Step 1: Read Images
[file caminho] = uigetfile('.jpg','Selecione a imagem inclinada
desejada...');
imagem=imread([caminho file]);
%unregistered = rgb2gray(imagem);
unregistered = imagem;
figure,
imshow(unregistered)
title('Selecione os 4 pontos de controle')
hold on
%% Step 2: Load and Add Control Points
% Four pairs of control points have already been picked. Load these points
% from a MAT-file. If you want to proceed with these points, go to Step 3:
% Infer Geometric Transformation.
input_points = ginput(4);
plot(input_points(:,1),input_points(:,2),'ro');
hold off

%% Posição dos pontos reais em relação ao ponto 1.
%           Y   X
real_points = [0 0;
               14 0;
               0 10;
               14 10];

Dpixel=sqrt((input_points(2,1)-input_points(1,1))^2+(input_points(2,2)-
input_points(1,2))^2);
Dcampo=sqrt((real_points(2,1)-real_points(1,1))^2+(real_points(2,2)-
real_points(1,2))^2);
Rpixel=Dpixel/Dcampo;

% Transformação da base real para pixels
base_points=ones(length(input_points),1)*input_points(1,:)+Rpixel*(real_poi
nts);

%% Step 3: Infer Geometric Transformation
% Because we know that the unregistered image was taken from an airplane,
```

```
% and the topography is relatively flat, it is likely that most of the
% distortion is projective. |cp2tform| will find the parameters of the
% projective distortion that best fits the stray input_points and
% base_points you picked.

t_concord = cp2tform(input_points,base_points,'projective');

%% Step 4: Transform Unregistered Image
% Even though the points were picked on one plane of the unregistered
% image, you can transform the entire RGB image. |imtransform| will apply
the
% same transformation to each plane. Note that the choice of 'XData' and
% 'YData' values ensures the registered image will be aligned with the
% orthophoto.

%info = imfinfo('D:\Documents\UFU\Pós-Graduação\Projeto\Refs.
Imagens\Inclinadas\04_alfa15.JPG');
registered = imtransform(imagem,t_concord, ...
    'XData',[1 size(imagem,2)], 'YData',[1
size(imagem,1)]);

%% Step 5: View Registered Image

figure,
imshow(registered)
hold on
plot(base_points(:,1),base_points(:,2),'bo');
line([base_points(1,1) base_points(4,1)],[base_points(1,2)
base_points(4,2)])
line([base_points(3,1) base_points(2,1)],[base_points(3,2)
base_points(2,2)])
hold off
[Hscale,Htext]=plot_scale([base_points(4,1)+100
base_points(4,2)+100],1/round(Rpixel),2,'r','cm');
%% Medidas para Validação
med=zeros(7,1);
for n=1:7
    t=ginput(2);
    med(n)=sqrt((t(2,1)-t(1,1))^2+(t(2,2)-t(1,2))^2)/Rpixel;
end

%%
real=[sqrt(10^2+14^2);
      sqrt(10^2+14^2);
      8;
      10;
      14;
      3;
      1];
      erro=100*abs(med-real)./real;
%%
fprintf('Valor\t\t Real\t\t Erro\n');
for i=1:7
    fprintf('%f\t %f\t %f\n',med(i),real(i),erro(i));
end
```

ANEXO III

PROGRAMA EM MATLAB® PARA CÁLCULO DA INTEGRAL DOS ESPECTROS

```
clc
%clear all
close all
wave=load('Wavelengths.txt');
[arquivo,pasta]=uigetfile('.lvm','Escolha os espectros... ');
int=[];
teste=[];
fprintf(pasta);
fprintf('\n');
spect=dir([pasta,arquivo(1:length(arquivo)-4),'.lvm']);
s=zeros(length(wave),length(spect));
clc;
%op = input('1 - Com Cabeçalho\n2 - Sem cabeçalho\n Opção = ');
op=2;
figure,
for ii=1:length(spect)
    if op==2
        s(:,ii)=load([pasta,spect(ii).name]);
    end
    if op==1
        m=importdata([pasta,spect(ii).name],',',21);
        s(:,ii)=m.data;
    end
    subplot(ceil(length(spect))/2,2,ii)
    plot(wave,s(:,ii));
    text(200,4e4,spect(ii).name)
    axis([wave(1) wave(2048) 0 65535])
end

%print('-dpng', [pasta(jj).name,'_espectros'])
op=input('Dados Relevantes (ENTER=todos): ');
close
if (isempty(op))
    op=(1:length(spect));
end

figure,
subplot(2,1,1)
plot(wave,s(:,op))
title(pasta)
axis([wave(1) wave(2048) 0 65535])
```

```
xlabel('Comprimento de Onda (nm)')
subplot(2,1,2)
if(length(op)~=1)
media=mean(s(:,op)');
else
media=s(:,op);
end
plot(wave,media)
title('Média')
xlabel('Comprimento de Onda (nm)')
axis([wave(1) wave(2048) 0 65535])
%print('-dpng', [pasta(jj).name, '_resultados'])

%% Calculo da Integração
%1- Achar maximo
[x,j]=max(media);
%2-Achar +10nm
a=find(wave>=wave(j)+10);
b=find(wave<=wave(j)+10);
if (abs(a(1)-wave(j))<abs(b(length(b))-wave(j)))
maior=a(1);
else
maior=b(length(b));
end
%3- Achar -10nm
a=find(wave>=wave(j)-10);
b=find(wave<=wave(j)-10);
if (abs(a(1)-wave(j))<abs(b(length(b))-wave(j)))
menor=a(1);
else
menor=b(length(b));
end
%% 4- Integração entre 905 +-10nm
int=trapz(wave(menor:maior),media(menor:maior));
figure, plot(wave(menor:maior),media(menor:maior))
```